



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

**TRAMA MAGNÉTICA DENTRO E FORA DE UM CRÁTON: INSIGHTS A
PARTIR DE DADOS AEROMAGNÉTICOS DO CINTURÃO GURUPI, BRASIL**
TECTONIC MAGNETIC FABRIC INSIDE AND OUTSIDE A CRATON: INSIGHTS
FROM AEROMAGNETIC DATA OF THE GURUPI BELT, BRAZIL

ANDRÉ SENA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 499

Orientador: Prof. Dr. Elton Luiz Dantas

BRASÍLIA

2022



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

**FÁBRICA MAGNÉTICA DENTRO E FORA DE UM CRÁTON: INSIGHTS A
PARTIR DE DADOS AEROMAGNÉTICOS DO CINTURÃO GURUPI, BRASIL**
TECTONIC MAGNETIC FABRIC INSIDE AND OUTSIDE A CRATON: INSIGHTS
FROM AEROMAGNETIC DATA OF THE GURUPI BELT, BRAZIL

ANDRÉ SENA DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia – Instituto de Geociências – IG da Universidade de Brasília – UnB como requisito parcial obrigatório para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de concentração: Geologia Regional

Orientador: Prof. Dr. Elton Luiz Dantas

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Valmir da Silva Souza (UnB)

Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro (UFPA)

Prof^a. Dr^a. Catarina Labouré Bemfica Toledo (suplente - UnB)

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

SO48t Sena de Oliveira, André
Trama Magnética Dentro e Fora de um Cráton: Insights a Partir de Dados Aeromagnéticos do Cinturão Gurupi, Brasil / André Sena de Oliveira; orientador Elton Luiz Dantas. -- Brasília, 2022.
76 p.

Dissertação (Mestrado em Geologia) -- Universidade de Brasília. 2022

1. Faixa Orogênica. 2. Cinturão Gurupi. 3. Cráton São Luís. 4. Magnetometria. 5. Cinemática. I. Luiz Dantas, Elton, orient. II. Título.

A evolução é um processo lento.

Agatha Christie

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, Marly e Alcides, minha mãe, Márcia, e irmã, Hérica que são minha família e sempre me proporcionaram força, coragem, sempre acreditaram em mim e nunca mediram esforços em me proporcionar suporte quando necessário.

Ao professor Elton Luiz Dantas, por ter me oferecido sua experiência e dedicação em extrair o meu melhor nesta pesquisa, pelas discussões através de reuniões e sua paciência em me orientar ao longo desse tempo.

Aos amigos que fiz na pós graduação, em especial aos que dividiram a república em Brasília: Seba, Igor, Phaula, Júlia, Ítalo, Camila, Gabriel e Ángel. Cada momento naquela república foi muito especial.

Aos meus amigos Vivian e Cabeça pela parceria desde a Universidade Federal do Amazonas e agora na Universidade de Brasília.

Ao Professor Humberto Lima pela amizade de anos, por sempre acreditar em mim e sempre desejar meu crescimento.

Aos professores da UFAM, Tiago Maia, que hoje é meu colega de pós graduação, e a Rosária do Carmo.

Ao Darby Lima que me ajudou nos momentos finais da pesquisa com discussões e motivações características somente dele.

A Samara Medeiros, por estar ao meu lado ao longo de todos esses anos me ouvindo, aconselhando em todos os momentos e por sempre ter me oferecido motivos para ficar alegre e motivado.

Aos professores da pós graduação que enriqueceram meu conhecimento, em especial ao Vinícius Louro, Roberta Vidotti e Roberto Vizeu.

Ao programa de pós graduação em Geologia da Universidade de Brasília pela oportunidade de fazer meu mestrado.

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

RESUMO

O Cráton São Luís de idade Paleoproterozóica é bordejado pelo Cinturão Gurupi de idade Neoproterozóica no norte do Brasil. Estes terrenos apresentam complexa história deformacional derivada de orogenias paleoproterozóica, neoproterozóica e posterior fragmentação do Cráton Oeste Africano com a abertura do Oceano Atlântico. Diante da pouca compreensão acerca da estruturação em superfície e subsuperfície do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi, este estudo adotou uma abordagem multidisciplinar para investigar as deformações e mecanismos atuantes na evolução da área de estudo. Os dados aeromagnéticos foram interpretados a partir da integração com dados geológicos existentes. O método *matched filtering* estimou três profundidades para a área: 22 km, 5.7 km, 0.53 km. Na maior profundidade foram interpretados quatro domínios magnéticos no qual o Cinturão Gurupi é representada pelo domínio D, separado do Cráton São Luís pelo lineamento WSZ. O Cráton São Luís, é dividido nos domínios A, B e C e apresentam padrões sigmoidais cuja cinemática dextral é interpretada para a movimentação entre os domínios. Nas profundidades intermediárias e rasas, os lineamentos magnéticos exibem padrões deformacionais dúcteis e hierarquizados em três eventos deformacionais e foram interpretados como: D1 com lineamentos magnéticos de direção E-W e NE-SW sobrepostos ao Cráton São Luís; D2 apresentam lineamentos com tendência NW-SE e corresponde a zonas de cisalhamento sobrepostas ao Cinturão Gurupi e são associados a Zona de Cisalhamento Tentugal; D3 com direção variável entre N-S, NW-SE e E-W. O modelo digital de elevação aliado aos lineamentos do sinal analítico auxiliou na visualização de um par conjugado de estruturas NE-SW e NW-SE e corroborados pelas soluções de Euler, estimam-se que estas estruturas não ultrapassam 900 m de profundidade. As ocorrências e depósitos auríferos do Cinturão Gurupi estão espacialmente distribuídas nas direções NW-SE de caráter dúctil e direções secundárias N-S de caráter rúptil. Após correlacionar os padrões deformacionais com outras partes do mundo, o trabalho permite inferir que o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi se encaixam no modelo de supercontinentes em escala global.

PALAVRAS-CHAVE: Magnetometria, Faixa Orogênica, Cinturão Gurupi, Cráton São Luís, cinemática.

ABSTRACT

The Paleoproterozoic São Luís Craton is bordered by the Neoproterozoic Gurupi Belt in northern Brazil. These terrains present a complex deformational history derived from Paleoproterozoic, Neoproterozoic Orogenies and subsequent fragmentation of the West African Craton with the opening of the Atlantic Ocean. Given the little understanding about the surface and subsurface structuring of the São Luís Craton and Gurupi Belt, this study adopted a multidisciplinary approach to investigate the deformations and mechanisms acting in the evolution of the study area. The aeromagnetic data were interpreted from the integration with existing geological data. The matched filtering method estimated three depths for the area: 22 km, 5.7 km, 0.53 km. At the deepest depth four magnetic domains were interpreted in which the Gurupi Belt is represented by domain D, separated from the São Luís Craton by the WSZ lineament. The São Luís Craton is divided into domains A, B and C and presents sigmoidal patterns whose dextral kinematics is interpreted for the movement between the domains. In the intermediate and shallow depths, the magnetic lineaments exhibit ductile deformational patterns and hierarchized in three deformational events and were interpreted as: D1 with magnetic lineaments of E-W and NE-SW direction overlapping the São Luís Craton; D2 present lineaments with NW-SE tendency and correspond to shear zones overlapping the Gurupi Belt and are associated to the Tentugal Shear Zone; D3 with variable direction between N-S, NW-SE and E-W. The digital elevation model allied to the analytical signal lineaments helped visualize a conjugate pair of NE-SW and NW-SE structures and corroborated by Euler solutions, it is estimated that these structures do not exceed 900 m depth. The auriferous occurrences and deposits of the Gurupi Belt are spatially distributed in NW-SE directions of ductile character and secondary N-S directions of rutile character. After correlating the deformational patterns with other parts of the world, the work allows us to infer that the São Luís Craton and the Gurupi Belt fit into the supercontinent model on a global scale.

KEYWORDS: Magnetometry, Orogenic Belt, Gurupi Belt, São Luís Craton, kinematics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
1. APRESENTAÇÃO	13
1.1. Localização da área de estudo	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Justificativa do Tema	15
2. ESTADO DA ARTE	16
2.1. Sensoriamento remoto e a geofísica	16
2.2. Aerogeofísica	16
2.2.1. Magnetometria	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1. Aeromagnetometria	18
3.2. Matched Filtering	18
3.3. Gradiente Horizontal Total	19
3.4. Primeira Derivada Vertical	19
3.5. Derivada tilt	20
3.6. Deconvolução de Euler	20
3.7. Deconvolução localizada de Euler a partir do sinal analítico	20
3.8. Gamaespectrometria e SRTM	21
3.9. Dados isotópicos	21
4. CONTEXTO GEOLÓGICO	22
4.1. Cráton São Luís	23
4.2. Cinturão Gurupi	23
4.3. Metalogenia	24
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
CAPÍTULO 2 - ARTIGO	32
1. INTRODUÇÃO	34
2. GEOLOGIA REGIONAL	36
3. METODOLOGIA E USO DOS DADOS	41
3.1. Aeromagnetometria	41
3.2. Matched filtering	42
3.3. Gradiente Horizontal Total	43
3.4. Primeira derivada vertical e deriva tilt	43

3.5.	Deconvolução de Euler	44
3.6.	Deconvolução localizada de Euler a partir do sinal analítico	44
3.7.	Gamaespectroscopia e SRTM	44
3.8.	Dados isotópicos	45
4.	RESULTADOS	45
4.1.	Domínios magnéticos	46
4.2.	Lineamentos magnéticos	48
4.2.1.	Estruturas magnéticas, distribuição espacial e temporal e cinemática	52
4.3.	Deconvolução de Euler	53
4.5.	Mapa de dados isotópicos U-Pb e Sm-Nd integrados	59
4.6.	História Cinemática	60
4.6.1.	Controle estrutural dos depósitos auríferos do Cinturão Gurupi	63
5.	DISCUSSÕES	64
5.1.	Análises dos padrões magnéticos	64
5.2.	Retrabalhamento crustal e herança de estruturas antigas	65
5.3.	Padrão das estruturas no Cráton São Luís e sua contribuição para o modelo de supercontinentes	66
6.	CONCLUSÕES	67
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
CAPÍTULO 3 - CONCLUSÕES		75
1.	CONCLUSÕES	75

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Localização da área de estudo. A área de estudo corresponde ao aerolevantamento geofísico feito pelo Serviço Geológico do Brasil em 2009.....	14
Figura 2. Fluxograma de processamento dos dados aeromagnéticos. 1DV – Primeira Derivada Vertical; TILT – Derivada TILT; ASA – Sinal Analítico; GHT - Gradiente Horizontal Total.....	18
Figura 3. Espectro de potência produzido a partir do matched filtering	19
Figura 4. Mapa geológico simplificado do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi (adaptado de Vasconcelos et al., 2004; Palheta et al., 2009; Klein et al., 2008, 2014, 2017, 2020, 2020b).....	25

CAPÍTULO 2

Figura 1. (a) Reconstrução do Cráton São Luís conectado ao Cráton Oeste Africano; e (b) Conexão das faixas móveis entre os Crátos São Luís e Cráton Oeste Africano. Adaptado de Villeneuve & Cornée, (1994) e Uchoa et al., (2020).....	36
Figura 2. Mapa geológico simplificado Cráton São Luís e Cinturão Gurupi (adaptado Vasconcelos et al., 2004; Palheta et al., 2009; Klein et al., 2008, 2014, 2017, 2020, 2020b)	40
Figura 3. Fluxograma de processamento dos dados aeromagnéticos. 1DV – Primeira Derivada Vertical; TILT – Derivada TILT; ASA – Sinal Analítico; GHT - Gradiente Horizontal Total.....	42
Figura 4. Espectro de potência produzido a partir do matched filtering	43
Figura 5. a) Anomalia magnética exibe anomalia positiva na direção NW-SE em 22 km de profundidade; b) Anomalia magnética em 5.7 km exibe anomalias magnéticas dipolares orientado NW-SE; c) Anomalia magnética em 0.53 km com anomalias magnéticas dipolares.....	46
Figura 6. a) Anomalia magnética em 22 km de profundidade; b) GHT em 22 km de profundidade; c) Domínios magnéticos simplificados da área em 22 km de profundidade	47
Figura 7. a) Principais lineamentos magnéticos extraídos da primeira derivada vertical; b) Lineamentos magnéticos sobrepostos ao mapa radiométrico; c) Principais lineamentos magnéticos simplificados	51
Figura 8. Soluções de Euler sobrepostos aos lineamentos magnéticos da área.....	55

Figura 9. (a) Soluções de Euler entre 0 e 900m de profundidade; (b) 900m e 1300m de profundidade; (c) 1300m e 2200m de profundidade; (d) 2200m e 3400m de profundidade; (e) 3400 e 4800m de profundidade; e (f) 4800m e 10.386m de profundidade. - Em todas as figuras há círculos coloridos que representam as cidades: amarelo - Bragança/ Pará, azul - São miguel do Guamá/ Pará, verde - Cachoeira do Piriá/ Pará, Nova Esperança do Piriá/ Pará, laranja - Cândido Mendes/ Maranhão, vermelho - , rosa - Centro Novo do Maranhão/ Maranhão e marrom - Centro do Guilherme/ Maranhão.....	56
Figura 10. Soluções localizadas de Euler sobrepostos aos lineamentos magnéticos e MDE da área, que exibem correlação quanto a direção e localização dos lineamentos	58
Figura 11. Modelo digital de elevação com principais lineamentos extraídos da área. Destaca-se lineamentos na direção NE-SW que cruza o Cráton São Luís até interceptar o Cinturão Gurupi no qual coincide com a borda de altos topográficos e entre eles encontra-se um baixo topográfico	59
Figura 12. Idades sobrepostos aos lineamentos magnéticos da área	60
Figura 13. Três áreas chaves com as foliações e lineações superimpostas a rede de lineamentos do Cinturão Gurupi.....	62
Figura 14. Áreas chave no qual exhibe detalhes a respeito da localização dos depósitos e ocorrências auríferas à sudeste do Cinturão Gurupi. Da esquerda para à direita: Derivada Tilt; Mapa ternário radiométrico; Interpretação dos lineamentos magnéticos em fundo branco. a. Depósito Chega Tudo e ocorrências auríferas localizados na Zona de Cisalhamento Tentugal NW-SE e a direção secundária, N-S, localiza as demais ocorrências de ouro bem como o depósito Cipoeiro; b. Ocorrências auríferas localizados na direção NW-SE e demais ocorrências localizadas em direções N-S	63

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Descrição dos domínios magnéticos.....	48
Tabela 2. Estruturas interpretadas a partir dos lineamentos magnéticos da área	52

1. APRESENTAÇÃO

O Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi, área de estudo da presente pesquisa, estão localizados no norte do Brasil entre os estados do Pará e Maranhão e são compreendidos como contíguos ao Cráton Oeste Africano durante o paleoproterozóico (Almeida et al., 1981) e fragmentado durante o processo de ruptura na separação do Gondwana no Cretáceo (Klein & Moura, 2008; Soares Júnior et al., 2008).

Os resultados obtidos nesta pesquisa são frutos da integração de produtos aerogeofísicos de alta resolução com dados geológicos existentes, os quais permitiram compreender a estruturação em subsuperfície do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi que além de apresentar escassos afloramentos contam ainda com uma parcial cobertura sedimentar superior a 6 km de espessura (Soares Júnior et al., 2008). Essa integração permitiu analisar e discutir os padrões deformacionais que atuaram na complexa história evolutiva na região de estudo.

A presente dissertação de Mestrado é organizada em capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução do projeto com seus objetivos, justificativas, estado da arte quanto aos métodos aplicados na pesquisa, materiais e métodos utilizados bem como a contextualização geológica da área. O Capítulo 2 é apresentado o artigo intitulado “Tectonic Magnetic Fabric Inside and Outside a Craton: Insights From Aeromagnetic Data of the Gurupi Belt, Brazil”. O artigo apresenta a análise dos padrões deformacionais do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi a partir do processamento de dados aeromagnéticos integrados à dados geológicos existentes. O Capítulos 3 apresenta as principais conclusões da pesquisa ao levar em conta toda a sistemática adotada no trabalho.

1.1. Localização da área de estudo

A área estudo localiza-se no norte do Brasil, entre os estados do Pará e Maranhão e próximo à costa do Oceano Atlântico. A área corresponde a aproximadamente 35.881 km² e recobre rochas o Cráton São Luís, o Cinturão Gurupi e bacias sedimentares recentes.

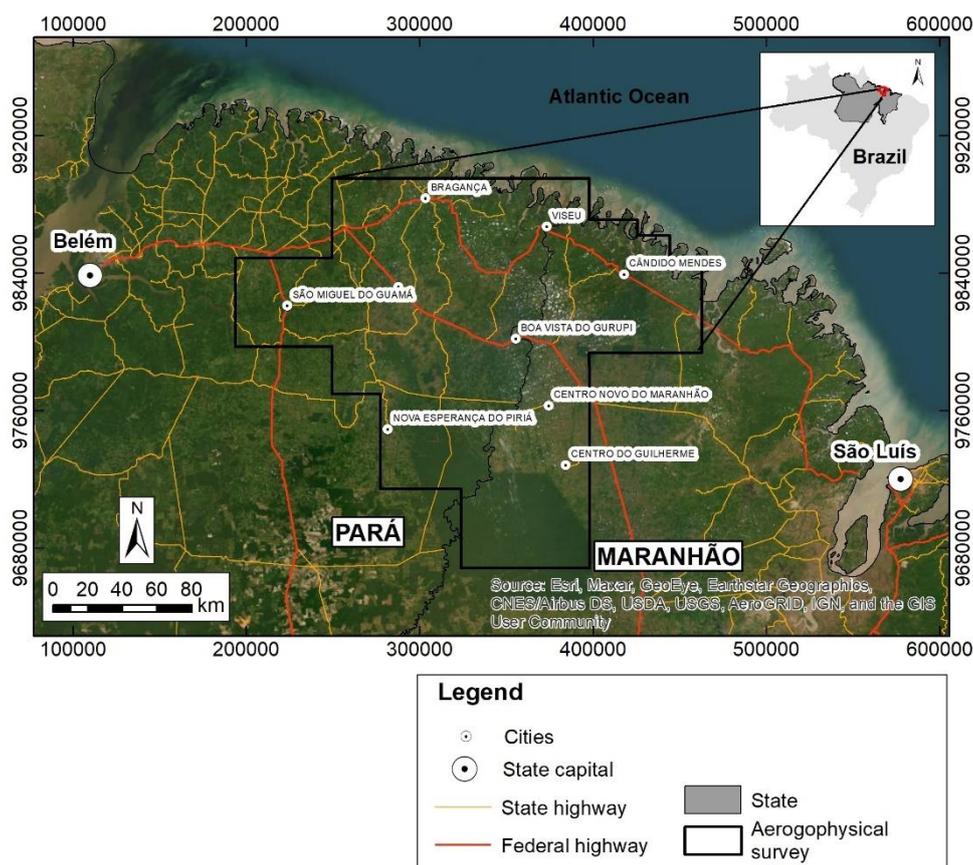


Figura 1. Localização da área de estudo. A área de estudo corresponde ao aerolevantamento geofísico feito pelo Serviço Geológico do Brasil em 2009.

1.2. Objetivos

O objetivo geral é a caracterização estrutural e deformacional em superfície e subsuperfície do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi a partir da integração de dados geofísicos com dados geológicos existentes. Para atingir estes objetivos, foram traçados os seguintes objetivos específicos.

- Delimitar domínios geofísicos em profundidades;
- Interpretar padrões deformacionais e estruturais a partir dos lineamentos extraídos dos produtos magnéticos;
- Aperfeiçoar a fronteira entre o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi;

- Discutir a distribuição das ocorrências auríferas sobre o Cinturão Gurupi;
- Discutir a história evolutiva da região e suas implicações no modelo de supercontinentes.

1.3. Justificativa do Tema

A fronteira entre o Cráton e sua Faixa Móvel são regiões geologicamente ativas e registram importantes eventos como ciclos de acreção, retrabalhamento crustal, geração de crosta juvenil, magmatismo e ocorrência e distribuição de depósitos minerais (Holden et al., 2012; Groves et al., 2018). A superposição de eventos torna complexo a compreensão da estruturação de um Cráton e sua respectiva Faixa Móvel. Soma-se ainda casos em que há cobertura sedimentar, de modo que encobrem a continuação das estruturas, o que dificulta ou mesmo impeça a compreensão mais efetiva destes domínios geotectônicos.

O Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi apresentam evidências de que eram contíguos ao Cráton Oeste Africano durante o paleoproterozóico (Almeida et al., 1981; Klein & Moura, 2001; Klein & Moura, 2008). A compreensão da história evolutiva para o Cráton Oeste Africano e suas Faixas Móveis no continente africano nos últimos anos apresentou grande melhora em virtude de abordagens multidisciplinares integrarem geofísica, geocronologia, sensoriamento remoto e dados de campo (Metelka et al., 2011; Jessell et al., 2012; McFarlane et al., 2019; Diallo et al., 2020). No continente Sul Americano, diversos trabalhos foram feitos para compreender a evolução do Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi e destacam-se trabalhos com intermédio de dados isotópicos que ajudaram fortemente na elucidação da história evolutiva da região (Palheta et al., 2009; Klein et al., 2014; Klein et al., 2020; Klein et al., 2020; Klein & Rodrigues, 2021). Ao mesmo tempo que Campos et al., 2017, Klein et al., 2017; Tavares et al., 2018 propuseram uma história evolutiva regional através de dados aerogeofísicos.

No entanto, apesar dos avanços recentes, a história deformacional em subsuperfície permaneceu pouco explorada bem como a delimitação da fronteira entre o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi. Deste ponto de vista, diversos regimes deformacionais atuantes na história evolutiva destes domínios permanecem desconhecidos tão pouco correlacionadas com estruturas em subsuperfície.

Desta maneira, a presente dissertação de Mestrado busca processar dados aerogeofísicos de alta resolução a fim auxiliar com novas visões e mecanismos atuantes

na história evolutiva do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi e também refinar a fronteira entre os dois domínios. Diferentes profundidades magnéticas foram processadas e interpretadas a partir da extração de lineamentos magnéticos. Posteriormente, foram integrados de modo a identificar padrões magnéticos em subsuperfície e posteriormente integrado com mapas geológicos compilados da região de estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1.Sensoriamento remoto e a geofísica

A técnica de sensoriamento remoto é definida como uma forma de medição das propriedades dos objetos na superfície da Terra, que utiliza dados adquiridos de aeronaves, satélites ou por sistemas não imageadores. É, portanto, uma tentativa de medir algo à distância ao invés de *in situ* (Schowengerdt, 2007). Os dados registrados são digitais e podem ser usados como um banco de dados de propriedades físicas georreferenciadas ou como *rasters* (Booyesen et al., 2021).

Por outro lado, a técnica de geofísica aplica as propriedades físicas das rochas para investigações da Terra, desde estudo da superfície terrestre até ao seu núcleo. Ela pode ser dividida em geofísica pura que estuda as porções superficiais ou substanciais do planeta e geofísica aplicada, que se preocupa com a investigação da crosta terrestre e próxima a superfície, e está normalmente atrelada a fins econômicos (Durrant et al., 2006).

Utilizar esse método auxilia na interpretação de áreas em diferentes escalas e para diferentes objetivos. A aquisição dos dados pode ser feita a distância do solo, como é o caso da aerogeofísica e, portanto, é definida como uma forma de sensoriamento remoto (*lato sensu*) (Dentith & Mudge, 2014).

2.2.Aerogeofísica

2.2.1. Magnetometria

O método de levantamento magnetométrico consiste em realizar voos sobre uma determinada área de interesse, em que a aeronave deve estar acoplada a um receptor capaz de medir propriedades físicas emitidas por um alvo/estrutura geológica (isto é, anomalias magnéticas) em contraste com o meio adjacente. A resposta identificada pela magnetometria é causada por variações no magnetismo das rochas, controlada essencialmente pela propriedade física denominada susceptibilidade magnética. Os

resultados processados a partir de dados do aerolevanteamento podem ser interpretados em escalas que variam desde o tamanho de uma província geológica até o de um furo de sondagem individual, a depender da malha área sobrevoada (Dentith & Mudge, 2014).

Diferentes métodos geofísicos são amplamente usados para facilitar a interpretação de mapas aeromagnéticos, com objetivo de compreender uma complexa geologia como também nortear campanhas exploratórias. Para isto, existe uma série de algoritmos de filtragem linear e não linear aplicados sobre os dados aeromagnéticos, que visam aumentar seletivamente as anomalias devidas a um grupo de fontes geológicas. As técnicas de aprimoramento matemático são representadas visualmente por *grids*, que somados ao conhecimento geológico, podem ser melhor interpretadas pois aumenta a borda das anomalias magnéticas na exploração mineral (Milligan & Gunn, 1997; Neawsuparp et al., 2005).

A borda das anomalias geofísicas magnéticas é capaz de exibir o limite das rochas hospedeiras desejadas (rochas metavulcânicas, intermediárias a félsicas) e contatos com diferentes propriedades magnéticas, e também estruturas como falhas e descontinuidades que fornecem caminhos permeáveis para transporte e localização de fluido hidrotermal aurífero (Grant, 1985; Jessell et al., 1993; Bierlein et al., 2006; Groves et al., 2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados geofísicos apresentados nesta dissertação de Mestrado são oriundos do Projeto Aerogeofísico Gurupi, fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e executado pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A. O levantamento foi realizado no período de 22/10/2008 a 04/11/2009 e abrange a porção sudoeste do Estado do Pará e a parte noroeste do Estado do Maranhão e cobre uma área de 76.754,18 km² de perfis aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de alta resolução, com linhas de vôo e controle espaçadas em 500 m e 10 km, orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente.

O mapa de associações tectônicas e recursos minerais desenvolvido por (Klein et al., (2017) na escala de 1:150.000, a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Vasconcelos et al., 2004) e o mapa geológico de detalhe desenvolvido pela empresa OZ Minerals serão usados para a interpretação dos dados magnéticos. Demais informações foram adquiridas a partir do banco de dados GEO/SBG-CPRM que disponibiliza relatórios técnicos e dados SIG dos projetos efetuados sobre a região. Os mapas são apresentados na mesma projeção, Datum (WGS84), e mesma zona, 22S.

3.1. Aeromagnetometria

O processamento dos dados aerogeofísicos se iniciou com a geração de dados magnetométricos a partir do arquivo original XYZ, o qual foi importado para o *software* da Bentley, gerido pela SeequentTM, o GEOSOFT Oasis Montaj 2022.1. O interpolador bidirecional foi escolhido para a produção das malhas de magnetometria, pois resultou no maior detalhamento das anomalias magnéticas para dados levantados em linhas paralelas. Inicialmente foi processado a anomalia magnética da área total do projeto (fig. 2).

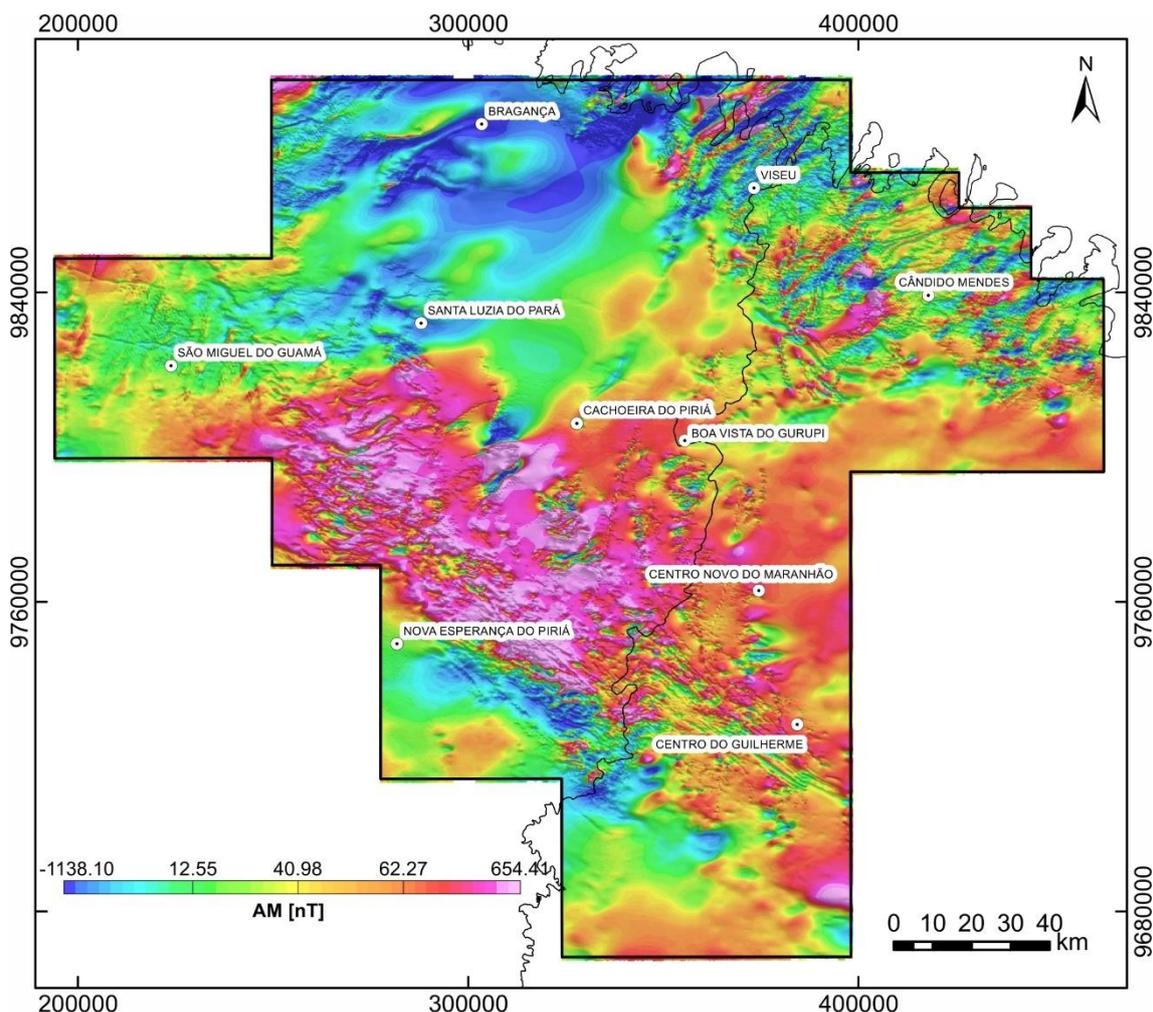


Figura 2. Fluxograma de processamento dos dados aeromagnéticos. 1DV – Primeira Derivada Vertical; TILT – Derivada TILT; ASA – Sinal Analítico; GHT - Gradiente Horizontal Total.

3.2. Matched Filtering

O *matched filter* é um filtro elaborado para separar a resposta geofísica no domínio da frequência em bandas espectrais (fig. 3). O filtro utiliza a informação da camada equivalente aplicado a partir de filtros passa banda. Esses filtros separam os dados em bandas de comprimento de onda distintas onde as anomalias de baixa frequência são

relacionadas a fontes mais profundas e as anomalias de alta frequência relacionadas às fontes mais rasas ou até mesmo zona de ruído (Spector & Parker, 1979; Phillips, 2001).

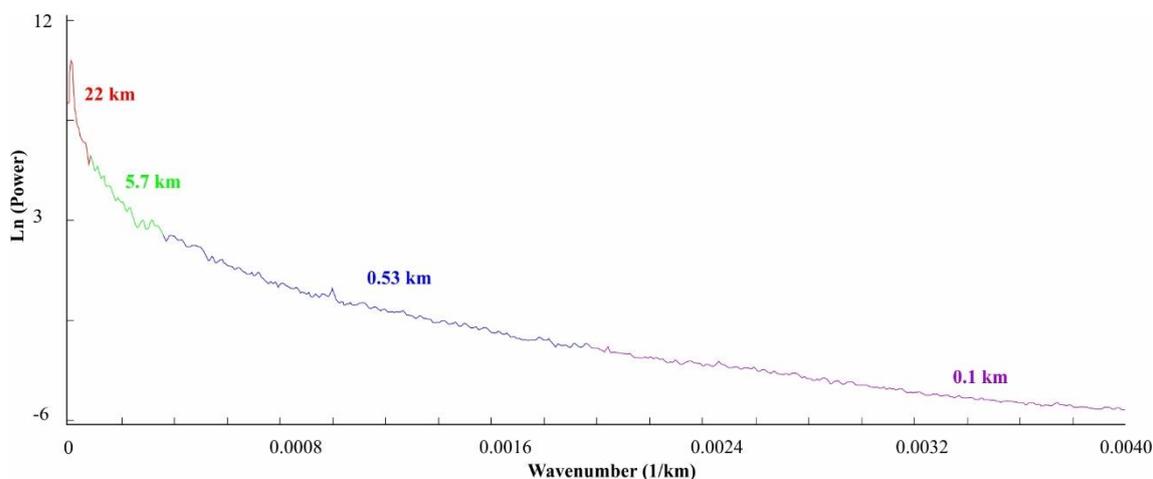


Figura 3. Espectro de potência produzido a partir do *matched filtering*

3.3. Gradiente Horizontal Total

O Gradiente Horizontal Total (GHT) foi usado na detecção de borda de fontes magnéticas na maior profundidade encontrada para a área, após a aplicação do *matched filtering*. O filtro aplicado mostrou-se eficaz na visualização de domínios magnéticos na maior profundidade encontrada para a área. A metodologia empregada no GHT baseia-se na combinação do ângulo de inclinação do gradiente horizontal total, a partir da normalização das derivadas das componentes X e Y no campo magnético (Nabighian, 1972; 1974; Cooper & Cowan, 2006; Ferreira et al., 2011; 2013). Dessa forma, os domínios magnéticos e feições como direções preferencias e a geometria das fontes magnéticas foram delimitadas de maneira efetiva com este filtro em comparação com outros métodos tradicionais, tais como a derivada tilt (Miller & Singh, 1994) ou apenas com a anomalia magnética.

3.4. Primeira Derivada Vertical

A primeira derivada vertical realça a borda de corpos dado por variações de propriedades magnéticas. Além disso, também realça as altas frequências, mas diferencia-se das derivadas horizontais por realçar o corpo como um todo e não apenas as bordas (Milligan & Gunn, 1997).

3.5. Derivada tilt

A derivada tilt foi usada por (Miller & Singh, 1994) no qual utiliza o arco-tangente da razão entre a derivada vertical e a amplitude do gradiente horizontal total, que é expressa pela seguinte equação 1:

$$TILT = \arctan \left(\frac{\frac{\partial m}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2}} \right) \text{ Eq. 1}$$

Os valores deste produto se limitam a $+90^\circ$ e -90° radianos e tem a propriedade de equalizar a amplitude das anomalias independentemente da profundidade da mesma.

3.6. Deconvolução de Euler

Diferente do *matched filter*, a profundidade das fontes magnéticas estimada pela deconvolução de Euler é quantitativa. A interpretação dos dados potenciais é feita de forma rápida ao considerar os seus gradientes e um determinado número inteiro, o índice estrutural (SI). O índice é dependente da natureza da fonte geológica (Eq. 2). As restrições geológicas são aplicadas e realçadas a partir do uso do índice estrutural correto e a técnica pode localizar e delinear zonas de cisalhamento (Reid et al., 2014, 1990).

$$(x - x_0) \frac{\partial h}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial h}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial h}{\partial z} = \eta(b - h) \text{ Eq. 2}$$

onde (x_0) , (y_0) e (z_0) são as posições da fonte; x , y e z as posições dos pontos observados, $h = h(x,y,z)$ é a anomalia do campo total e $\partial h/\partial x$, $\partial h/\partial y$ e $\partial h/\partial z$ seus gradientes em relação às variáveis x , y e z . η é um número inteiro (índice estrutural - SI), que depende do tipo da fonte e b é um nível base ou background de dados.

Para que os resultados estejam geologicamente satisfatórios, o índice estrutural (SI=1) foi usado para atender à geologia e fonte geofísica esperada para contatos retilíneos e com mergulhos acentuados, grandes falhas e diques (Reid et al., 2014).

3.7. Deconvolução localizada de Euler a partir do sinal analítico

A deconvolução localizada de Euler utiliza o sinal analítico da anomalia magnética. Essa técnica realça estruturas geométricas relativas às respostas magnéticas e estima com maior precisão as estruturas e contatos indicados pelos picos do sinal analítico. Assim, a resposta de profundidade é destacada em regiões de interesse (Keating

& Pilkington, 2004; Florio et al., 2006; Zhang et al., 2011). Essa técnica estimou a profundidade dos principais corredores estruturais da área com base nos picos de maior anomalia magnética (0.0390 – 2.2231 nT/m).

3.8. Gamaespectrometria e SRTM

Os dados aerogamaespectrométricos foram montados em um banco de dados novo no GEOSOFT Oasis Montaj 2022.1 e posteriormente processados. O procedimento adotado se deu a partir da interpolação dos canais de Potássio (K%), Urânio (eU) e Tório (eTh). As malhas desses canais foram combinadas e resultou em um mapa ternário RGB dos três radioelementos fundamentais para a interpretação (K (%), eU (ppm) e eTh (ppm)).

Os dados ALOS PALSAR possuem 12.5 m de resolução espacial e foram adquiridos no EARTHDATA SEARCH da NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) e processados no software ArcGis 10.8. O processamento se deu com o sombreado em diferentes direções para extração de lineamentos para análise das estruturas em superfície e posteriormente sobrepostas ao modelo digital de elevação - MDT.

O MDT foi combinado com o mapa RGB para identificar unidades geomorfológicas em escala regional e em subáreas, ambos com a sobreposição de lineamentos magnéticos.

3.9. Dados isotópicos

A partir de uma revisão da literatura, foram coletadas idades U-Pb, Pb-Pb e Sm-Nd sobre o Cráton São Luís e Cinturão Gurupi (Sato, 1998; Palheta, 2001; Klein & Moura, 2001, 2003; Palheta et al., 2009; Klein et al., 2002, 2005a, 2005b, 2012, 2020). As datações foram feitas por diferentes métodos analíticos e georreferenciadas com o uso do software ArcGIS10.8 para que pudessem ser utilizadas como fonte de dados para o presente trabalho.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

O Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi estão localizadas no norte do Brasil, e representam uma janela erosiva Pré Cambriana que aflora em direção à costa do Atlântico (Fig. 4). Os domínios apresentam uma história singular, onde evidências geológicas, geocronológicas e isotópicas, além de reconstruções paleogeográficas, são consistentes em posicionar esses terrenos como contíguos ao Cráton Oeste Africano, dentro de um período prolongado e consistente durante o paleoproterozóico (Klein & Moura, 2001, 2008).

A distinção do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi foi inicialmente reconhecida por estudos geocronológicos baseados nos métodos Rb-Sr e K-Ar (Hurley et al., 1967, 1968; Almeida et al., 1968, 1981; Cordani et al., 1968; Almaraz & Cordani, 1969). Anomalias gravimétricas positivas foram usadas como critério na delimitação da fronteira entre o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi, além de terem sido correlacionadas com feições gravimétricas relacionadas à faixas orogênicas adjacentes ao Cráton Oeste Africano (Lesquer et al., 1984). Atualmente, a Zona de Cisalhamento Tentugal (Hasui et al., 1984) é a principal feição tectônica de idade Neoproterozóica, que delimita o Cinturão Gurupi do Cráton São Luís (Klein et al., 2005a) e tem cinemática sinistral. A Zona de Cisalhamento Tentugal não afetou o Cráton São Luís, no entanto é interpretado como o evento responsável pela configuração atual do Cinturão Gurupi, com amplo retrabalhamento das rochas mais antigas paleoproterozóicas nele inserido.

Uchoa et al., (2020) imageou em um modelo 2D, a partir do método magnetotelúrico, características tectônicas do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi e estabeleceu-se um contato entre eles devido o contraste da resistividade elétrica. Além de caracterizar as unidades que compõem o Cinturão Gurupi com pelo menos 7 km de profundidade.

Durante o processo de ruptura do supercontinente Pangeia, esforços distensivos atuaram no seu interior e estes eventos são registrados em diversas áreas da América do Sul, sobretudo em sistemas de grábens do Gurupi, isto é, sobre as bacias Pará-Maranhão e Barreirinhas (Soares Júnior et al., 2008). A tectônica dominante nestas áreas é relacionada ao Cretáceo que antecedeu a abertura do Oceano Atlântico (Rezende e Pamplona 1970). Atualmente, o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi são parcialmente cobertos por uma espessa camada sedimentar Fanerozóica com mais de 6 km de espessura

(Almeida et al., 1981; Klein & Moura, 2003; Silva et al., 2003; Soares Júnior et al., 2008; Klein et al., 2017).

4.1. Cráton São Luís

O Cráton São Luís apresenta rochas com assinatura essencialmente paleoproterozóica, com diferentes períodos de geração de crosta juvenil, numa evolução entre 2240 Ma e 2090 Ma (Klein et al., 2002, 2008; Klein & Moura, 2003, 2008; Palheta et al., 2009).

O Cráton São Luís é composto por uma sequência de rochas metavulcano-sedimentares considerada indivisa e constituída por xistos de naturezas diversas, rochas metavulcânicas ácidas a básicas e subordinados quartzitos e metachert (Klein et al., 2005a). Dois conjuntos de granitóides do paleoproterozóico são também caracterizados: 1) A Suíte Tromai, constituída por rochas mais intermediárias como tonalitos portadores de anfibólio ou biotita, granodiorito a granitos que apresentam biotita em sua composição (Klein et al., 2005a; Klein & Moura, 2008); 2) A Suíte Tracuateua que é o conjunto mais restrito constituída por granitos peraluminosos (Palheta et al., 2009).

Dados recentes de isótopos de Nd e Hf caracterizam o Cráton São Luís com uma história essencialmente juvenil, desenvolvido durante a orogenia Eburniana-Transamazônica na formação do supercontinente Colúmbia (Klein et al., 2012; Grenholm, 2019; Klein et al., 2020; Klein & Rodrigues, 2022). Este cenário orogênico correlaciona-se com o observado em terrenos Eburneano e Birimiano, localizados no Cráton Oeste Africano assim como no Escudo das Guianas (Klein & Rodrigues, 2022).

4.2. Cinturão Gurupi

O Cinturão Gurupi apresenta significado geotectônico controverso, considerada faixa móvel Neoproterozóica por alguns autores (Brito Neves & Cordani, 1991; Costa & Ricci, 1995) ou como um cinturão de cisalhamento colisional paleoproterozóico por outros (Costa & Hasui, 1997), e mais recentemente considerado um rifte abortado invertido em orogenia intracontinental (Klein et al., 2017).

As rochas que constituem o Cinturão Gurupi, incluem uma sequência metavulcano-sedimentar metamorfizada em fácies xisto verde, gnaisses ortoderivados em

fácies anfíbolito localmente migmatizados, intercalados por rochas metassedimentares em fácies anfíbolito (Klein & Moura, 2003; Klein et al., 2005a).

O magmatismo associado é interpretado como fragmentos de arcos continentais do paleoproterozóico e de rochas formadas em um cinturão colisional que permanece como altos do embasamento afetados por uma tectônica do neoproterozóico muito penetrativa. Esses conjuntos litoestratigráficos encontram-se altamente deformados, segundo uma orientação como um todo NW-SE, imposto por uma tectônica compressiva e direcional. As rochas do domínio Gurupi possuem uma história Paleoproterozóica comum com o Cráton São Luís, cuja deformação é atribuída a uma colagem diacrônica (processos acrescionários e colisionais), de arcos magmáticos, limitadas bacias oceânicas e/ou continentes e pequenos cinturões colisionais às margens do Cráton (Klein et al., 2005a, 2020; Le Mignot et al., 2017; Kwayisi et al., 2020).

No período neoproterozóico-cambriano, há o registro de pouca atividade magmática, sendo confirmado até o momento apenas o Granito Ney Peixoto e o Granito Pantoja, provavelmente relacionados ao mesmo evento magmático, além de intrusão alcalina dado pelo nefelina sienito Boca Nova metamorfizado e deformado, com estrutura gnáissica e migmatização restrita (Klein & Moura, 2003; Klein et al., 2017).

4.3. Metalogenia

Do ponto de vista metalogenético, Campos et al. (2017) e Tavares et al. (2018), a partir de dados aeromagnéticos, propuseram um modelo preditivo de mineralização aurífera sobre o Cinturão Gurupi, no qual o ouro teria se alojado no paleoproterozóico em estruturas NW-SE, associado a convergência oblíqua (evento D1) e remobilizado durante a deformação intracontinental (D2) com orientação WNW-ESE. O evento D3, durante o neoproterozóico, registra orientação regional N-S e correlacionada com a Faixa Araguaia, mas não há consenso sobre a remobilização do ouro nesta época.

Os depósitos são do tipo ouro orogênico e estão hospedados em rochas granitóides metavulcano-sedimentares e cálcio alcalinas do paleoproterozóico (2160-2147 Ma), formadas em ambiente de arco durante orogenia Riacciana (Klein, 2014; Klein et al., 2017). Os depósitos estão localizados de maneira concordantes com a Zona de Cisalhamento Tentugal, NW-SE e em estruturas secundárias (Klein, 2014; Campos et al., 2017). O ouro ocorre em veios de quartzo sulfetados com arsenopirita, calcopirita e em rochas hospedeiras alteradas hidrotermalmente (Klein, 2014).

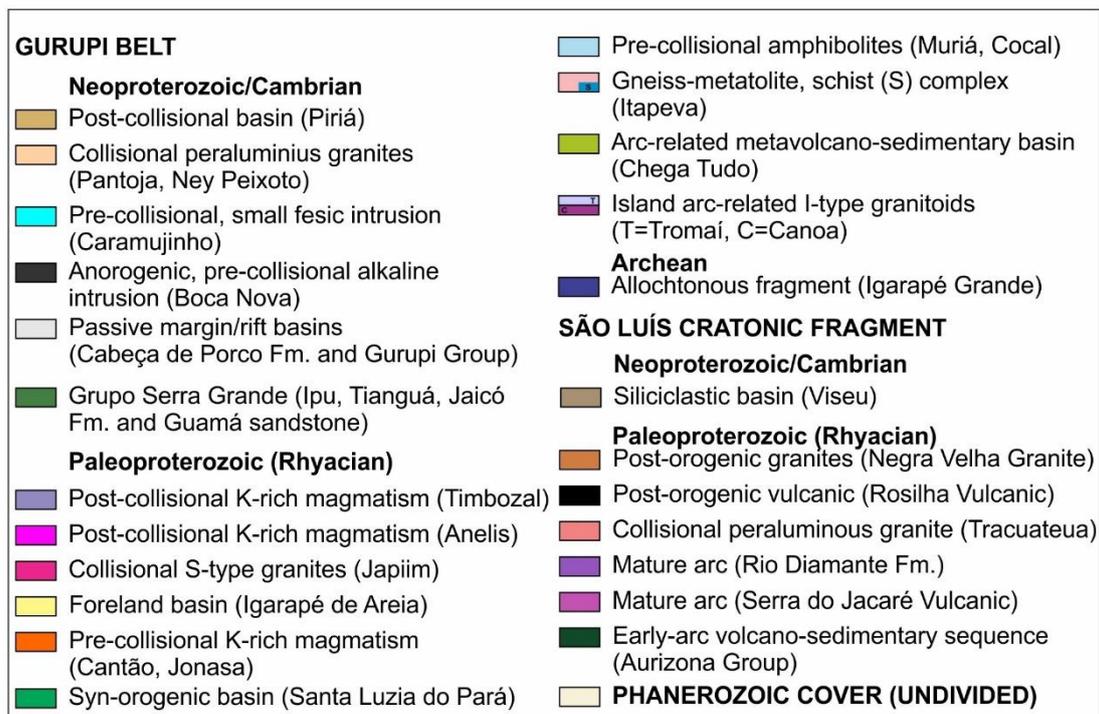
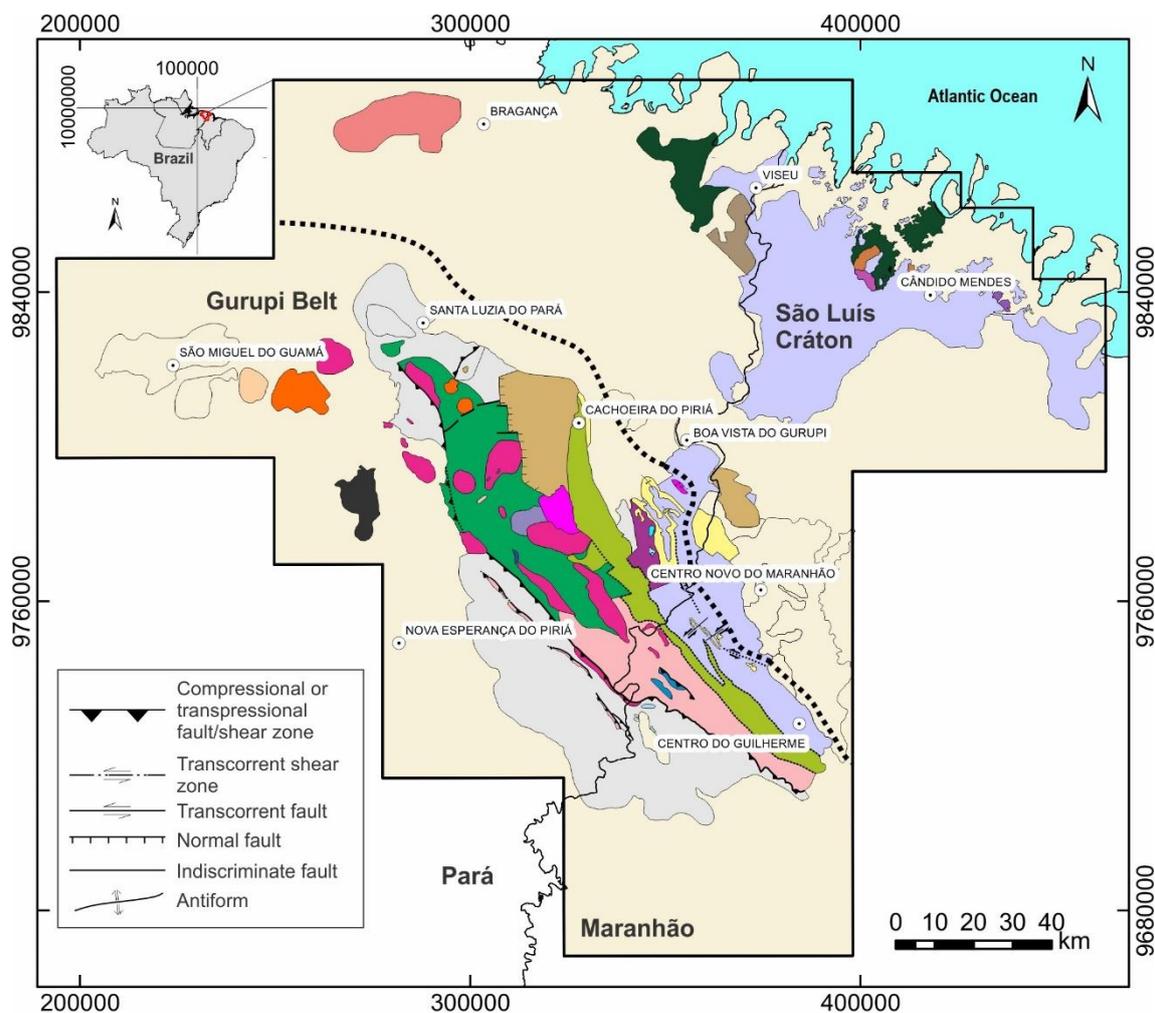


Figura 4. Mapa geológico simplificado do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi (adaptado de Vasconcelos et al., 2004; Palheta et al., 2009; Klein et al., 2008, 2014, 2017, 2020, 2020b)

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almaraz, J. S. U., & Cordani, U. G., 1969, Delimitação entre as Províncias Geocronológicas Pré-Cambrianas ao longo do Rio Gurupi [abs.]: in XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador (Boletim Especial, 1).
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Sci. Rev.* 17, 1–29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Almeida, F. F. M.; Melcher, G. C.; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Vandoros, P. (1968) Radiometric age determinations from northern Brazil: *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 17, p. 3-14.
- Bierlein, F.P., Murphy, F.C., Weinberg, R.F., Lees, T., 2006. Distribution of orogenic gold deposits in relation to fault zones and gravity gradients: Targeting tools applied to the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. *Miner. Depos.* 41, 107–126. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0044-4>
- Booyesen, R., Gloaguen, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., Nex, P.A.M., 2021. Geological Remote Sensing, 2nd ed, *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12127-x>
- Brito Neves, B.B., Cordani, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Res.* 53, 23–40. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90004-T](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90004-T)
- Campos, L.D., de Souza, S.M., de Sordi, D.A., Tavares, F.M., Klein, E.L., Lopes, E.C. dos S., 2017. Predictive Mapping of Prospectivity in the Gurupi Orogenic Gold Belt, North–Northeast Brazil: An Example of District-Scale Mineral System Approach to Exploration Targeting. *Nat. Resour. Res.* 26, 509–534. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9320-5>
- Cooper, G.R.J., Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Comput. Geosci.* 32, 1585–1591. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.016>
- Cordani, U.G., Melcher, G.C., Almeida, F.F.M., 1968. Outline of the Precambrian geochronology of South America. *Canadian Journal of Earth Sciences* 5, 629-632.
- Costa, J. B. S.; Hasui, Y. (1997) Evolução geológica da Amazônia. In: Costa, M. L.; Angélica, R. S. (coords.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, SBG-NO. v.1, p. 15-90
- Costa, J. L.; Ricci, P. S. F. (1995) A Faixa de cisalhamento Gurupi e o cenário colisional do Cráton São Luís. In: *Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos*, 5., Gramado, 1995. *Boletim de Resumos Expandidos*. Gramado, SBG-RS, p. 18-20.
- Dentith, M., Mudge, S., 2014. Geophysics for the mineral exploration geoscientist, *AusIMM Bulletin*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139024358>

- Diallo, M., Baratoux, L., Dufr chou, G., Jessell, M.W., Vanderhaeghe, O., Ly, S., Baratoux, D., 2020. Structure of the Paleoproterozoic K dougou-Kéniéba Inlier (Senegal-Mali) deduced from gravity and aeromagnetic data. *J. African Earth Sci.* 162. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103732>
- Durrant, D., Moy, T., Hutton, P., Dussy, S., 2006. Development of a mems rate sensor, European Space Agency, (Special Publication) ESA SP.
- F.S.Grant, 1985. And Metamorphic Rocks : An Overview Aeromagnetic (AM) surveying continues to be the most widely used geo- physical method in the search for metallic minerals , a rank which it has held since the earliest surveys began shortly after World War II . *Accord. Geoexploration* 23, 303–333.
- Ferreira, F.J.F., De Castro, L.G., Bongioiolo, A.B.S., De Souza, J., Romeiro, M.A.T., 2011. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using tilt derivatives: Part II - Application to real data. *Soc. Explor. Geophys. Int. Expo. 81st Annu. Meet. 2011, SEG 2011* 887–891.
- Ferreira, F.J.F., de Souza, J., Bongioiolo, A. de B. e. S., de Castro, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78, J33–J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Florio, G., Fedi, M., Pasteka, R., 2006. On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics* 71, 87–93. <https://doi.org/10.1190/1.2360204>
- Grenholm, M., 2019. Earth-Science Reviews The global tectonic context of the ca . 2 . 27-1 . 96 Ga Birimian Orogen – Insights from comparative studies , with implications for supercontinent cycles Kedougou-Kéniéba K n ma-Man domain Baoulé Mossi domain. *Earth-Science Rev.* 193, 260–298.
- Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geosci. Front.* 9, 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>
- Groves, D.I., Santosh, M., Zhang, L., 2020. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach. *Geosci. Front.* 11, 719–738. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.007>
- Hasui, Y.; Abreu, F. A. M.; Villas, R. N. N. (1984) Província Parnaíba. In: Almeida, F. F. M.; Hasui, Y. (coords.) *O Pr -Cambriano no Brasil*. São Paulo, Edgard Bl cher, p. 36-45.
- Holden, E.J., Wong, J.C., Kovesi, P., Wedge, D., Dentith, M., Bagas, L., 2012. Identifying structural complexity in aeromagnetic data: An image analysis approach to greenfields gold exploration. *Ore Geol. Rev.* 46, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.11.002>
- Hurley, P. M.; Melcher, G. C.; Pinson, W. H.; Fairbairn, H. W. (1968) Some orogenic episodes in South America by K-Ar and whole-rock Rb-Sr dating. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 5, p. 633-638.
- Hurley, P.M., Rand, J.R., Pinson, W.H., Fairbairn, H.W., de Almeida, F.F.M., Melcher,

- G.C., Cordani, U.G., Kawashita, K., Vandomos, P., 1967. Test of Continental Drift by Comparison of Radiometric Ages: A pre-drift reconstruction shows matching geologic age provinces in West Africa and Northern Brazil. *Science* (80-). 157, 495–500. <https://doi.org/10.1126/science.157.3788.495>
- Jessell, M.W., Amponsah, P.O., Baratoux, L., Asiedu, D.K., Loh, G.K., Ganne, J., 2012. Crustal-scale transcurrent shearing in the Paleoproterozoic Sefwi-Sunyani-Comoe region, West Africa. *Precambrian Res.* 212–213, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.015>
- Jessell, M.W., Valenta, R.K., Jung, G., Cull, J.P., Geiro, A., 1993. Structural Geophysics. *Explor. Geophys.* 24, 599–602. <https://doi.org/10.1071/EG993599>
- Keating, P., Pilkington, M., 2004. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophys. Prospect.* 52, 165–182. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00408.x>
- Klein, E.L., 2014. Ore fluids of orogenic gold deposits of the Gurupi Belt, Brazil: a review of the physico-chemical properties, sources, and mechanisms of Au transport and deposition. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 402, 121–145. <https://doi.org/10.1144/SP402.2>
- Klein, E.L., Koppe, J.C., Moura, C.A.V., 2002. Geology and geochemistry of the Caxias gold deposit, and geochronology of the gold-hosting Caxias Microtonalite, São Luís Craton, northern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 14, 837–849. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00075-X)
- Klein, E.L., Larizzatti, J.H., Marinho, P.A. da C., Rosa-Costa, L.T. da, Luzardo, R., Faraco, M.T.L., 2008. Levantamentos Geológicos Básicos - Geologia e Recursos Minerais da Folha Cândido Mendes - SA.23-V-D-II, Estado do Maranhão Escala 1:100.000, Programa Geologia do Brasil - PGB. Integração e Difusão de Dados da Geologia do Brasil. Belém.
- Klein, E.L., Lopes, E.C. dos S., Tavares, F.M., Campos, L.D., Souza-Gaia, S.M. de, Neves, M.P., Perrotta, M.M., 2017. Área de relevante interesse mineral: cinturão do Gurupi.
- Klein, Evandro Luiz, Lopes, E.C.S., Rodrigues, J.B., Souza-Gaia, S.M., Cordani, U.G., 2020. Rhyacian and Neoproterozoic magmatic associations of the Gurupi Belt, Brazil: Implications for the tectonic evolution, and regional correlations. *Geosci. Front.* 11, 2243–2269. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.016>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., 2008. São Luís Craton and Gurupi belt (Brazil): Possible links with the West African Craton and surrounding Pan-African belts. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 294, 137–151. <https://doi.org/10.1144/SP294.8>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., 2003. Síntese Geológica e Geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na Região do Rio Gurupi (NE-Pará / NW-Maranhão). *Geol. USP - Ser. Cient.* 3, 97–112. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2003000100008>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., Krymsky, R.S., Griffin, W.L., 2005a. The Gurupi Belt,

- northern Brazil: Lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. *Precambrian Res.* 141, 83–105. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.08.003>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., Pinheiro, B.L.S., 2005b. Paleoproterozoic crustal evolution of the São Luís Craton, Brazil: Evidence from zircon geochronology and Sm-Nd isotopes. *Gondwana Res.* 8, 177–186. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71116-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71116-3)
- Klein, E.L., Rodrigues, J.B., 2022. Lu–Hf constraints on pre-, syn, and post-collision associations of the Gurupi Belt, Brazil: Insights on the Rhyacian crustal evolution. *Geosci. Front.* 13, 101199. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101199>
- Klein, E.L., Rodrigues, J.B., 2021. Lu-Hf constraints on pre-, syn, and post-collision associations of the Gurupi Belt, Brazil: insights on the Rhyacian crustal evolution. *Geosci. Front.* 101199. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101199>
- Klein, Evandro L., Rodrigues, J.B., Lopes, E.C.S., Gusmão de Oliveira, R., Souza-Gaia, S.M., Oliveira, L.B.T. de, 2020. Age, provenance and tectonic setting of metasedimentary sequences of the Gurupi Belt and São Luís cratonic fragment, northern Brazil: Broadening the understanding of the Proterozoic-Early Cambrian tectonic evolution. *Precambrian Res.* 351. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105950>
- Klein, E.L., Rodrigues, J.B., Lopes, E.C.S., Soledade, G.L., 2012. Diversity of Rhyacian granitoids in the basement of the Neoproterozoic-Early Cambrian Gurupi Belt, northern Brazil: Geochemistry, U-Pb zircon geochronology, and Nd isotope constraints on the Paleoproterozoic magmatic and crustal evolution. *Precambrian Res.* 220–221, 192–216. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.007>
- Klein, E.L., Tassinari, C.C.G., Vasconcelos, P.M., 2014. U-Pb SHRIMP and ⁴⁰Ar/³⁹Ar constraints on the timing of mineralization in the Paleoproterozoic Caxias orogenic gold deposit, São Luís cratonic fragment, Brazil. *Brazilian J. Geol.* 44, 277–288. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020008>
- Klein, E.L., Veloso Moura, C.A., 2001. Age constraints on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís craton and Gurupi belt, Northern Brazil: Implications for lithostratigraphy and geological evolution. *Int. Geol. Rev.* 43, 237–253. <https://doi.org/10.1080/00206810109465011>
- Kwayisi, D., Lehmann, J., Elburg, M., 2020. The architecture of the Buem Structural Unit: Implications for the tectonic evolution of the Pan-African Dahomeyide Orogen, West Africa. *Precambrian Res.* 338. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105568>
- Le Mignot, E., Reisberg, L., André-Mayer, A.S., Bourassa, Y., Fontaine, A., Miller, J., 2017. Re-Os geochronological evidence for multiple Paleoproterozoic gold events at the scale of the West African craton. *Econ. Geol.* 112, 145–168. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.1.145>
- Lesquer, A., Beltrao, J.F., De Abreu, F.A.M., 1984. Proterozoic links between Northeastern Brazil and West Africa: A plate tectonic model based on gravity data. *Tectonophysics* 110. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90055-6)

- McFarlane, H.B., Ailleres, L., Betts, P., Ganne, J., Baratoux, L., Jessell, M.W., Block, S., 2019. Episodic collisional orogenesis and lower crust exhumation during the Palaeoproterozoic Eburnean Orogeny: Evidence from the Sefwi Greenstone Belt, West African Craton. *Precambrian Res.* 325, 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.02.012>
- Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W., 2011. A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, Burkina Faso, West Africa. *Precambrian Res.* 190, 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.002>
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *J. Appl. Geophys.* 32, 213–217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
- Milligan, P.R., Gunn, P.J., 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 63–75.
- Nabighian, M.N., 1974. Additional Comments On The Analytic Signal Of Two-Dimensional Magnetic Bodies With Polygonal Cross-Section. *Geophysics* 39, 85–92. <https://doi.org/10.1190/1.1440416>
- Nabighian, M.N., 1972. The Analytic Signal Of Two-Dimensional Magnetic Bodies With Polygonal Cross-Section: Its Properties And Use For Automated Anomaly Interpretation. *Geophysics* 37, 507–517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Neawsuparp, K., Charusiri, P., Meyers, J., 2005. New Processing of Airborne Magnetic and Electromagnetic Data and Interpretation for Subsurface Structures in the Loei Area, Northeastern Thailand. *ScienceAsia* 31, 283. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2005.31.283>
- Palheta, E.S. de M., 2001. *Evolução Geológica da Região Nordeste do Estado do Pará com Base em Estudos Estruturais e Isotópicos de Granitóides*. Universidade Federal do Pará.
- Palheta, E.S. de M., Abreu, F. de A.M. de, Moura, C.A.V., 2009. Granitóides proterozóicos como marcadores da evolução geotectônica da região nordeste do Pará, Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 39, 647–657. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009394647657>
- Phillips, J.D., 2001. Tools and Techniques for the Application of High-Resolution Aeromagnetic Surveys to Engineering Problems, in: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2001*. Environment and Engineering Geophysical Society, pp. AIR4–AIR4. <https://doi.org/10.4133/1.2922846>
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *GEOPHYSICS* 55, 80–91. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.023>
- Reid, A.B., Ebbing, J., Webb, S.J., 2014. Avoidable Euler Errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophys. Prospect.* 62, 1162–1168.

<https://doi.org/10.1111/1365-2478.12119>

- Rezende, O.M. & Pamplona, H. R. P. 1970. Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano Santos. *Boletim Técnico da Petrobras*, 13, 5–14. ROGERS, J
- Sato, K., 1998. Evolução Crustal da Plataforma Sul Americana, com base na geoquímica isotópica Sm-Nd.
- Schowengerdt, R.A., 2007. The Nature of Remote Sensing, in: *Remote Sensing*. pp. 1–X. <https://doi.org/10.1016/b978-012369407-2/50004-8>
- Silva, A.J.P. da, Lopes, R. da C., Vasconcelos, A.M., Bahia, R.B.C., 2003. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. *Geol. Tectônica e Recur. Minerais do Bras.* 581, 55–85.
- Soares Júnior, A.V., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 2008. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: Três fases distensivas. *Geociencias* 27, 427–437.
- Spector, A., Parker, W., 1979. Computer compilation and interpretation of geophysical data. In: Hood, P.J. (Ed.), *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores: Geological Survey of Canada, Economic Geology Report Vol. 31*, 527–544.
- Tavares, F.M., Klein, E. I., Souza-Gaia, S.M., Lopes, E.C.S., 2018. Evolução tectônica polifásica do cinturão gurupi, in: *Anais Do 49º Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Rio de Janeiro*, p. 1085.
- Uchoa, E.B., Vieira Silva, N.C., Magini, C., Gomes Castelo Branco, R.M., Fuck, R.A., Mota da Silva, F., Martins, J.A., Maia e Silva, C.R., 2020. Magnetotelluric transect across the São Luís cratonic fragment, the Gurupi belt and the Parnaíba basin, N-NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 104. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102888>
- Vasconcelos, A.M., Veiga Júnior, J., J., Colares, J.Q.S., Ribeiro, J.A.P., Gomes, I.P., Medeiros, M.F., Forgiarini, I.I., 2004. Folha SA.23-São Luís. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Leão Neto, R., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M., Ramos, M.A.B., Jesus, J.D.A de. (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Pr.
- Zhang, J.-S., Gao, R., Li, Q.-S., Guan, Y., Peng, C., Wang, H.-Y., 2011. A combined Euler and analytic signal method for an inversion calculation of potential data. *Chinese J. Geophys.* 54, 1634–1641.

**TECTONIC MAGNETIC FABRIC INSIDE AND OUTSIDE A CRATON:
INSIGHTS FROM AEROMAGNETIC DATA OF THE GURUPI BELT, BRAZIL****RESUMO**

As fronteiras entre Cráton e Faixa Móvel consistem em regiões geologicamente ativas e registram, após sua história evolutiva, uma complexa superposição de eventos deformacionais. O Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi, localizados no norte do Brasil, são exemplos de terrenos Pré-Cambrianos que apresentam evidências de uma complexa história deformacional derivada das orogenias Paleoproterozóica, Neoproterozóica e posterior fragmentação do Cráton Oeste Africano com a abertura do Oceano Atlântico. No entanto, a compreensão dos estilos deformacionais do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi permanece pouco compreendida. Nesse contexto, este estudo faz uma abordagem multidisciplinar que integra dados aerogeofísicos de alta resolução à dados geológicos existentes para investigar as deformações e mecanismos atuantes na evolução do Cráton São Luís do Cinturão Gurupi. O processamento dos dados aeromagnéticos resultou em diferentes profundidades para a região: 22 km, 5.7 km e 0.53 km. Para a maior profundidade, quatro domínios geofísicos foram definidos, no qual a fronteira entre o Cráton São Luís e a Faixa é dado pelo lineamento WSZ de direção NW-SE, enquanto no Cráton São Luís três domínios com direções E-W a NE-SW foram encontrados. Nas profundidades mais rasas da área estudada, os lineamentos magnéticos definiram padrões deformacionais dúcteis. Sobre o Cráton São Luís os lineamentos magnéticos variam de E-W a NE-SW e são interpretados como evento deformacional D1. Sobre o Cinturão Gurupi, os padrões deformacionais são sigmoidais com cinemática sinistral, associados a zonas de cisalhamento Tentugal com direção NW-SE, e são interpretados como evento deformacional D2. O terceiro evento deformacional com direção N-S e E-W foi associado ao terceiro evento D3 com regime rúptil-dúctil. A partir do modelo digital de elevação e do sinal analítico, os lineamentos de superfície revelam um par conjugado de falhas na direção NE-SW e NW-SE e, a partir das soluções de Euler, as profundidades demonstram ser inferiores a 500 m. Adicionalmente, ocorrências e depósitos auríferos localizados no Cinturão Gurupi estão distribuídos espacialmente na direção NW-SE de caráter dúctil e em direções secundárias N-S de caráter rúptil. Por fim, após análise cinemática da região e sua correlação com outras partes do mundo, sugere-se que esta região deve ser inserida

dentro do modelo de ciclo de supercontinentes, do paleoproterozóico e Neoproterozoico, em escala global.

Palavras-chave: Faixa orogênica, Cinturão Gurupi, Cráton São Luís, magnetometria, padrão deformacional.

ABSTRACT

The boundaries between Craton and Mobile Belt consist of geologically active regions and record, after their evolutionary history, a complex superposition of deformational events. The São Luís Craton and the Gurupi Belt, located in northern Brazil, are examples of Precambrian terrains that show evidence of a complex deformational history derived from the Paleoproterozoic, Neoproterozoic orogenies and subsequent fragmentation of the West African Craton with the opening of the Atlantic Ocean. However, the understanding of the deformational styles of the São Luís Craton and the Gurupi Belt remains poorly understood. In this context, this study takes a multidisciplinary approach that integrates high resolution aerogeophysical data with existing geological data to investigate the deformations and mechanisms involved in the evolution of the São Luís Craton in the Gurupi Belt. The processing of the aeromagnetic data resulted in different depths for the region: 22 km, 5.7 km and 0.53 km. For the greatest depth, four geophysical domains were defined, in which the boundary between the São Luís Craton and the Belt is given by the WSZ lineament of NW-SE direction, while in the São Luís Craton three domains with E-W to NE-SW directions were found. . In the shallower depths of the studied area, the magnetic lineaments defined ductile deformation patterns. Over the São Luís Craton, the magnetic lineaments vary from E-W to NE-SW and are interpreted as a D1 deformation event. Over the Gurupi Belt, the deformation patterns are sigmoidal with sinistral kinematics, associated with Tentugal shear zones with NW-SE direction, and are interpreted as a D2 deformation event. The third deformational event with N-S and E-W direction was associated with the third event D3 with brittle-ductile regime. From the digital elevation model and the analytical signal, the surface lineaments reveal a conjugated pair of faults in the NE-SW and NW-SE direction and, from the Euler solutions, the depths show to be less than 500 m. Additionally, occurrences and auriferous deposits located in the Gurupi Belt are spatially distributed in the NW-SE direction of ductile character and in secondary directions N-S of brittle character. Finally, after kinematic analysis of the region and its correlation with other parts of the world, it is

suggested that this region should be inserted into the Paleoproterozoic and Neoproterozoic supercontinent cycle model, on a global scale.

Keywords: Orogenic Belt, Gurupi Belt, São Luís Craton, magnetometry, deformation pattern.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de crátons antigos e das faixas orogênicas adjacentes, com estruturação tectônica complexa, pode ser mais bem compreendido quando se aplica uma abordagem multidisciplinar. Nesse sentido, integrar informações de subsuperfície, gerados a partir de produtos aerogeofísicos, à dados geológicos existentes, mesmo em regiões caracterizadas por pouca exposição de afloramentos e extensa cobertura de bacias sedimentares mais jovens, têm sido fundamental para a compreensão geológica estrutural de várias regiões (Metelka et al., 2011; Jessell et al., 2012; Perrouty et al., 2012; McFarlane et al., 2019; Diallo et al., 2020; Almeida et al., 2021; Zhu et al., 2022).

Em geral, o domínio cratônico é comumente caracterizado por anomalias magnéticas de alta frequência e valores magnéticos anômalos isolados, cujas exposições são representadas por terrenos do tipo *greenstone belts*. Também, há diversidade de magmatismo do tipo granito gnaisses, os quais pode mostrar uma assinatura geofísica particular, com a preservação de importantes elementos crustais e estruturais, típicas da evolução geotectônica de núcleos pré-cambrianos antigos (Golynsky, 2007).

Já as faixas orogênicas adjacentes aos domínios cratônicos, são regiões geologicamente ativas do ponto de vista tectônico, caracterizadas por largos cinturões de rochas supracrustais e com lineamentos magnéticos regionais pronunciados que podem ser interpretados como corredores estruturais associados à zonas de cisalhamento (Gabrielse, 1985; Cecile et al., 1997; Bader, 2019).

O limite entre o cráton e a faixa móvel que o bordeja é identificado por distintas respostas espectrais no dado magnético, que traduzem diferentes profundidades de suas fontes geradoras e permitem correlacionar tanto domínios magnéticos profundos quanto feições estruturais rasas (Eldosouky et al., 2020; Fossen et al., 2022; Giri et al., 2022; Zhu et al., 2022).

Faixas orogênicas apresentam feições importantes como ciclos de acreção, retrabalhamento crustal, geração de crosta juvenil, magmatismo e ocorrência e distribuição de depósitos minerais (Holden et al., 2012; Groves et al., 2018).

Levantamentos aerogeofísicos de alta resolução contribuem fortemente na melhor compreensão da história evolutiva destes cinturões orogênicos que podem ser correlacionados com eventos em comum ocorridos durante a geração de supercontinentes (Condie, 2004; Teixeira et al., 2007).

A correlação entre os Cratóns São Luís e do Oeste Africano é conhecida desde Almeida et al. (1981). Contudo, a compreensão dos estilos deformacionais e tectônicos no Cráton São Luís permanece pouco estudado, enquanto no Cráton Oeste Africano, o conhecimento tem sido mais bem entendido ao longo dos anos a partir da integração de dados geofísicos e geológicos (Metelka et al., 2011; McFarlane et al., 2019; Diallo et al., 2020).

O Cráton São Luís, localizado no norte do Brasil, é bordejado pelo Cinturão Gurupi, gerada durante a orogenia Pan-Africana ao final do neoproterozóico (Brito Neves et al., 1999; Almeida et al., 2000; Klein et al., 2005). Este conjunto de rochas é correlacionado a unidades semelhantes que se estendem pelo noroeste da África, formando os cinturões Rocklide e Dahomeyde, na margem norte e sul do Cráton Oeste Africano (Fig. 1a e b). O limite do Cratón São Luís com o Cinturão Gurupi é marcado pela Zona de Cisalhamento Tentugal, com direção NW-SE (Lesquer et al., 1984; Klein et al., 2005; Klein et al., 2005). Em modelos recentes de reconstrução de sucessivos ciclos de supercontinentes em escala global, o Cratón São Luís tem sido estendido até o escudo das Guianas, pela sua semelhança isotópica e de estilos estruturais e principais tensores deformacionais (Jessell et al., 2012; Grenholm et al., 2019; Parra-Avila et al., 2019).

As interpretações feitas nesta pesquisa visam uma melhor compreensão da estruturação em subsuperfície do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi, que conta com uma cobertura sedimentar espessa (Soares Júnior et al., 2008). Neste sentido, dados aeromagnéticos de alta resolução adquiridos sobre a área de estudo serão integrados a dados geológicos existentes com objetivo de investigar a geometria das principais estruturas presentes na região. Por último, ocorrências auríferas georreferenciadas sobre as estruturas magnéticas permite inferir um controle estrutural para as ocorrências bem como para os depósitos auríferos da região (Klein & Moura, 2008; Klein, 2014).

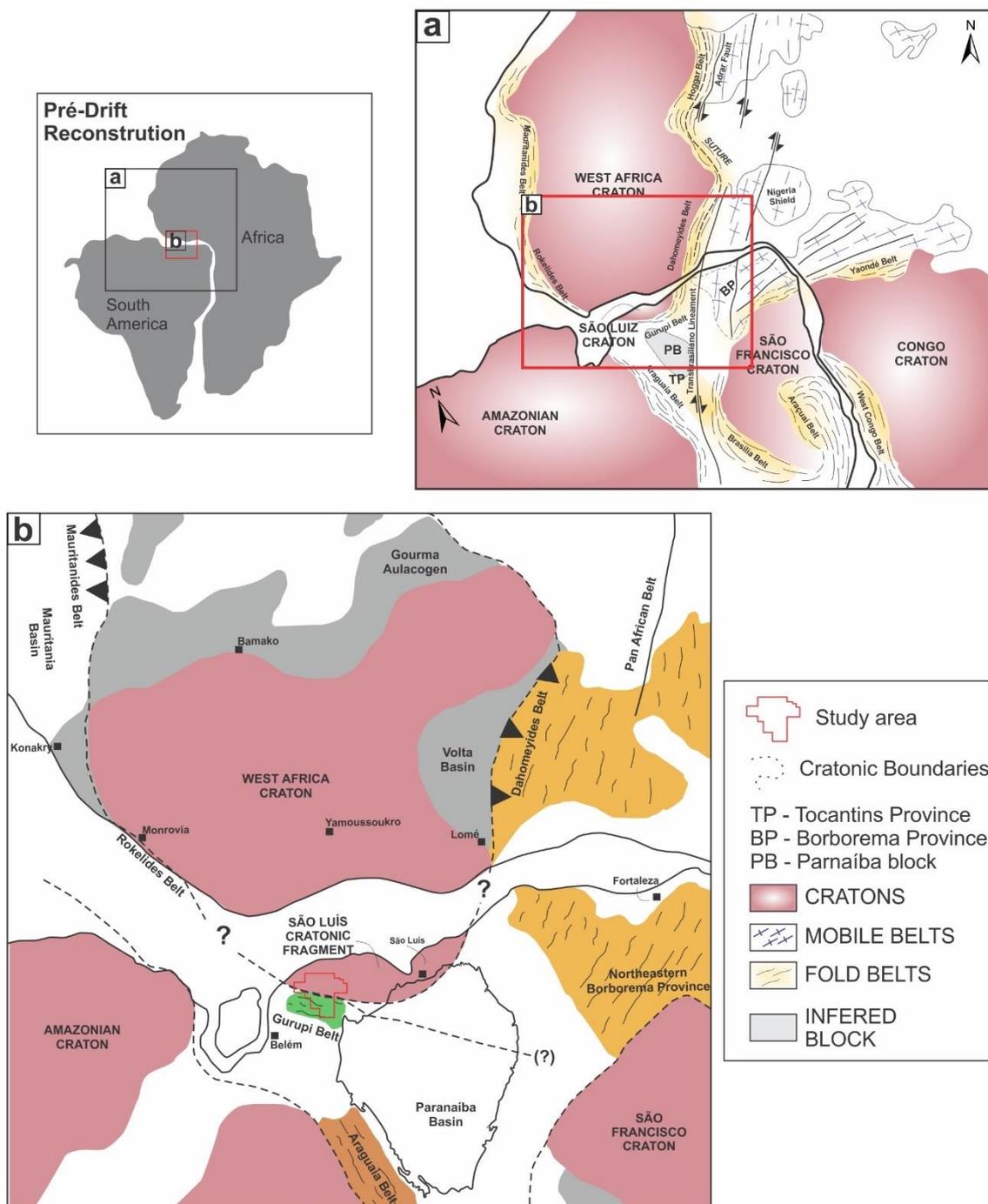


Figura 1. (a) Reconstrução do Cráton São Luís conectado ao Cráton Oeste Africano; e (b) Conexão das faixas móveis entre os Crátos São Luís e Cráton Oeste Africano. Adaptado de Villeneuve & Cornée, (1994) e Uchoa et al., (2020)

2. GEOLOGIA REGIONAL

O Cráton São Luís e sua faixa móvel, Cinturão Gurupi, apresenta uma história singular, onde evidências geológicas, geocronológicas e isotópicas, além de reconstruções paleogeográficas, são consistentes em posicionar esses terrenos como

contíguos ao Cráton Oeste Africano, dentro de período prolongado e consistente durante o paleoproterozóico (Klein & Moura, 2001, 2008) (Figura 2).

As rochas do interior do Cráton São Luís revelaram uma história essencialmente paleoproterozóica, com diferentes períodos de geração de crosta juvenil, numa evolução entre 2240 Ma e 2090 Ma (Klein et al., 2002; Klein & Moura, 2008; Palheta et al., 2009).

O Cráton São Luís, inclui sequências de rochas metavulcano-sedimentares formadas em ambiente de arco e interpretadas como restos de *greenstone belts*, sendo constituída por xistos de naturezas diversas, rochas metavulcânicas ácidas a básicas e subordinados quartzitos e metachert (Klein et al., 2005b). O magmatismo plutônico é representado por duas suites de granitóides paleoproterozóicos, conhecidas como Suíte Tromai, constituída por tonalitos portadores de anfibólio e biotita, granodiorito a granitos (Klein et al., 2005b; Klein & Moura, 2008), e pela Suíte Intrusiva Tracuateua, dominada por granitos peraluminosos (Palheta et al., 2009).

Dados recentes de Nd e Hf caracterizam o Cráton São Luís com uma história essencialmente juvenil desenvolvido durante a orogenia Eburniana-Transamazônica na formação do supercontinente Colúmbia (Klein et al., 2012, 2020; Grenholm et al., 2019; Klein & Rodrigues, 2022). Este cenário orogênico correlaciona-se com o observado em terrenos Eburneano e Birimiano localizados no Cráton Oeste Africano assim como no Escudo das Guianas (Klein & Rodrigues, 2022).

O Cinturão Gurupi apresenta significado geotectônico controverso, considerada faixa móvel neoproterozóica por alguns autores (Brito Neves & Cordani, 1991; Costa & Ricci, 1995) ou cinturão de cisalhamento colisional paleoproterozóico por outros (Costa & Hasui, 1997) e mais recentemente considerado um rifte abortado invertido em orogenia intracontinental (Klein et al., 2017).

Uchoa et al., (2020) imageou em um modelo 2D a partir do método magnetotelúrico, características tectônicas do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi e estabeleceu-se um contato entre eles devido o contraste da resistividade elétrica. Além de caracterizar as unidades que compõem o Cinturão Gurupi com pelo menos 7 km de profundidade.

As rochas que constituem o Cinturão Gurupi, incluem uma sequência metavulcano-sedimentar metamorfizada em fácies xisto verde, rochas gnáissicas ortoderivadas em fácies anfibolito, localmente migmatizadas, e intercaladas por rochas metassedimentares em fácies anfibolito (Klein & Moura, 2003; Klein et al., 2005a; Klein et al., 2005). O magmatismo associado é interpretado como fragmentos de arcos

continentais paleoproterozóicos e de rochas formadas em um cinturão colisional que permanece como altos do embasamento afetados por uma tectônica neoproterozóica muito penetrativa. Esses conjuntos litoestratigráficos encontram-se altamente deformados segundo uma orientação geral NW-SE imposto por uma tectônica compressiva e direcional. As rochas do Cinturão Gurupi possuem uma história paleoproterozóica comum com o Cráton São Luís, cuja deformação é atribuída a uma colagem diacrônica (processos acrescionários e colisionais), de arcos magmáticos, limitadas bacias oceânicas e/ou continentes e pequenos cinturões colisionais às margens do Cráton (Le Mignot et al., 2017; Klein et al., 2005a, 2020, Kwayisi et al., 2020).

A distinção do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi foi inicialmente reconhecida por geocronologia baseado nos métodos Rb-Sr e K-Ar (Hurley et al., 1967, 1968; Almeida et al., 1968; Cordani et al., 1968; Almaraz & Cordani, 1969). Anomalias gravimétricas positivas foram usadas como critério na delimitação da fronteira entre o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi além de terem sido correlacionadas com feições gravimétricas relacionadas à faixas orogenéticas adjacentes ao Cráton Oeste Africano (Lesquer et al., 1984).

Atualmente, a Zona de Cisalhamento Tentugal (Hasui et al., 1984) é a principal feição tectônica, de idade Neoproterozóica, que delimita o Cinturão Gurupi do Cráton São Luís e tem cinemática sinistral (Klein et al., 2005a). Esse regime deformacional neoproterozóico não afetou o Cráton São Luís, no entanto é interpretado como o evento responsável pela configuração atual do Cinturão Gurupi, com amplo retrabalhamento das rochas mais antigas paleoproterozóicas nele inserido.

Do ponto de vista metalogenético, Campos et al., (2017) e Tavares et al., (2018), a partir de dados aeromagnéticos, propuseram um modelo preditivo de mineralização aurífera sobre o Cinturão Gurupi, no qual o ouro teria se alojado no paleoproterozóico em estruturas NW-SE associado a vergência oblíqua (evento D1) e remobilizado durante a deformação intracontinental (D2) com orientação WNW-ESE. O evento D3, durante o neoproterozóico, registra orientação regional N-S e correlacionada com a Faixa Araguaia, mas não há consenso sobre a remobilização do ouro nesta época.

No neoproterozóico-cambriano, há o registro de pouca atividade magmática neste período, sendo confirmado até o momento apenas o Granito Ney Peixoto e o Granito Pantoja, provavelmente relacionados ao mesmo evento magmático, além de intrusão alcalina dado pelo nefelina sienito Boca Nova metamorfizado e deformado, com estrutura gnáissica e migmatização restrita (Klein & Moura, 2003; Klein et al., 2017).

No processo de ruptura do supercontinente Pangeia, esforços distensivos atuaram no seu interior e estes eventos são registrados em diversas áreas da América do Sul, sobretudo em sistemas de grábens do Gurupi, isto é, sobre as bacias Pará-Maranhão e Barreirinhas (Soares Júnior et al., 2008). A tectônica dominante nestas áreas é relacionada ao Cretáceo que antecedeu a abertura do Oceano Atlântico (Rezende e Pamplona 1970). Atualmente, o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi são recobertas em parte por uma espessa camada sedimentar Fanerozóica com mais de 6 km de espessura (Almeida et al., 1981; Klein & Moura, 2003; Soares Júnior et al., 2008; Klein et al., 2017).

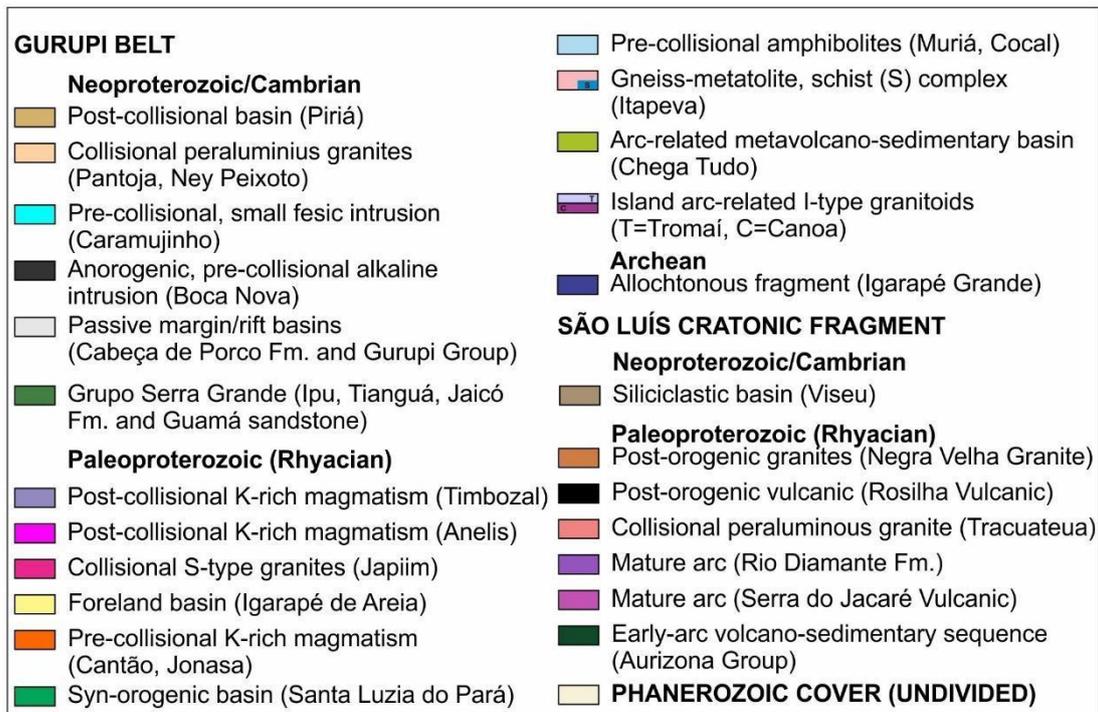
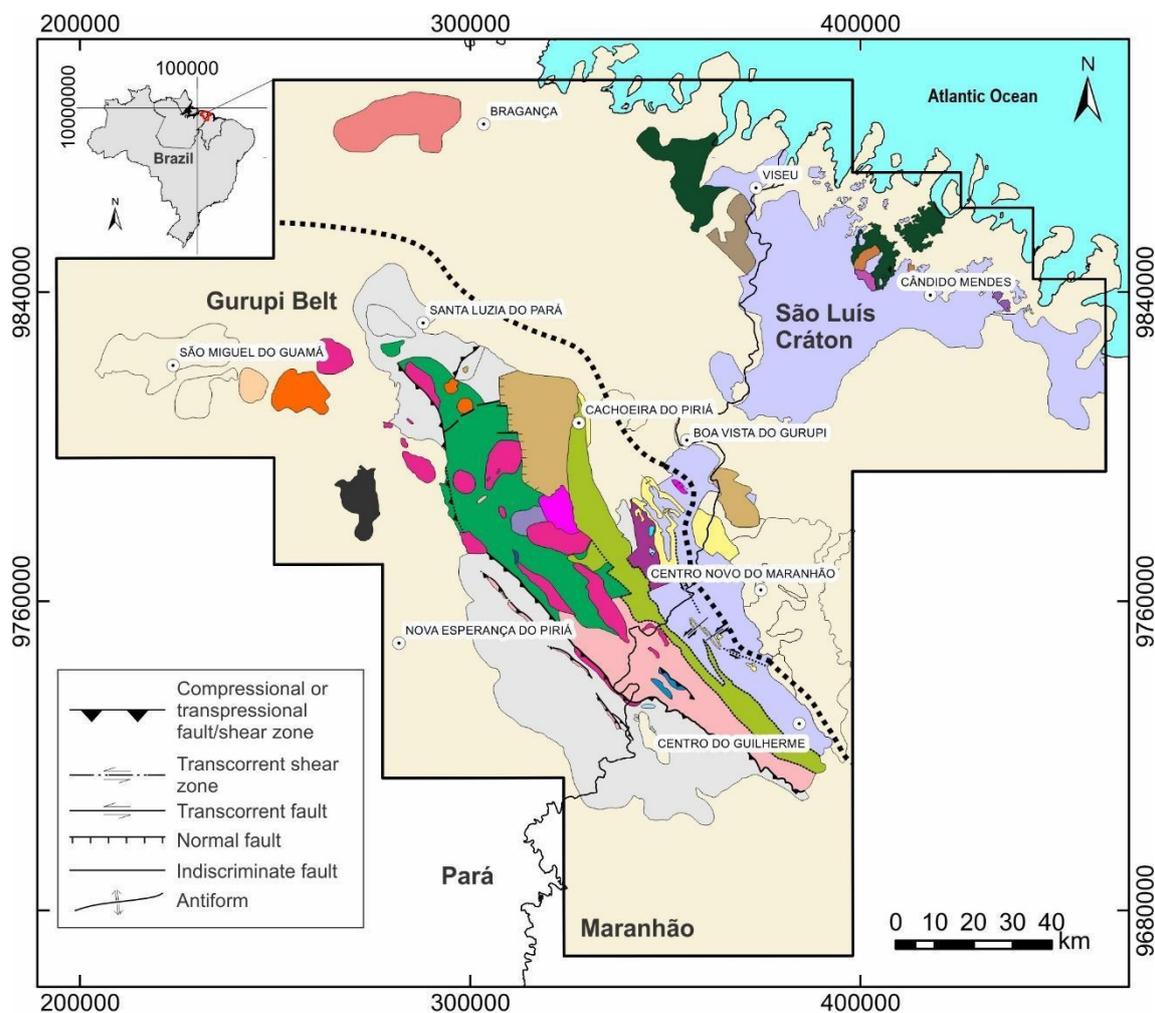


Figura 2. Mapa geológico simplificado Cráton São Luís e Cinturão Gurupi (adaptado Vasconcelos et al., 2004; Palheta et al., 2009; Klein et al., 2008, 2014, 2017, 2020, 2020b)

3. METODOLOGIA E USO DOS DADOS

Os dados geofísicos desta pesquisa são oriundos do Projeto Aerogeofísico Gurupi, fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e executado pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A. Esse levantamento aerogeofísico foi realizado no período de 22/10/2008 a 04/11/2009 e abrange a porção sudoeste do Estado do Pará e a parte noroeste do Estado do Maranhão, e cobre uma área de 76.754,18 km² de perfis aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de alta resolução, com linhas de vôo e controle espaçadas em 500 m e 10 km, orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente.

O mapa de associações tectônicas e recursos minerais desenvolvido por Klein et al., (2017) na escala de 1:150.000, a Carta Geológica do Brasil ao milionésimo (Vasconcelos et al., 2004) e o mapa geológico de detalhe desenvolvido pela empresa *OZ Minerals* serão usados para a interpretação dos dados magnéticos. Demais informações foram adquiridas a partir do banco de dados GEO/SBG-CPRM que disponibiliza relatórios técnicos e dados SIG dos projetos efetuados sobre a região. Os mapas são apresentados na mesma projeção, *Datum* (WGS84), e mesma zona, 22S.

3.1. Aeromagnetometria

O processamento dos dados aerogeofísicos se iniciou com a geração de dados magnetométricos a partir do arquivo original XYZ, o qual foi importado para o *software* da Bentley, gerido pela *SeequentTM*, o *GEOSOFT Oasis Montaj 2022.1*. O interpolador bidirecional foi escolhido para a produção das malhas de magnetometria, pois resultou no maior detalhamento das anomalias magnéticas para dados levantados em linhas paralelas. O fluxograma de processamento e interpretação dos dados são apresentados na figura 3.

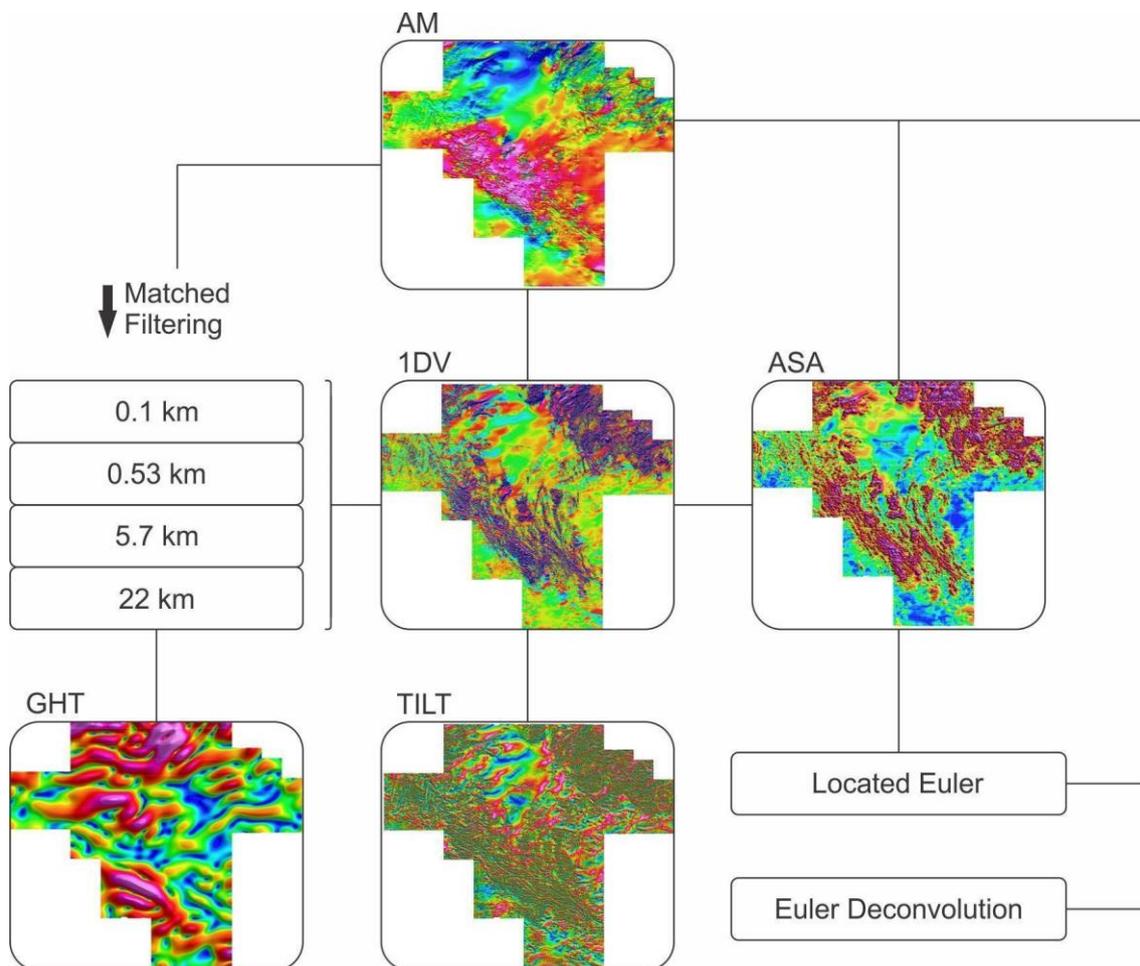


Figura 3. Fluxograma de processamento dos dados aeromagnéticos. 1DV – Primeira Derivada Vertical; TILT – Derivada TILT; ASA – Sinal Analítico; GHT - Gradiente Horizontal Total

3.2. Matched filtering

O *matched filter* é um filtro elaborado para separar a resposta geofísica no domínio da frequência em bandas espectrais (fig. 4). O filtro utiliza a informação da camada equivalente aplicado a partir de filtros passa banda. Esses filtros separam os dados em bandas de comprimento de onda distintas onde as anomalias de baixa frequência são relacionadas a fontes mais profundas e as anomalias de alta frequência relacionadas às fontes mais rasas ou até mesmo zona de ruído (Spector & Parker, 1979; Phillips, 2001).

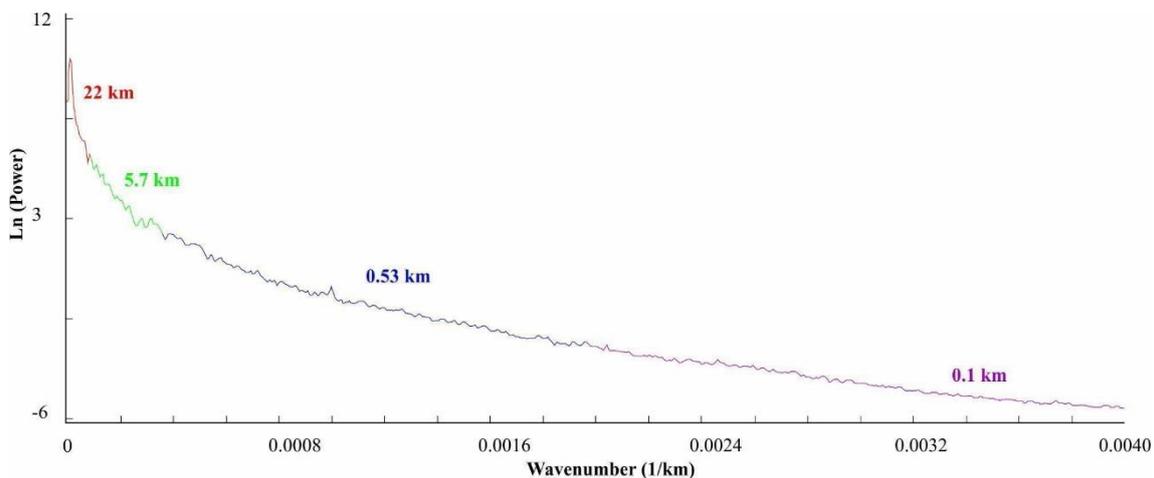


Figura 4. Espectro de potência produzido a partir do *matched filtering*

3.3. Gradiente Horizontal Total

O Gradiente Horizontal Total (GHT) foi usado na detecção de borda de fontes magnéticas na maior profundidade encontrada para a área, após a aplicação do *matched filtering*. O filtro aplicado mostrou-se eficaz na visualização de domínios magnéticos na maior profundidade encontrada para a área.

A metodologia empregada no GHT baseia-se na combinação do ângulo de inclinação do gradiente horizontal total, a partir da normalização das derivadas das componentes X e Y no campo magnético (Nabighian, 1972, 1974; Cooper & Cowan, 2006; Ferreira et al., 2011, 2013). Dessa forma, os domínios magnéticos e feições como direções preferencias e a geometria das fontes magnéticas foram delimitadas de maneira efetiva com este filtro em comparação com outros métodos tradicionais, tais como a derivada tilt (Miller & Singh, 1994) ou apenas com a anomalia magnética.

3.4. Primeira derivada vertical e deriva tilt

A interpretação das direções magnéticas expressas em lineamentos foram baseados na resposta observada da primeira derivada vertical e da derivada tilt (Hood, 1965; Gunn et al., 1995; Verduzco et al., 2004; Pilkington & Keating, 2009). A delimitação das estruturas magnéticas regionais foram consideradas inicialmente a partir da primeira derivada vertical, como o realizado por Feumoe et al., (2012). Esses autores optaram pela análise das altas frequências magnéticas para visualizar as bordas de Cráton e sua respectiva faixa móvel com auxílio do mapeamento geológico. No entanto, para a análise dos padrões estruturais sobre a faixa móvel em menor escala, a derivada tilt mostra-se

mais precisa na identificação das estruturas estimadas a partir da transformação da anomalia magnética em ângulos (radianos).

3.5. Deconvolução de Euler

Diferente do *matched filter*, a profundidade das fontes magnéticas estimada pela deconvolução de Euler é quantitativa. A interpretação dos dados potenciais é feita de forma rápida ao considerar os seus gradientes e um determinado número inteiro, o índice estrutural (SI). O índice é dependente da natureza da fonte geológica (Eq. 1). As restrições geológicas são aplicadas e realçadas a partir do uso do índice estrutural correto e a técnica pode localizar e delinear zonas de cisalhamento (Reid et al., 1990, 2014).

$$(x - x_0) \frac{\partial h}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial h}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial h}{\partial z} = \eta(b - h) \text{ Eq. 1}$$

onde (x_0) , (y_0) e (z_0) são as posições da fonte; x , y e z as posições dos pontos observados, $h = h(x,y,z)$ é a anomalia do campo total e $\partial h/\partial x$, $\partial h/\partial y$ e $\partial h/\partial z$ seus gradientes em relação às variáveis x , y e z . η é um número inteiro (índice estrutural - SI), que depende do tipo da fonte e b é um nível base ou background de dados.

Para que os resultados estejam geologicamente satisfatórios, o índice estrutural (SI=1) foi usado para atender à geologia e fonte geofísica esperada para contatos retilíneos e com mergulhos acentuados, grandes falhas e diques (Reid et al., 2014).

3.6. Deconvolução localizada de Euler a partir do sinal analítico

A deconvolução Localizada de Euler utiliza o sinal analítico da anomalia magnética. Essa técnica realça estruturas geométricas relativas às respostas magnéticas e estima com maior precisão as estruturas e contatos indicados pelos picos do sinal analítico. Assim, a resposta de profundidade é destacada em regiões de interesse (Keating & Pilkington, 2004; Florio et al., 2006; Zhang et al., 2011). Essa técnica estimou a profundidade dos principais corredores estruturais da área com base nos picos de maior anomalia magnética (0.0390 – 2.2231 nT/m).

3.7. Gamaespectroscopia e SRTM

Os dados aerogamaespectrométricos foram montados em um banco de dados novo no GEOSOFT *Oasis Montaj 2022.1* e posteriormente processados. O procedimento

adotado se deu a partir da interpolação dos canais de Potássio (K%), Urânio (eU) e Tório (eTh). As malhas desses canais foram combinadas e resultou em um mapa ternário RGB dos três radioelementos fundamentais para a interpretação (K (%), eU (ppm) e eTh (ppm)).

Os dados ALOS PALSAR possuem 12.5 m de resolução espacial e foram adquiridos no EARTHDATA SEARCH da NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) e processados no software ArcGis 10.8. O processamento se deu com o sombreado em diferentes direções para extração de lineamentos para análise das estruturas em superfície e posteriormente sobrepostas ao modelo digital de elevação - MDE.

O MDE foi combinado com o mapa RGB para identificar unidades geomorfológicas em escala regional e em subáreas, ambos com a sobreposição de lineamentos magnéticos.

3.8.Dados isotópicos

A partir de uma revisão da literatura, foram coletadas idades U-Pb, Pb-Pb e Sm-Nd sobre o Cráton São Luís e Cinturão Gurupi (Sato, 1998; Klein & Moura, 2001, 2003; Klein et al., 2002, 2005, 2005a, 2005b, 2012, 2014, 2020a, Palheta et al., 2009, Klein & Rodrigues, 2022). As datações foram feitas por diferentes métodos analíticos e georreferenciadas com o uso do software ArcGIS10.8 para que pudessem ser utilizadas como fonte de dados para o presente trabalho.

4. RESULTADOS

As interpretações foram feitas com base na anomalia magnética e seus produtos derivados como o *matched filtering*, primeira derivada vertical, derivada tilt, gradiente horizontal total e deconvolução de Euler.

A análise qualitativa, semiquantitativa (*matched filter*) e quantitativa (deconvolução de Euler) seguiu com a separação dos domínios magnéticos, identificação das principais direções de lineamento, localização das soluções de Euler e correlação das estruturas magnéticas com o mapa radiométrico, geológico e dados estruturais como foliações e lineações.

4.1. Domínios magnéticos

O espectro radial de potências da área permitiu estimar a profundidade das fontes magnéticas para quatro níveis crustais: 22 km, 5.7 km, 0.53 km e 0.1 km (Fig 5a, b e c). A fonte mais profunda está há 22 km de profundidade, sendo identificada como uma zona de anomalia magnética positiva de tendência NW-SE. Essas respostas refletem as estruturas geradas em condições dúcteis e de primeira ordem de grandeza em escala crustal.

As fontes de 5.7 km e 0.53 km de profundidade, apresentam dipolos magnéticos orientados também na direção NW-SE, sob a anomalia mencionada anteriormente, e são geradas em um campo de tensão em condições rúptil-dúctil. Fontes muito rasa, menos de 100 metros devem representar ruído de sinais.

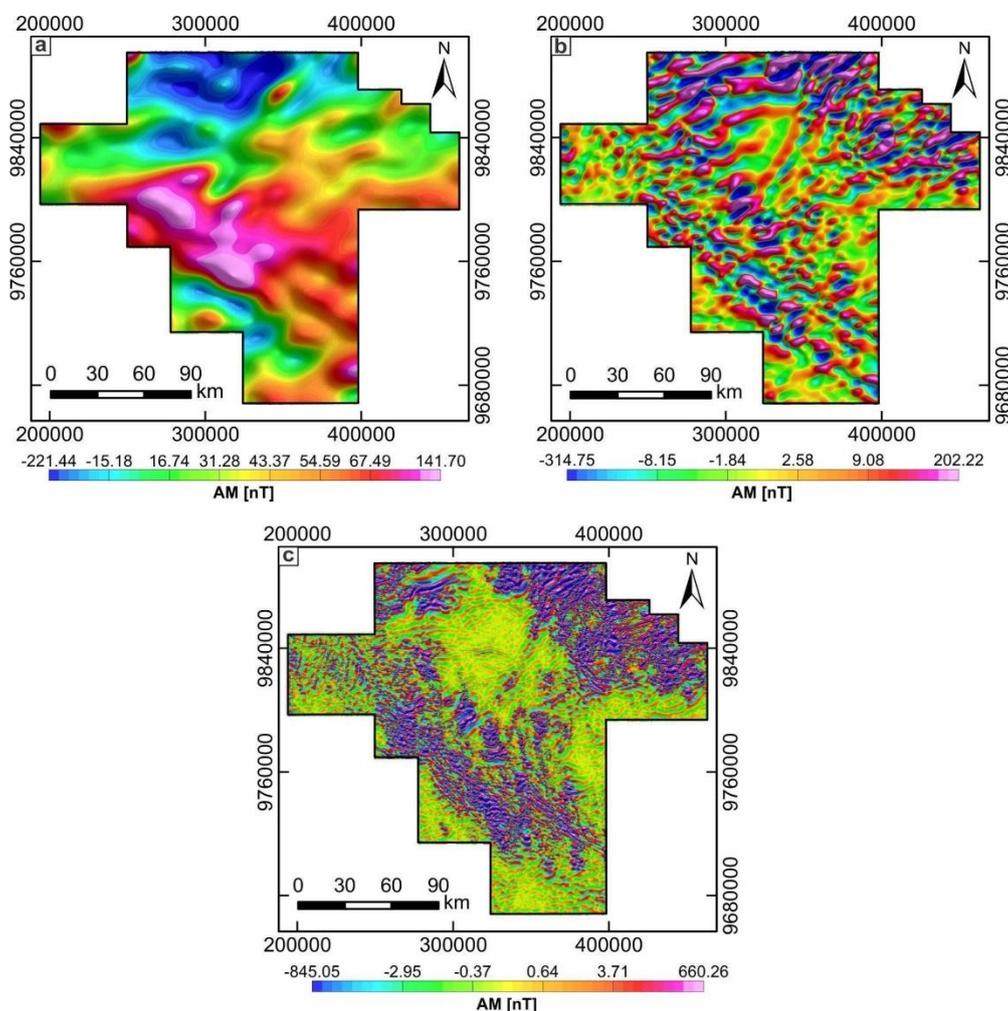


Figura 5. a) Anomalia magnética exibe anomalia positiva na direção NW-SE em 22 km de profundidade; b) Anomalia magnética em 5.7 km exibe anomalias magnéticas dipolares orientado NW-SE; c) Anomalia magnética em 0.53 km com anomalias magnéticas dipolares

Lineamentos magnéticos extraídos a partir do gradiente horizontal total – GHT, em 22 km de profundidade, correspondem a feições lineares e levemente curvilíneas que marcam as margens de quatro domínios magnéticos estruturais (Fig. 6) descritos na tabela 1. A característica transversal mais proeminente identificada é o lineamento WSZ, que bordeja os domínios B e C marcados por altos valores do GHT, também por diferentes direções magnéticas preferenciais. Os domínios A, B e C apresentam a mesma direção preferencial NE-SW e E-W e diferenciam-se por contrastes das anomalias magnéticas impressas no gradiente horizontal total. O Domínio B, em formato de amêndoas, representa grandes estruturas sigmoidais com eixo maior na direção E-W, do elipsoide de deformação, que separa os domínios A e B pelos lineamentos XSZ e YSZ, respectivamente. O domínio D após o lineamento WSZ tem o mesmo padrão de direção E-W similar aos demais domínios.

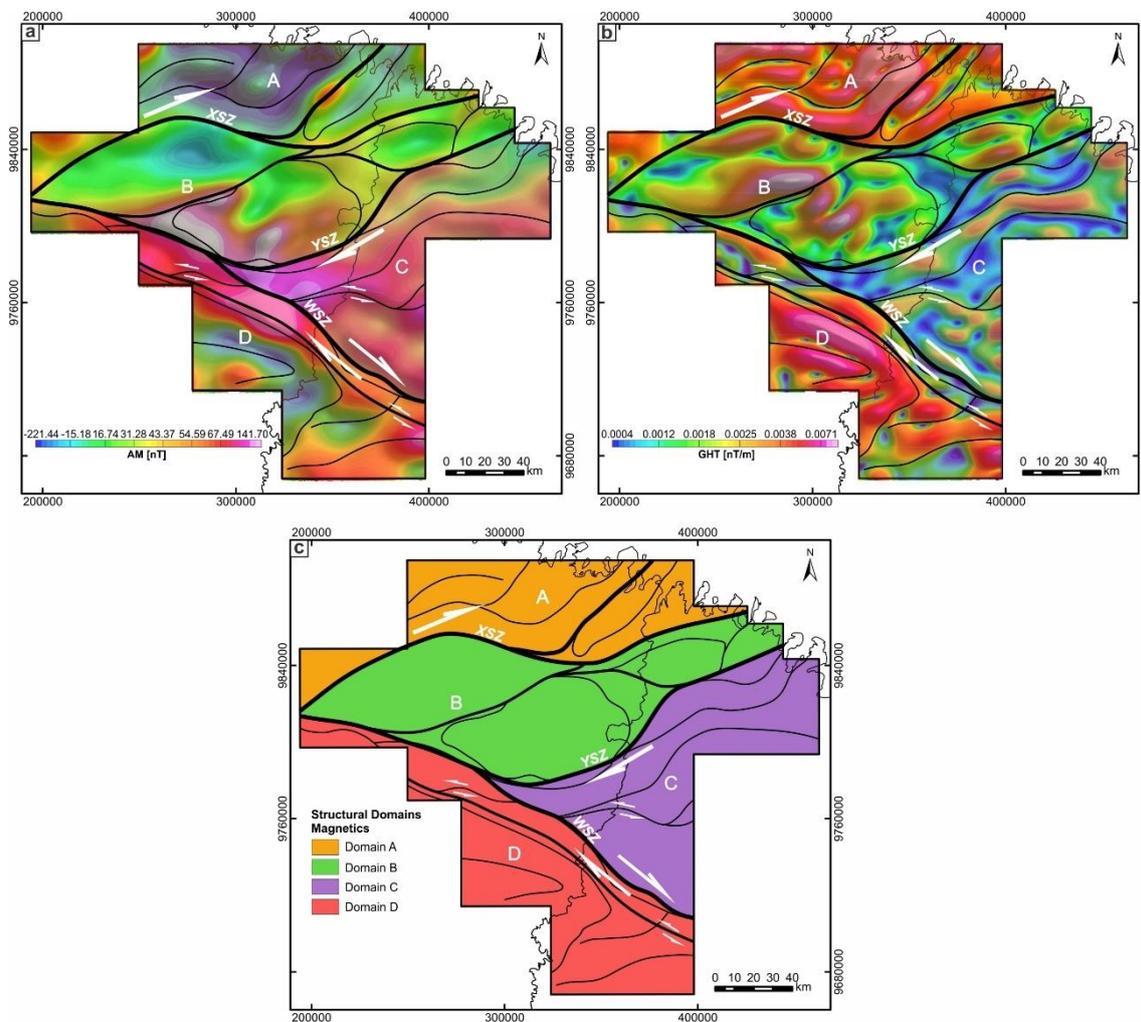


Figura 6. a) Anomalia magnética em 22 km de profundidade; b) GHT em 22 km de profundidade; c) Domínios magnéticos simplificados da área em 22 km de profundidade

Tabela 1. Descrição dos domínios magnéticos

Interpreted magnetic domain	Avarege directions of magnetic lineaments	Description
A	E-W, N45E and N67W	Slightly irregular magnetic relief, characterized by low magnetic anomalies (-1138.1 to 40.98 nT) and isolated higher values. Predominantly high magnetic gradients (>0.0038 nT/m).
B	E-W, N67E and N45E	Rough and irregular magnetic relief, given by moderate to high magnetic anomalies (12.55 to 654 nT). Magnetic gradient varies between highs in the west and lows in the east (0.0004 and 0.0071 nT/m).
C	E-W, N67E and N45E	Smooth and slightly rough magnetic relief, characterized by moderate to high magnetic anomalies (12.55 to 654 nT). Mostly low radians (<0.0025).
D	N67W and N67E	Rough and smooth magnetic relief given by moderate to high magnetic anomalies (40.98 to 654.41 nT). High magnetic gradient (>0.0038nT/m).

4.2. Lineamentos magnéticos

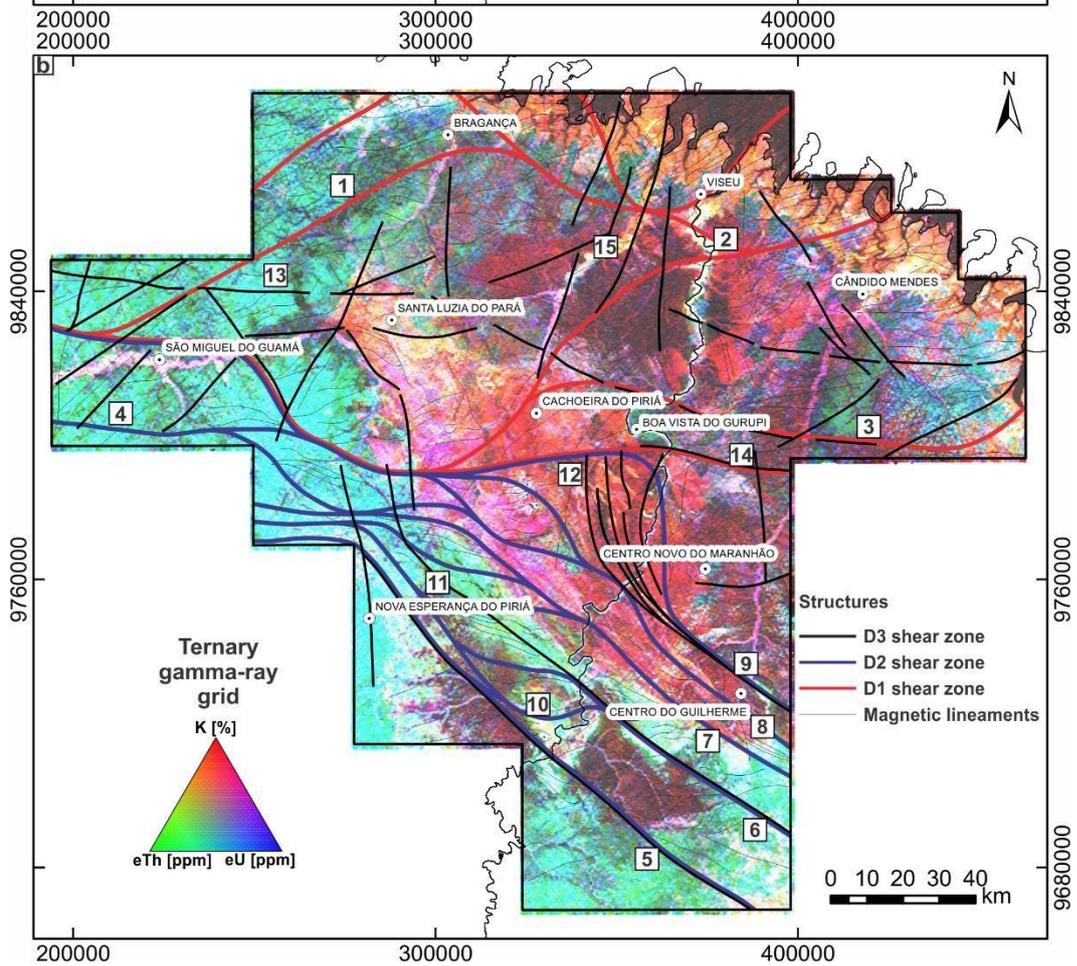
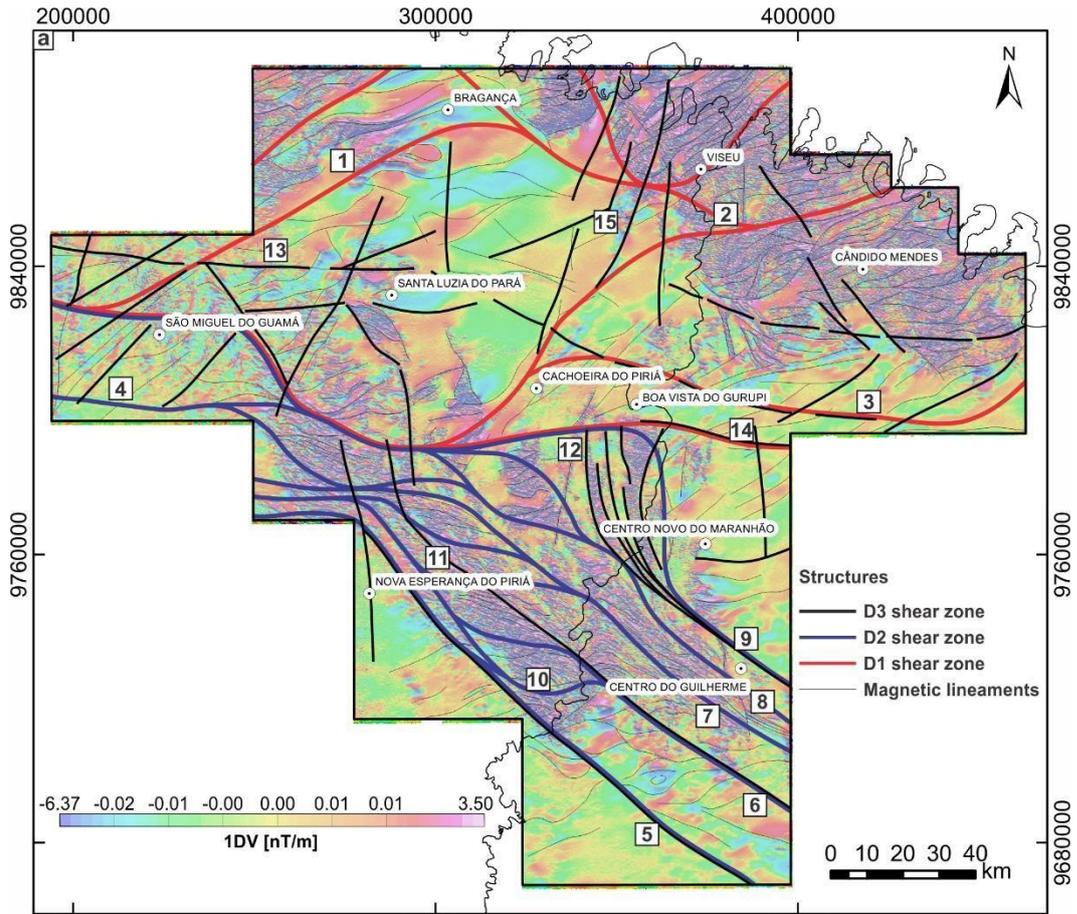
A primeira derivada vertical auxiliou na identificação das principais direções dos lineamentos magnéticos (fig.7a e b), simplificados como estruturas de primeira ordem (fig. 7c), e descritos na tabela 2 enumeradas de 1 a 15. A continuidade de lineamentos magnéticos alongados subparalelos são caracterizados como diferentes elementos estruturais, tais como contatos litológicos, falhas de empurrão ou zonas de cisalhamento paralelas às unidades litológicas. Falhas são caracterizadas por deslocamentos retos ou truncamentos abruptos de horizontes magnéticos rasos, enquanto lineamentos longos, profundos e defletidos, que marcam contrastes magnéticos ou truncados transversalmente são interpretados como zonas de cisalhamento.

Os lineamentos magnéticos sobrepostos ao mapa radiométrico (Fig. 7b) exibem padrões diferentes abaixo e acima do lineamento magnético #13. Acima exibem tons avermelhados, a leste do lineamento magnético #15, e tons pretos e esverdeados, a oeste do mesmo lineamento magnético. Abaixo do lineamento #13, são exibidos tons rosas e equilibrados entre K [%] e eU [ppm]. Os padrões radiométricos observados na imagem RGB e Th refletem a geologia em superfície e são concordantes com os lineamentos magnéticos interpretados.

Os principais *trends* sobre o Cráton São Luís são E-W e ENE-WSW, identificados como estruturas D1, os quais são truncados abruptamente pelos *trends* magnéticos d Cinturão Gurupi com direção NW-SE, e registram similaridades com os domínios magnéticos A, B e C (seção 4.1). Os lineamentos sobre o Cinturão Gurupi são marcados

por alternância de altos e baixos magnéticos, com direção preferencial NW-SE e quase sempre apresentam passagem dúctil para E-W. Estão intimamente ligados com a direção NW-SE do domínio magnético D identificados como estruturas D2 (seção 4.1).

As estruturas D3 são caracterizadas por lineamentos com baixo gradiente magnético que no geral deslocam a trama magnética. As estruturas no geral estão paralelas às deformações preexistentes D1 e D2 como é o caso do lineamento #13, no qual prolonga-se longitudinalmente do oeste da área até coincidir com o lineamento #3 à leste. Sobre o Cinturão Gurupi, em que as direções são predominantemente NW-SE as estruturas D3 são paralelas aos lineamentos #5, # 6 e #9. O conjunto de lineamentos #12 apresenta direção curvada de NW-SE para N-S e indica cinemática sinistral para o evento D3.



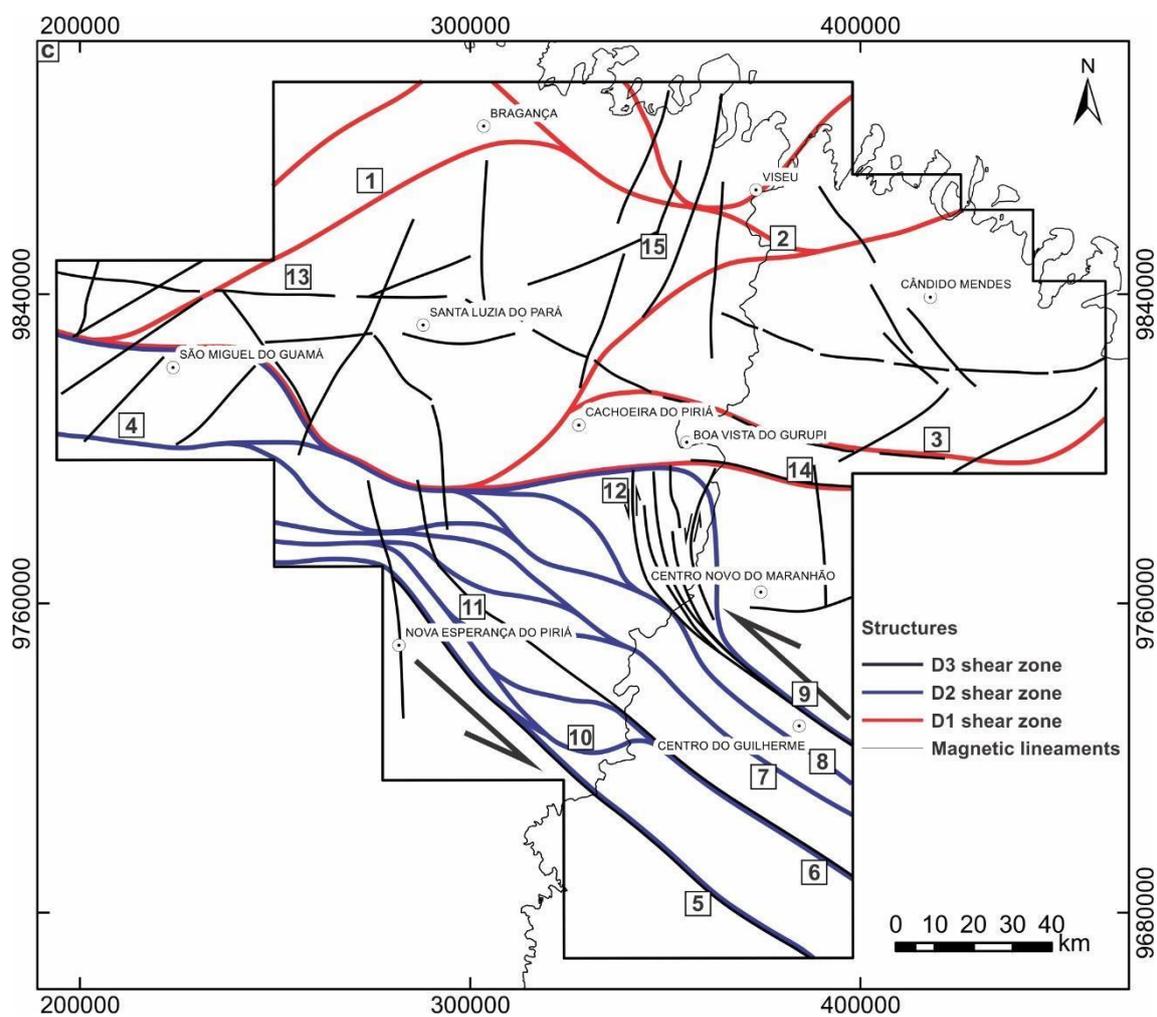


Figura 7. a) Principais lineamentos magnéticos extraídos da primeira derivada vertical; b) Lineamentos magnéticos sobrepostos ao mapa radiométrico; c) Principais lineamentos magnéticos simplificados

Tabela 2. Estruturas interpretadas a partir dos lineamentos magnéticos da área

Nº	Main trend	Interpreted structure	Description
1	NE-SW to E-W	Deformartion zone	Sinuuous lineament in which it inflects from NE-SW in the northeast portion to E-W in the north
2	NE-SW to E-W	Deformartion zone	Sinuuous lineament in which it starts at the northeast end of the area and curves until it makes oblique contact with lineament #3
3	E-W	Deformartion zone	Lineament mostly with E-W direction and slight bending for NW-SE
4	E-W	Shear zone	Lineament E-W with passage to NW-SE
5	NW-SW to E-W	Shear zone	NW-SE direction lineament with ductile passage to E-W at the NW end of the lineament
6	NW-SW	Shear zone	NW-SE direction lineament with ductile passage to E-W
7	NW-SE to E-W	Shear zone	NW-SE direction lineament, slightly curved and branches in the NW portion
8	NW-SE	Shear zone	Lineament bent and parallel to lineament #7 with bending from NW-SE to E-W at the NW end of the lineament
9	NW-SE to N-S	Shear zone	Sinuuous lineament with bending from NW-SW to N-S
10	NW-SE to E-W	Shear zone	Sinuuous lineament with bending from NW-SW to E-W
11	NW-SE to E-W	Fault	Lineament parallel to shear network #6
12	N-S	Fault	Lineament set N-A-S interrupted perpendicularly to lineament #14
13	E-W to WNW-ESE	Fault	Lineament cuts across the entire area horizontally and varies its direction from E-W to WNW-ESSE
14	E-W	Fault	Lineament mostly with E direction and is replaced by lineament sets #11
15	NNE-SSW	Fault	Rectilinear lineament that displaces the magnetic weave

4.2.1. Estruturas magnéticas, distribuição espacial e temporal e cinemática

Feições magnéticas no Cráton São Luís, NE da área, evidenciam direções magnéticas preferencialmente similares, o que sugere preservação dos *trends* estruturais originais de ENE-WSW para E-W (Fig. 7a) ao longo de toda a seção crustal, evidenciada pelas imagens do *matched filtering* (fig 6). Lineamentos magnéticos com curtos comprimentos de onda destacam deformações rúpteis em superfície com direção variável entre E-W, NW-SE e N-S. Os lineamentos #1, #2 e #3 truncam abruptamente uma rede estreita e alongada de lineamentos com tendência geral NW-SE na parte central da área, sobrepondo-se ao domínio A (seção 4.1.).

Os lineamentos magnéticos #4, #5 e #6, #7 e #9 representam extensos corredores estruturais, com mais de 200 km de extensão. Os lineamentos possuem direção média NW-SE e com flexão para E-W na porção oeste da área. Lineamentos magnéticos #10 e #11 com formato sigmoidal aliado a lineamentos magnéticos rotacionados entre os lineamentos de primeira ordem indicam componente sinistral. Conjunto de falhas

representado pelos lineamentos #12, de direção N-S, são observadas próximas à cidade de Boa Vista do Gurupi no estado do Maranhão, são interrompidas ao interceptar o lineamento #14 de direção E-W. Esta configuração age como barreira estrutural para a propagação dos lineamentos #12. A noroeste do conjunto de cisalhamentos NW-SE, são observadas falhas, também com direção N-S, no qual deslocam a trama magnética associada ao lineamento #13.

Nós interpretamos que o domínio do Cinturão Gurupi engloba os lineamentos magnéticos de #4 a #11, que formam uma rede de lineamentos de aproximadamente 200 km de extensão. Os lineamentos são caracterizados por alta intensidade magnética bem identificada na primeira derivada vertical, e são interpretados como uma rede de cisalhamento com direção geral WNW-ESE a NW-SE. Este sistema de cisalhamento, tem uma falha principal que se ramifica para zonas de cisalhamento secundárias, geradas em um ângulo agudo, que definem uma cinemática sinistral para todo o sistema transcorrente (fig. 7a, b e c).

O lineamento #15 de direção geral NNE-SSW, possui cinemática sinistral, com deslocamento da trama magnética, prolongando-se de forma pouco curvada no interior do Cratón São Luís, norte da área, devido às suas fontes rasas sugerem falhas no campo rúptil (fig. 8 e 9).

4.3. Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler com índice estrutural (SI=1) foi aplicada sobre o *grid* da anomalia magnética para reforçar as interpretações estruturais (fig. 8) (Reid et al., 1990). Devido a sobreposição de soluções e para melhor visualização dos resultados, as soluções de Euler foram individualizadas em função da sua profundidade (Fig. 9a, b, c, d e f).

A sudeste do Cinturão Gurupi, nas proximidades de Centro do Guilherme, os lineamentos #5 e #6, são concordantes com orientação geral NW-SE, aglomeram-se soluções de Euler inferiores a 2200 metros, assim como soluções discretas com até 4800 m de profundidade presentes em menor proporção. As soluções diminuem de frequência à medida que adentra entre os lineamentos #6 e #7, e posicionam-se espaçadamente de uma para a outra e exibem profundidades rasas com até 900 m de profundidade, e assim persiste ao longo da direção NW-SE até estes lineamentos flexionarem para E-W e exibir novamente um adensamento de soluções de até 900 m, em direção a Nova Esperança.

Soluções com até 2200 m de profundidade concentram-se na extremidade leste do lineamento #13. Falhas N-S, oblíquas ao lineamento #14, exibem poucas soluções e variam entre 900 m até 2200 m de profundidade.

O lineamento #15, exhibe concentração de soluções de Euler rasas, desde o contato transversal com o lineamento #2 à extremidade norte da área em contato abrupto com o lineamento #1. Ao longo da direção NNE-SSW do lineamento #15, a profundidade tende a aumentar de 2200 m próximo ao lineamento #2 e concentra soluções de até 4800 m de profundidade na porção norte da área como mostra a figura 9.

Nas redondezas de Cândido Mendes, as soluções no geral estão alojadas na borda norte do lineamento #3, agrupadas de maneira concordante com as direções E-W, e tratam-se de soluções com profundidades entre 900 e 2200 metros. As soluções agrupadas a sul do lineamento #2 apresentam soluções de Euler rasas, inferiores a 900 metros de profundidade, são espaçadas entre si com adensamento de soluções somente na borda do lineamento #15, próximo a cidade de Vizeu.

Na porção oeste da área, ao redor de São Miguel Guamá, as soluções de Euler são preferencialmente rasas atingindo até 2200 metros de profundidade, enquanto a noroeste, acima do lineamento #13, próximo à Santa Luzia do Pará, as soluções exibem as maiores profundidades da região com até 10000 metros de profundidade e aglomeram-se sobre o lineamento #1.

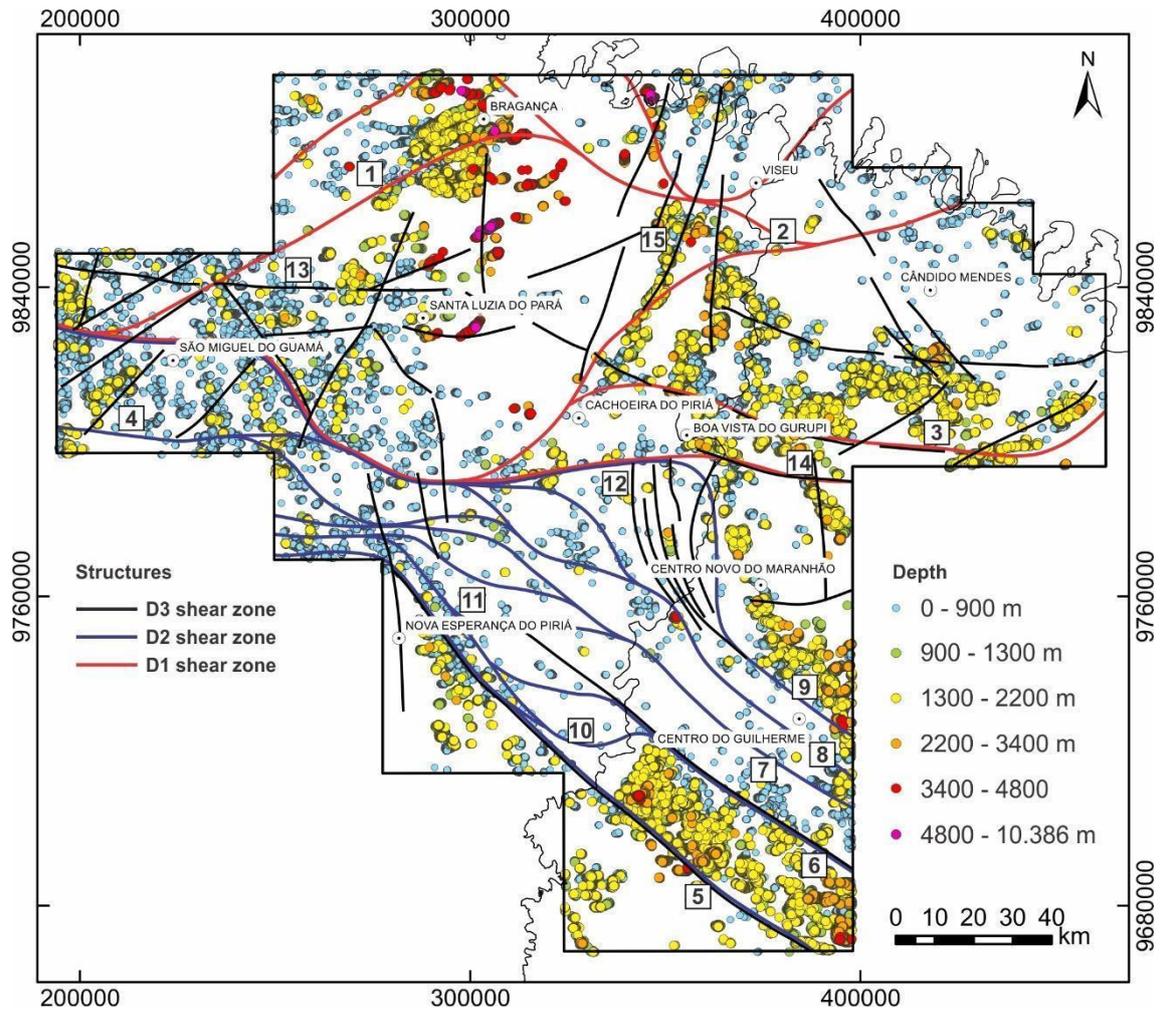


Figura 8. Soluções de Euler sobrepostos aos lineamentos magnéticos da área

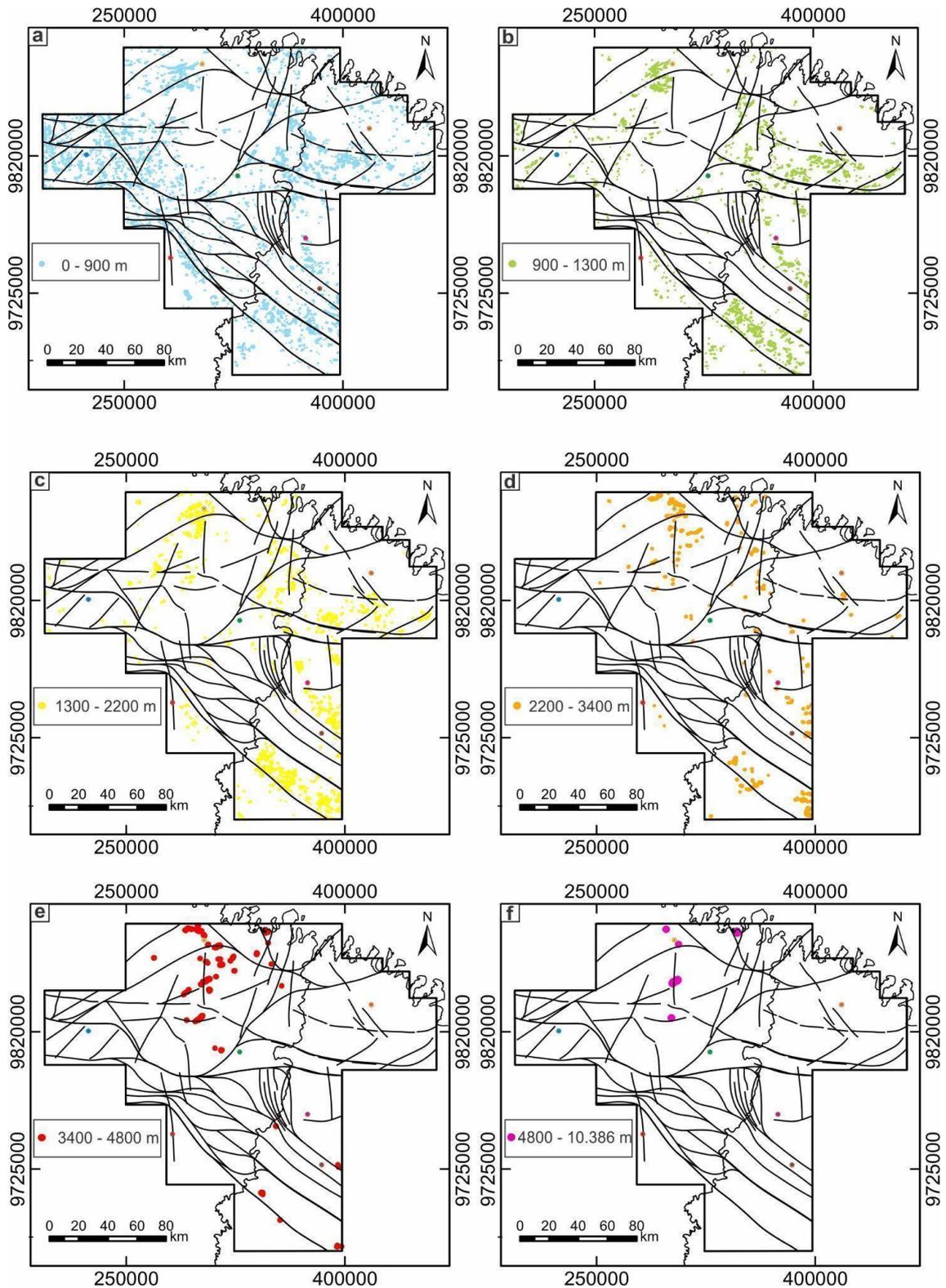


Figura 9. (a) Soluções de Euler entre 0 e 900m de profundidade; (b) 900m e 1300m de profundidade; (c) 1300m e 2200m de profundidade; (d) 2200m e 3400m de profundidade; (e) 3400 e 4800m de profundidade; e (f) 4800m e 10.386m de profundidade. - Em todas as figuras há círculos coloridos que representam as cidades: amarelo - Bragança/ Pará, azul - São miguel do Guamá/ Pará, verde - Cachoeira do Piriá/ Pará, Nova Esperança do Piriá/ Pará, laranja - Cândido Mendes/ Maranhão, vermelho - , rosa - Centro Novo do Maranhão/ Maranhão e marrom - Centro do Guilherme/ Maranhão

4.4. Deconvolução Localizada de Euler

A deconvolução Localizada de Euler foi útil para estimar com maior precisão as profundidades das fontes magnéticas, indicados pelos picos obtidos no processamento do sinal analítico e corresponde a estruturas rasas relacionadas ao campo rúptil de deformação. (Fig. 10). O mapa digital de elevação (MDE) apresenta a topografia atual da região de estudo, e a interpretação obtida dos lineamentos extraídos na superfície pela SRTM e em subsuperfície pelas direções extraídas do sinal analítico (Fig. 10 e 11). As orientações N-S, NE-SW, E-W e NW-SE são bem marcadas e têm significado tectônico conhecido.

No geral, os lineamentos sobre a área são concordantes às direções relacionadas ao evento D3, onde as soluções da deconvolução localizada de Euler são rasas e alcançam no máximo 927 m de profundidade, de modo que a maioria não ultrapassa 300 metros de profundidade.

A direção NE-SW e NW-SE formam um sistema de par conjugados, que é muito penetrativo nas rochas que constituem a Bacia do Parnaíba e sedimentos recentes, e tem sido frequentemente associado a um sistema de falhas ativas do sistema de grábens de distensão meso-cenozóicos do arcabouço estrutural destas unidades (Pastana et al., 2001).

A rede de lineamentos que formam três corredores que cruzam os limites do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi. Os corredores localizados na parte central do Cinturão Gurupi coincidem com a borda de altos topográficos (Fig.11) e entre eles um baixo topográfico, no qual correlaciona-se com o agrupamento de soluções rasas da deconvolução localizada de Euler.

Os lineamentos E-W cruzam com maior intensidade o Cráton São Luís, e estão concentrados na parte costeira da área em estudo, em direção a Viseu e Cândido Mendes, próximo à margem do oceano Atlântico. Esta feição estrutural está intimamente ligada ao sistema de rifts relacionado a abertura do oceano e toda a evolução tectônica a ele relacionada e também controla todo o sistema de drenagem das bacias recentes.

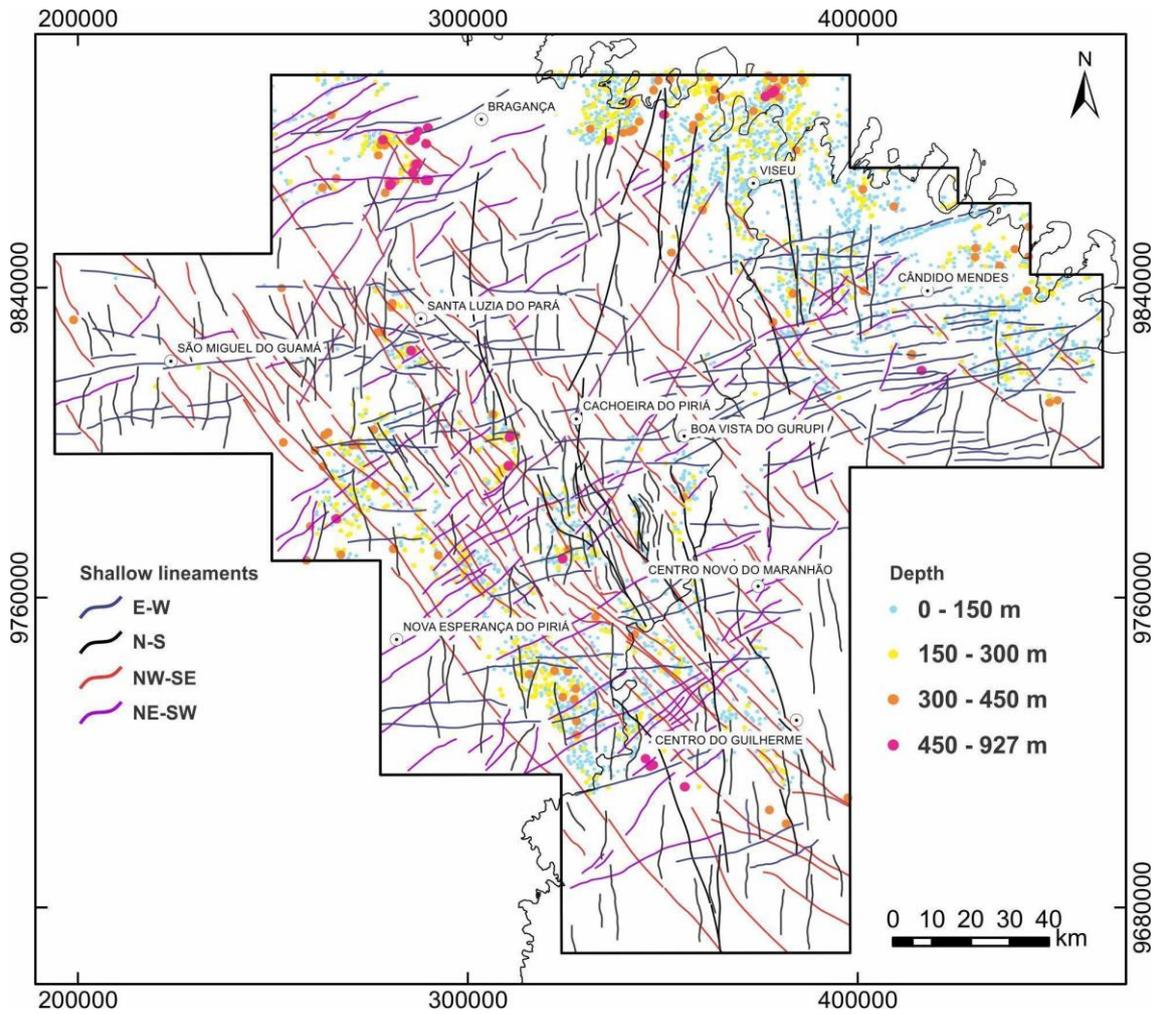


Figura 10. Soluções localizadas de Euler sobrepostos aos lineamentos magnéticos e MDE da área, que exibem correlação quanto a direção e localização dos lineamentos

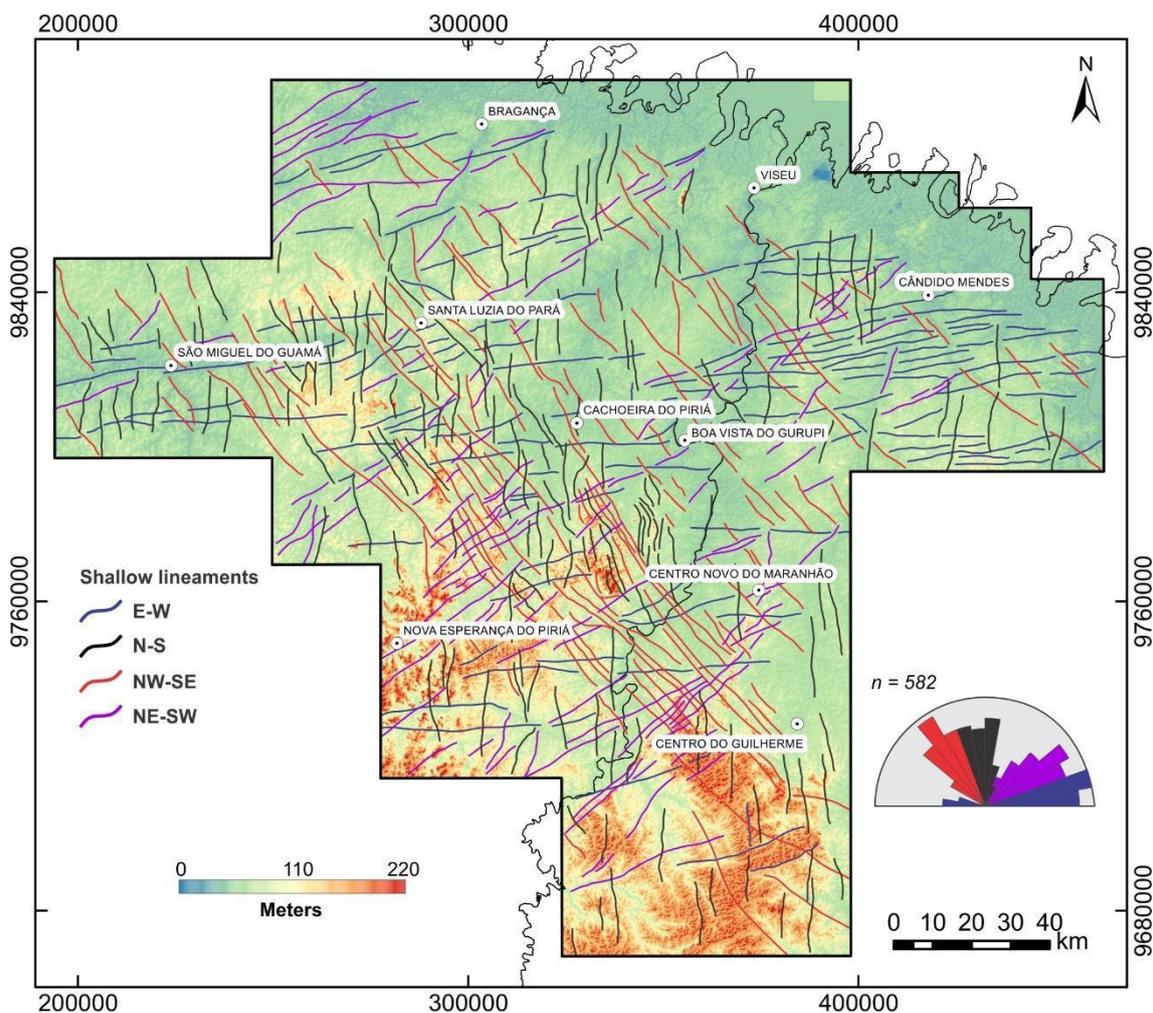


Figura 11. Modelo digital de elevação com principais lineamentos extraídos da área. Destaca-se lineamentos na direção NE-SW que cruza o Cráton São Luís até interceptar o Cinturão Gurupi no qual coincide com a borda de altos topográficos e entre eles encontra-se um baixo topográfico

4.5. Mapa de dados isotópicos U-Pb e Sm-Nd integrados

A sobreposição de informações obtidas a partir de dados isotópicos U-Pb e Sm-Nd disponíveis, com o mapa de lineamentos magnéticos da área (Fig. 12), permitiu fazer uma correlação entre dados radiogênicos com dados radiométricos e sugerir hipóteses sobre a história tectônica da litosfera pré-cambriana do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi.

Um bloco litosférico único com uma concentração de rochas de idades Riácianas no interior do Cráton São Luís e no Cinturão Gurupi, propõe que fragmentos do Cráton foram retrabalhados durante a Orogênese Brasileira e são dispersos ao longo dos sistema de cisalhamento que delimita o Cinturão Gurupi.

A história da reciclagem crustal é evidenciada nas idades meso/neoproterozóicas, e concentração de intrusões graníticas neoproterozóicas, ao longo do Cinturão Gurupi.

Em termos estruturais, é recorrente a reativação dos lineamentos rasos no campo rúptil na mesma direção de antigos profundos, em todas as direções identificadas na região.

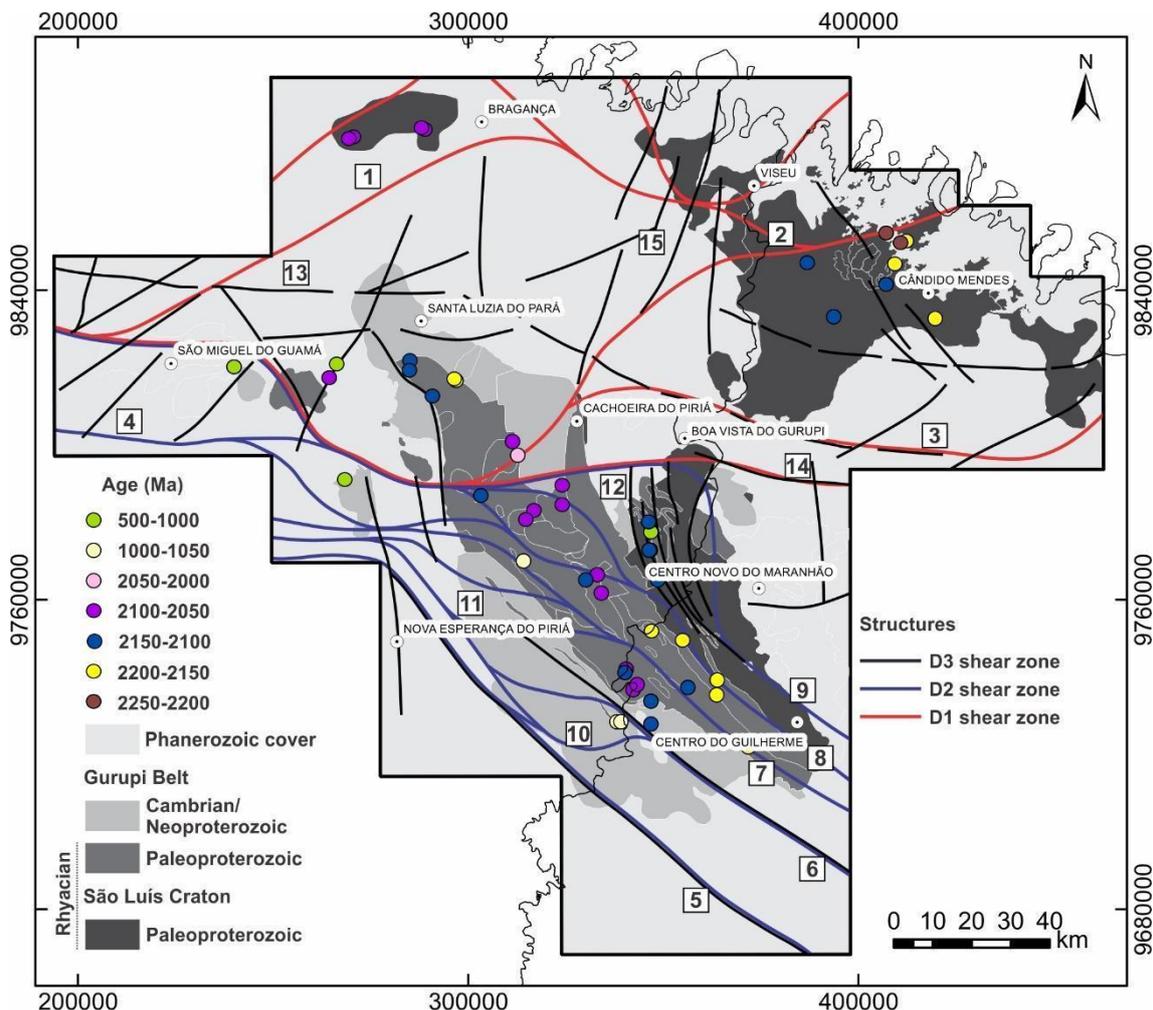


Figura 12. Idades sobrepostos aos lineamentos magnéticos da área

4.6.História Cinemática

Os dados de elementos estruturais (foliações e lineações) foram compilados de Klein et al., (2017) e Palheta et al., (2009) e estão dispostos essencialmente sobre três áreas chaves selecionadas do Cinturão Gurupi, que representam domínios crustais de 35 km por 25 km, com complexa história da partição da deformação na região (Fig. 13).

Os dados de foliações e lineações (n=86) que recobrem a área I, que inclui rochas do embasamento do Cinturão Gurupi, próximo ao contato com o Cratão São Luís, na região de Boa Vista do Gurupi, caracterizam dois padrões deformacionais distintos. O primeiro mostra um padrão com foliações de baixo ângulo, com mergulhos que variam entre 25° e 50° e de encurvamento do *trend* estrutural da direção E-W para WNW-ENE, o qual está relacionado ao evento regional conhecido como D1. A lineação de estiramento

sub-horizontal, apresenta indicadores cinemáticos que indicam transporte tectônico de SW para NW, em direção ao Cráton em um sistema compressivo de empurrões. O segundo padrão estrutural, é registrado principalmente nas unidades metassedimentares Neoproterozóicas, no qual as foliações tendem a apresentar orientações N-S a NW-SE e mergulho acentuado superior a 65°.

O segundo domínio, corresponde a área II na figura e apresentam um padrão deformacional homogêneo, no qual foliações estão orientadas preferencialmente nas direções NW-SE e NNW-SSE, com mergulho de alto ângulo variando entre 70° e 80° para NE e SW e corresponde ao local onde o evento regional D2 é mais penetrativo.

As lineações de estiramento são direcionais NW-SW e os indicadores cinemáticos, dados pelo encurvamento e arrasto dos elementos estruturais, sugerem sigmoides de caráter dúctil sinistrais. Neste domínio, dobras isoclinais e em bainhas (Pastana et al., 2001; Palheta, 2001; Palheta et al., 2009) são evidências de um sistema Transpressional e caracterizam a Zona de Cisalhamento Tentugal. Neste domínio, também é bastante penetrativo o evento D3, de caráter rúptil, com falhas normais de direção N-S, caracterizado por intenso enxame de veios dilatacionais de quartzo em zonas de fraturas, que sugerem um sistema transtensional a extensional com dinâmica E-W.

O domínio da área III, é tipicamente do sistema transcorrente de direção NW-SE com mergulhos íngremes superiores a 75° para SW e NE. Os dados estruturais (n=113) são homogêneos e existe grande concordância entre os lineamentos magnéticos com deformações dúcteis e rúpteis penetrativas nas rochas deste domínio, que indicam reativação cíclica e partição da deformação ao longo do Cinturão Gurupi.

Todos estes domínios são coerentes com um sistema transcorrente NW-SE sinistral com encurvamento das foliações para a direção principal do cisalhamento no limite de uma faixa móvel na borda de um cráton

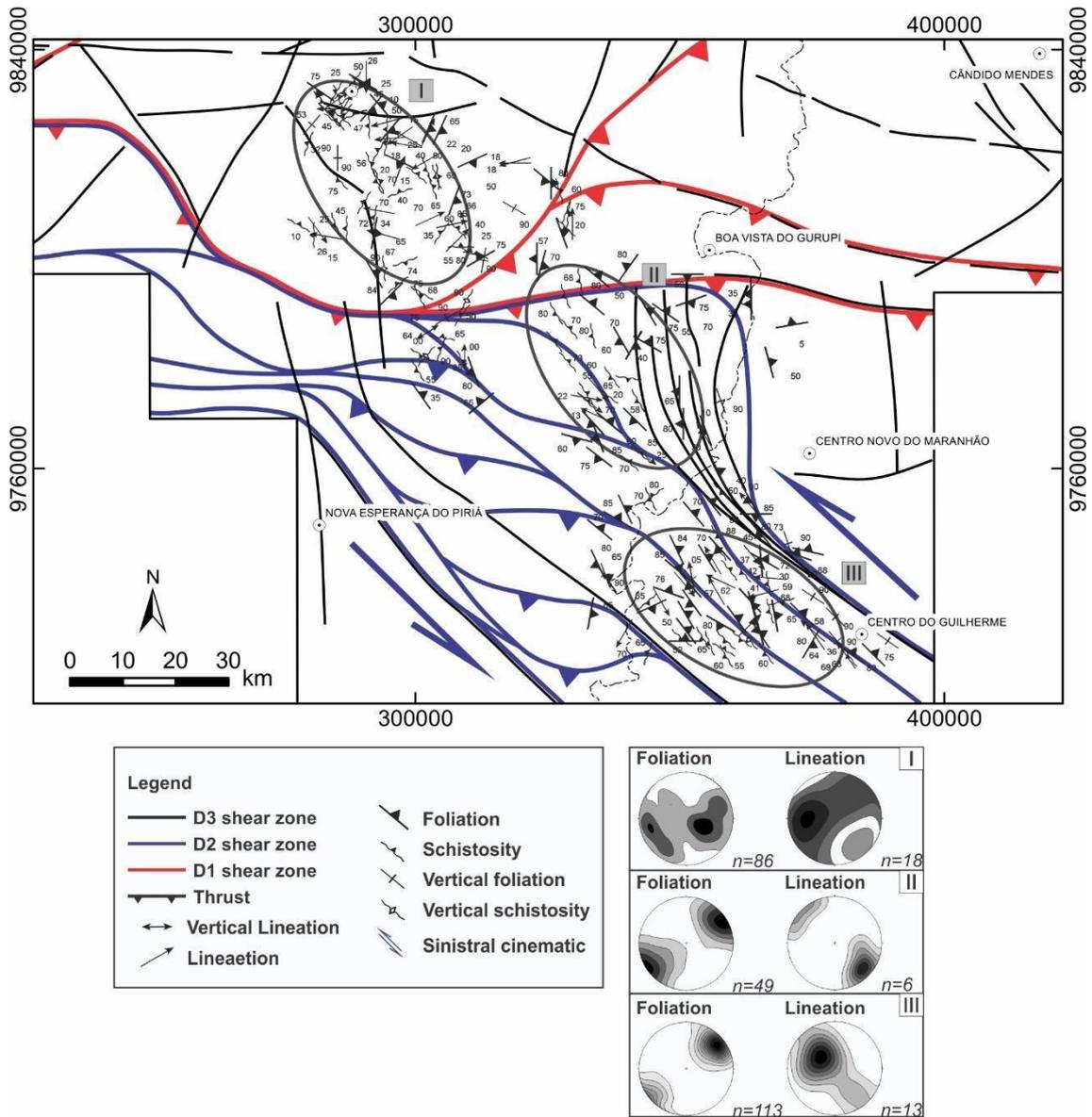


Figura 13. Três áreas chaves com as foliações e lineações superimpostas a rede de lineamentos do Cinturão Gurupi

4.6.1. Controle estrutural dos depósitos auríferos do Cinturão Gurupi

Foram selecionadas duas áreas onde se distribuem depósitos e ocorrências de ouro na região à sudeste do Cinturão Gurupi (Fig.14 a e b). O depósito de Chega Tudo e diversas outras ocorrências de ouro estão localizados na Zona de Cisalhamento Tentugal de caráter dúctil de direção NW-SE. Enquanto o depósito Cipoeiro e outras ocorrências auríferas localizam-se na direção secundária N-S de caráter rúptil.

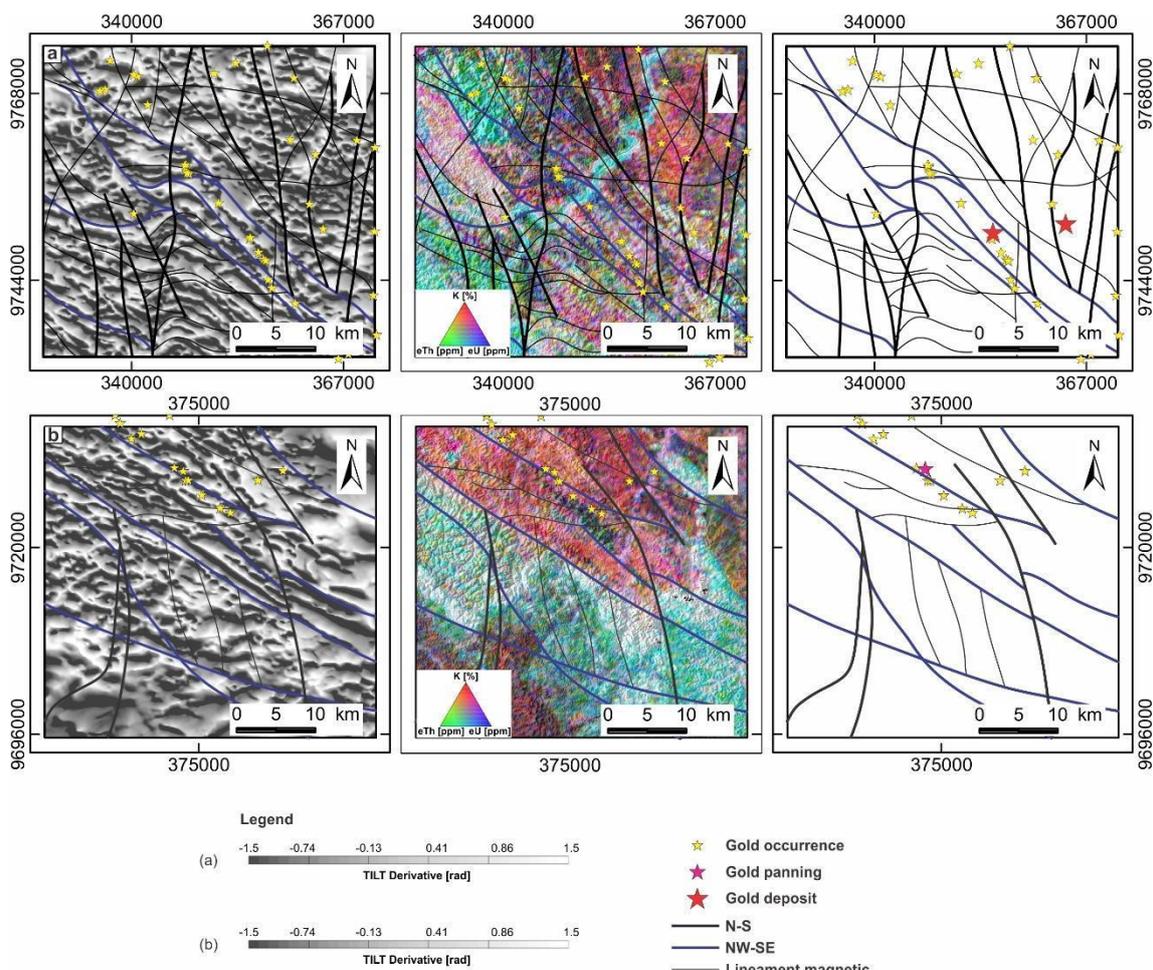


Figura 14. Áreas chave no qual exhibe detalhes a respeito da localização dos depósitos e ocorrências auríferas à sudeste do Cinturão Gurupi. Da esquerda para à direita: Derivada Tilt; Mapa ternário radiométrico; Interpretação dos lineamentos magnéticos em fundo branco. a. Depósito Chega Tudo e ocorrências auríferas localizados na Zona de Cisalhamento Tentugal NW-SE e a direção secundária, N-S, localiza as demais ocorrências de ouro bem como o depósito Cipoeiro; b. Ocorrências auríferas localizados na direção NW-SE e demais ocorrências localizadas em direções N-S

5. DISCUSSÕES

5.1. Análises dos padrões magnéticos

O mapa geológico e estrutural aqui apresentado (Fig. 2) foi elaborado pela compilação de mapas geológicos (Palheta et al., 2009; Klein et al., 2014, 2017, Klein et al., 2020a, 2020b; Klein & Rodrigues, 2022) e de mapas geológicos de empresas de mineração que atual na região. A principal feição estrutural no interior do Cráton São Luís é definida por padrões de deformação com direção variável entre NE-SW a E-W (Fig 7a). Esta associação é compreendida como o primeiro evento deformacional da área – D1.

O Cráton São Luís, exposto a nordeste da área de estudo, entre os já destacados lineamentos #2 e #3, apresenta feições magnéticas alternando-se entre altas e baixas razões gradiométricas (nT/m) (Fig. 7a), que interpretamos como relacionadas às rochas da sequências vulcano-sedimentares reconhecidas na área (Klein & Moura 2008).

A cinemática dos sigmóides, dados por lineamentos sinuosos, são dextrais e relacionados a estruturação profunda no campo dúctil, similar ao descrito por Chardon et al., (2020) no Cráton Oeste Africano.

A transcorrência sinistral do Cinturão Gurupi apresenta lineamentos oblíquos interpretados como estruturas secundárias, tais como falhas sintéticas a transcorrência NW-SE (Klein et al., 2009) e interpretadas como relacionada ao evento D2, no qual gera forte xistosidade com orientação NW-SE e ela curva-se de NNW-SSE para N-S (Klein et al., 2017).

Na borda do Cráton do limite com o Cinturão Gurupi, uma rede pronunciada de lineamentos magnéticos, de direção NW-SE permitiu-se estimar a geometria e a área de influência do Cinturão Gurupi.

O Cinturão Gurupi é compreendida como relacionada ao evento D2 (seção 4.2.1), assinalada por uma pronunciada rede de cisalhamento com pelo menos 150 km de extensão na direção NW-SE até flexionar-se para E-W por mais 50 km a oeste da área, contrastando com as determinações prévias de Pastana (2001), que sugeriu extensão e largura menores, com aproximadamente de 85 km e 35 km, respectivamente.

As estruturas rotacionadas e com padrão de lineamentos interrompidos nos limites de grandes lineamentos do Cinturão Gurupi pode ser usada para estimar a geometria da Zona de Cisalhamento Tentugal como foi abordada por Fossen et al. (2022) na Província Borborema. O retrabalhamento crustal ocorre durante o neoproterozóico, com reativação

de estruturas NW-SE, no qual são estruturas herdadas do embasamento (Fig. 6) e instalação da Zona de Cisalhamento Tentugal sobre o Cinturão Gurupi no neoproterozóico. Com isso estabeleceu-se uma localização mais precisa da abrangência da zona de cisalhamento Tentugal no mesmo evento D2 dúctil, com direção preferencial WNW/ESE, com aproximadamente 150 km de extensão, possivelmente estendendo-se a sudeste, e largura variável de 35 km no extremo sudeste da faixa, afinamento para até 15 km a noroeste, bem como leve flexão para E-W na porção oeste da área estudada.

O padrão deformacional observado pelos lineamentos magnéticos sobre a Zona de Cisalhamento Tentugal permite interpretar uma estrutura do tipo *tension gash* relacionada a eventos extensionais na mesma. Este cenário pode ser explicado por um sistema de deformação transtensional durante o evento D3, essencialmente rúptil durante a orogenia Brasileira Pan Africana. Histórias tectônicas similares podem ser reconhecidas na província de Massa Draa, no Cráton Oeste Africano (Miftah et al., 2021; Velderrain-Rojas et al., 2022).

Segundo Klein et al., (2020) e Klein & Rodrigues (2022), a história rúptil no final da evolução no neoproterozóico sobre o Cinturão Gurupi ocorre como um processo intracontinental. As estimativas de profundidade rasas interpretadas a partir da deconvolução de Euler conseguem delinear as estruturas desenvolvidas. Estruturas rúpteis-dúcteis associado a veios extensionais, com geração de estruturas tipo *tension gashes* e stockwork mineralizados com ouro alojados em sequências metavulcano-sedimentares (Klein, 2014; Campos et al., 2017).

A assinatura magnética do Cinturão Gurupi contrastante com o terreno do Cráton São Luís são características de orógenos acrescionários similar as faixas móveis no Cráton do Congo, Eastern Ghats na Índia e em Províncias pré cambrianas no cinturão leste da Antártica (Golynsky, 2007; Morley, 2009; Feumoe et al., 2012; von Raumer et al., 2013; Giri et al., 2022).

5.2. Retrabalamento crustal e herança de estruturas antigas

Anomalias gravimétricas positivas sugerindo o soerguimento da Moho (Lopes De Castro et al., 2016), coincidentes com os limites do Cinturão Gurupi, foram interpretados como representando uma zona de sutura na borda do Cratón São Luís. O lineamento WSZ, observado a 22 km de profundidade, é uma evidência que corrobora com os resultados citados acima.

Outra evidência da localização da zona de sutura seria o controle tectônico do magmatismo alcalino, com idade de ± 586 Ma, ao longo da Zona de Cisalhamento Tentugal (Klein & Moura, 2003). Na literatura internacional a ocorrência de corpos desta natureza sendo posicionados ao longo de antigas zonas de suturas é comum (Burke et al., 2003, 2008; Burke & Khan, 2006). Sobreposta à zona de sutura Pan-Africana do Cráton Oeste Africano, a Faixa Dahomeyide registra magmatismo alcalino com ± 580 Ma, relacionado a uma fase rifte pós colisional da orogenia Brasiliana, e pode ser caracterizado como uma DARC zona (deformed alkaline rock and carbonatite), que se desenvolve reativando antigas zonas de sutura pré-cambrianas (Attoh et al., 2007).

A fase tardia da orogenia Brasiliana-Pan Africana, agiu como evento de reativação das estruturas ao longo do Cinturão Gurupi em condições mais rúpteis (< 7 km de profundidade). Nossos resultados estimam profundidades de até 5 km para a Zona de Cisalhamento Tentugal, pois suas estruturas e direções magnéticas preferenciais são observadas pela continuidade positiva dos gradientes magnéticos e radianos.

Uchoa et al., (2020), através do método magnetotelúrico, gerou uma seção geológica do Cráton São Luís até a extremidade sudeste do Cinturão Gurupi e os lineamentos #3 e #14 são correspondentes a borda norte e sul da Bacia sedimentar do São Luís. Além disso, Uchoa et al., (2020) estima profundidades até 7 km na porção sudeste do Cinturão Gurupi, o que torna a resposta do método magnético uma ferramenta robusta de correlação com outros métodos geofísicos, usados para entender histórias deformacionais complexas.

O evento D2 e D3 da atual pesquisa são correlacionáveis aos eventos D1 e D2, respectivamente descritos por Tavares et al. (2018) para a campo dúctil. No entanto, interpretamos que o nosso evento D3 é essencialmente rúptil, diferente do que foi identificado por Tavares et al., (2018). Neste caso, o par conjugado de direção NW-NE e o intenso fraturamento de direção N-S e E-W são relacionados a história cretácea, relacionada a abertura do Oceano Atlântico e muito bem impressa sobre os sedimentos Fanerozóicos existentes na região, controlando a deposição e depocentros já identificados por Pastana et al., (2009) e outros.

5.3. Padrão das estruturas no Cráton São Luís e sua contribuição para o modelo de supercontinentes

A correlação entre as grandes zonas de cisalhamento que ocorrem em escala global entre os continentes africano e brasileiro foi proposto por (Chardon et al., 2020), e

corroboram com o fato de que os padrões magnéticos com estruturas dúcteis profundas atingem fontes de até 22 km de profundidade, em ambos os continentes. Bem como a idade Paleoproterozóica das zonas de cisalhamento pode ser interpretada, para os grandes sigmóides que se observa no interior do cráton, onde se pode estimar a mesma cinemática em ambos os continentes. Assim, os padrões deformacionais sigmoidais no Cráton São Luís permanecem com a mesma cinemática da identificada no lado do Oeste Africano, mas respeitando as rotações sofridas por este fragmento crustal durante as orogêneses mais jovens que os afetaram (Chardon et al., 2020). As comparações com a cinemática dos padrões deformacionais encontrados para o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi, também pode ser estendida para uma correlação em outras partes do mundo, como no escudo das Guianas e domínios crustais presentes na Europa Oriental e Norte da China além do Cráton Oeste Africano (Klein & Moura, 2008; Grenholm 2019; Klein et al., 2020a, 2020b). Isso sugere, que durante o paleoproterozóico e Neoproterozoico, esta região deve ser inserida dentro de modelos de ciclo de supercontinentes em escala global através de comparações espaciais e temporais.

6. CONCLUSÕES

A integração de dados magnéticos com dados geológicos existentes provou ser uma ferramenta importante na compreensão da estruturação tectônica dos processos que ocorrem no interior de um Cráton e de uma faixa orogênica que o borda. Neste sentido, apresentamos um novo modelo com a identificação de domínios geológicos e crustais, com grande variação de fontes magnéticas, que representam estruturas geradas em diferentes profundidades para o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi no nordeste do Brasil.

Os lineamentos magnéticos identificados em superfície e subsuperfície no Cráton São Luís mostraram uma grande continuidade das orientações E-W e NE-SW, formando estruturas em “amêndoas”, que foram interpretadas como feições sigmoidais relacionadas a um evento regional denominado de D1. Esforços tectônicos dirigidos de SW para NE, associados a empurrões (*thrusting*), sugerem transporte de massas do Cinturão Gurupi em direção a vergência do Cráton, seguida do desenvolvimento de um sistema transcorrente com cinemática sinistral na mesma direção. Um sistema de colisão oblíqua transpressional tem sido sugerido para explicar as feições estruturais relacionadas a este evento.

Delimitamos com maior precisão a geometria da Zona de Cisalhamento Tentugal com orientação geral WNW-ESE, relacionada ao evento D2. Este evento atuou em condições de um regime rúptil-dúctil herdando estruturas NW-SE, no qual deformou e reestruturou rochas fragmentos do embasamento do Cráton São Luís, alongados ao longo do Cinturão Gurupi, com intenso retrabalhamento crustal e forte desenvolvimento de novas tramas deformacionais, na mesma direção, durante a orogênese Brasileira em torno de 600 Ma.

A tectônica rúptil, relacionada ao evento D3, é bem marcada até pelo menos até 7 km de profundidade, mas predominam estruturas de fontes muito rasas de até 500 metros. Assim observamos a continuidade das estruturas pré-cambrianas, abaixo das rochas e coberturas sedimentares Fanerozóicas e conseguimos identificar zonas e áreas de reativação de antigas estruturas herdadas. Fraturas e lineamentos estruturais associados às direções NW-NE, que formam um sistema de pares conjugados, bem como a forte orientação E-W e N-S são relacionados aos eventos de abertura do oceano Atlântico durante o cretáceo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almaraz, J. S. U., and Cordani, U. G., 1969, Delimitação entre as Províncias Geocronológicas Pré-Cambrianas ao longo do Rio Gurupi [abs.]: in XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador (Boletim Especial, 1).
- Almeida, F. F. M.; Melcher, G. C.; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Vandomos, P. (1968) Radiometric age determinations from northern Brazil: Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, v. 17, p. 3-14.
- Almeida, F.F.M. de, Brito Neves, B.B. de, Dal Ré Carneiro, C., 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Rev.* 50, 77–111. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00072-0)
- Almeida, G.M., Fuck, R.A., de Lima, D.P.D., Dantas, E.L., 2021. Accretion tectonics in Western Gondwana highlighted by the aeromagnetic signature of the Sergipano Belt, NE Brazil. *Tectonophysics* 802, 228742. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228742>
- Bader, J.W., 2019. An Ancient Everest : Precambrian Basement Terranes of the Williston Basin. *Geo News* 29–34.
- Campos, L.D., de Souza, S.M., de Sordi, D.A., Tavares, F.M., Klein, E.L., Lopes, E.C. dos S., 2017. Predictive Mapping of Prospectivity in the Gurupi Orogenic Gold Belt,

- North–Northeast Brazil: An Example of District-Scale Mineral System Approach to Exploration Targeting. *Nat. Resour. Res.* 26, 509–534. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9320-5>
- Cecile, M.P., Morrow, D.W., Williams, G.K., 1997. Early Paleozoic (Cambrian to Early Devonian) tectonic framework, Canadian Cordillera. *Bull. Can. Pet. Geol.* 45, 654–674. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.45.1.054>
- Chardon, D., Bamba, O., Traoré, K., 2020. Eburnean deformation pattern of Burkina Faso and the tectonic significance of shear zones in the West African craton. *BSGF - Earth Sci. Bull.* 191. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020001>
- Condie, K.C., 2004. Supercontinents and superplume events: Distinguishing signals in the geologic record. *Phys. Earth Planet. Inter.* 146, 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.04.002>
- Cooper, G.R.J., Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Comput. Geosci.* 32, 1585–1591. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.016>
- Cordani, U.G., Melcher, G.C., Almeida, F.F.M., 1968. Outline of the Precambrian geochronology of South America. *Canadian Journal of Earth Sciences* 5, 629–632.
- Costa, J. B. S.; Hasui, Y. (1997) Evolução geológica da Amazônia. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (coords.) Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG-NO. v.1, p. 15-90
- Costa, J. L.; Ricci, P. S. F. (1995) A Faixa de cisalhamento Gurupi e o cenário colisional do Cráton São Luís. In: Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos, 5., Gramado, 1995. Boletim de Resumos Expandidos. Gramado, SBG-RS, p. 18-20.
- Brito Neves, B.B., Campos Neto, M.D.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. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1999/v22i3/002>
- Dentith, M., Mudge, S., 2014. Geophysics for the mineral exploration geoscientist, *AusIMM Bulletin.* <https://doi.org/10.1017/cbo9781139024358>
- Diallo, M., Baratoux, L., Dufrechou, G., Jessell, M.W., Vanderhaeghe, O., Ly, S., Baratoux, D., 2020. Structure of the Paleoproterozoic Kédougou-Kéniéba Inlier (Senegal-Mali) deduced from gravity and aeromagnetic data. *J. African Earth Sci.* 162. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103732>
- Ferreira, F.J.F., De Castro, L.G., Bongioiolo, A.B.S., De Souza, J., Romeiro, M.A.T., 2011. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using tilt

- derivatives: Part II - Application to real data. Soc. Explor. Geophys. Int. Expo. 81st Annu. Meet. 2011, SEG 2011 887–891.
- Ferreira, F.J.F., de Souza, J., Bongioiolo, A. de B. e. S., de Castro, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78, J33–J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Feumoe, A.N.S., Ndougsa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E., Fairhead, J.D., 2012. Delineation of tectonic lineaments using aeromagnetic data for the south-east Cameroon area. *Geofizika* 29, 175–192.
- Florio, G., Fedi, M., Pasteka, R., 2006. On the application of Euler deconvolution to the analytic signal. *Geophysics* 71, 87–93. <https://doi.org/10.1190/1.2360204>
- Fossen, H., Harris, L.B., Cavalcante, C., Archanjo, C.J., Ávila, C.F., 2022. The Patos-Pernambuco shear system of NE Brazil: Partitioned intracontinental transcurrent deformation revealed by enhanced aeromagnetic data. *J. Struct. Geol.* 158, 104573. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104573>
- Gabrielse, H., 1985. Major dextral transcurrent displacements along the Northern Rocky Mountain Trench and related lineaments in north-central British Columbia. *Bull. Geol. Soc. Am.* 96, 1–14. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1:MDTDAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1:MDTDAT>2.0.CO;2)
- Giri, Y., Radhakrishna, M., Graham, P., Kumar, T., Armit, R., Kumar, S., 2022. Tectonophysics Crustal architecture of the Eastern Ghats Mobile Belt and tectonic implications: Constraints from aeromagnetic, gravity and geological data. *Tectonophysics* 835, 229386. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229386>
- Golynsky, A. V., 2007. Magnetic anomalies in East Antarctica and surrounding regions: a window on major tectonic provinces and their boundaries. Proc. 10th ISAES, USGS Open-File Rep. 2007-1047, Short Res. Pap. 006 4. <https://doi.org/10.3133/of2007-1047.srp006>
- Grenholm, M., 2019. Earth-Science Reviews The global tectonic context of the ca. 2.27–1.96 Ga Birimian Orogen – Insights from comparative studies, with implications for supercontinent cycles Kedougou-Kéniéba Kénéma-Man domain Baoulé Mossi domain. *Earth-Science Rev.* 193, 260–298.
- Grenholm, M., Jessell, M., Thébaud, N., 2019. Paleoproterozoic volcano-sedimentary series in the ca. 2.27–1.96 Ga Birimian Orogen of the southeastern West African Craton. *Precambrian Res.* 328, 161–192. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.04.005>

- Gunn, P.J., Maidment, D., Milligan, P., 1995. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop: An example from the arunta block, Northern Territory. *Explor. Geophys.* 26, 227–232. <https://doi.org/10.1071/EG995227>
- Hasui, Y.; Abreu, F. A. M.; Villas, R. N. N. (1984) Província Parnaíba. In: Almeida, F. F. M.; Hasui, Y. (coords.) *O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo, Edgard Blücher, p. 36-45.
- Hood, P., 1965. Gradient Measurements In Aeromagnetic Surveying. *Geophysics* 30, 891–902. <https://doi.org/10.1190/1.1439666>
- Hurley, P. M.; Melcher, G. C.; Pinson, W. H.; Fairbairn, H. W. (1968) Some orogenic episodes in South America by K-Ar and whole-rock Rb-Sr dating. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 5, p. 633-638.
- Jessell, M.W., Amponsah, P.O., Baratoux, L., Asiedu, D.K., Loh, G.K., Ganne, J., 2012. Crustal-scale transcurrent shearing in the Paleoproterozoic Sefwi-Sunyani-Comoé region, West Africa. *Precambrian Res.* 212–213, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.015>
- Keating, P., Pilkington, M., 2004. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophys. Prospect.* 52, 165–182. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00408.x>
- Klein, E.L., 2014. Ore fluids of orogenic gold deposits of the Gurupi Belt, Brazil: a review of the physico-chemical properties, sources, and mechanisms of Au transport and deposition. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 402, 121–145. <https://doi.org/10.1144/SP402.2>
- Klein, E.L., Lopes, E.C. dos S., Tavares, F.M., Campos, L.D., Souza-Gaia, S.M. de, Neves, M.P., Perrotta, M.M., 2017. Área de relevante interesse mineral: cinturão do Gurupi.
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., 2003. Síntese Geológica e Geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na Região do Rio Gurupi (NE-Pará / NW-Maranhão). *Geol. USP - Ser. Cient.* 3, 97–112. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2003000100008>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., 2008. São Luís Craton and Gurupi belt (Brazil): Possible links with the West African Craton and surrounding Pan-African belts. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 294, 137–151. <https://doi.org/10.1144/SP294.8>
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., Krymsky, R.S., Griffin, W.L., 2005. The Gurupi Belt, northern Brazil: Lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution.

- Precambrian Res. 141, 83–105. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.08.003>
- Klein, E.L., Palheta, E.M.S., Pinheiro, B.L.S., Moura, C.A.V., Abreu, F.A.M., 2005. Sistematização Da Litoestratigrafia Do Cráton São Luís E Do Cinturão Gurupi. *Rev. Bras. Geociências* 35, 415–418. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2005353415418>
- Klein, E.L., Rodrigues, J.B., 2021. Lu-Hf constraints on pre-, syn, and post-collision associations of the Gurupi Belt, Brazil: insights on the Rhyacian crustal evolution. *Geosci. Front.* 101199. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101199>
- Klein, E.L., Tassinari, C.C.G., Vasconcelos, P.M., 2014. U-Pb SHRIMP and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on the timing of mineralization in the Paleoproterozoic Caxias orogenic gold deposit, São Luís cratonic fragment, Brazil. *Brazilian J. Geol.* 44, 277–288. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020008>
- Klein, E.L., Veloso Moura, C.A., 2001. Age constraint on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís craton and Gurupi belt, Northern Brazil: Implications for lithostratigraphy and geological evolution. *Int. Geol. Rev.* 43, 237–253. <https://doi.org/10.1080/00206810109465011>
- Klein, Evandro L., Lopes, E.C.S., Rodrigues, J.B., Souza-Gaia, S.M., Cordani, U.G., 2020a. Rhyacian and Neoproterozoic magmatic associations of the Gurupi Belt, Brazil: Implications for the tectonic evolution, and regional correlations. *Geosci. Front.* 11, 2243–2269. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.016>
- Klein, Evandro L., Rodrigues, J.B., Lopes, E.C.S., Gusmão de Oliveira, R., Souza-Gaia, S.M., Oliveira, L.B.T. de, 2020b. Age, provenance and tectonic setting of metasedimentary sequences of the Gurupi Belt and São Luís cratonic fragment, northern Brazil: Broadening the understanding of the Proterozoic-Early Cambrian tectonic evolution. *Precambrian Res.* 351. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105950>
- Klein, Evandro Luiz, Lopes, E.C.S., Rodrigues, J.B., Souza-Gaia, S.M., Cordani, U.G., 2020. Rhyacian and Neoproterozoic magmatic associations of the Gurupi Belt, Brazil: Implications for the tectonic evolution, and regional correlations. *Geosci. Front.* 11, 2243–2269. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.016>
- Lesquer, A., Beltrao, J.F., De Abreu, F.A.M., 1984. Proterozoic links between Northeastern Brazil and West Africa: A plate tectonic model based on gravity data. *Tectonophysics* 110. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90055-6)
- Lopes De Castro, D., Hilario Bezerra, F., Adolfo Fuck, R., Mary Vidotti, R., 2016.

- Geophysical evidence of pre-sag rifting and post-rifting fault reactivation in the Parnaíba basin, Brazil. *Solid Earth* 7, 529–548. <https://doi.org/10.5194/se-7-529-2016>
- Martins, E.S.F., Vidotti, R.M., 2021. Another way of looking at an Alkaline Province. *J. Geodyn.* 143, 101811. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101811>
- McFarlane, H.B., Ailleres, L., Betts, P., Ganne, J., Baratoux, L., Jessell, M.W., Block, S., 2019. Episodic collisional orogenesis and lower crust exhumation during the Palaeoproterozoic Eburnean Orogeny: Evidence from the Sefwi Greenstone Belt, West African Craton. *Precambrian Res.* 325, 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.02.012>
- Metelka, V., Baratoux, L., Naba, S., Jessell, M.W., 2011. A geophysically constrained litho-structural analysis of the Eburnean greenstone belts and associated granitoid domains, Burkina Faso, West Africa. *Precambrian Res.* 190, 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.002>
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *J. Appl. Geophys.* 32, 213–217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)
- Nabighian, M.N., 1972. The Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies With Polygonal Cross-Section: Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation. *Geophysics* 37, 507–517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Nabighian, M.N., 1974. Additional Comments on the Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies With Polygonal Cross-Section. *Geophysics* 39, 85–92. <https://doi.org/10.1190/1.1440416>
- Palheta, E.S. de M., 2001. *Evolução Geológica da Região Nordeste do Estado do Pará com Base em Estudos Estruturais e Isotópicos de Granitóides*. Universidade Federal do Pará.
- Palheta, E.S. de M., Abreu, F. de A.M. de, Moura, C.A.V., 2009. Granitóides proterozóicos como marcadores da evolução geotectônica da região nordeste do Pará, Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 39, 647–657. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009394647657>
- Parra-Avila, L.A., Baratoux, L., Eglinger, A., Fiorentini, M.L., Block, S., 2019. The Eburnean magmatic evolution across the Baoulé-Mossi domain: Geodynamic implications for the West African Craton. *Precambrian Res.* 332, 105392. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105392>

- Pastana, J.M. do N., 2001. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB: Turiaçu, Folha SA.23-V-D [e] Pinheiro, Folha SA.23-Y-B. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:250.000 / Organizado por José Maria do Nascimento Pastana, – Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. CR-RO.
- Pilkington, M., Keating, P.B., 2009. The utility of potential field enhancements for remote predictive mapping. *Can. J. Remote Sens.* 35, S1–S11. <https://doi.org/10.5589/m09-021>
- Rezende, O.M. & Pamplona, H. R. P. 1970. Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer-Urbano Santos. *Boletim Técnico da Petrobras*, 13, 5–14. ROGERS, J
- Soares Júnior, A.V., Costa, J.B.S., Hasui, Y., 2008. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: Três fases distensivas. *Geociencias* 27, 427–437.
- Spector, A., Parker, W., 1979. Computer compilation and interpretation of geophysical data. In: Hood, P.J. (Ed.), *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores: Geological Survey of Canada, Economic Geology Report Vol. 31*, 527–544.
- Uchoa, E.B., Vieira Silva, N.C., Magini, C., Gomes Castelo Branco, R.M., Fuck, R.A., Mota da Silva, F., Martins, J.A., Maia e Silva, C.R., 2020. Magnetotelluric transect across the São Luís cratonic fragment, the Gurupi belt and the Parnaíba basin, N-NE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 104. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102888>
- Velderrain-Rojas, L.A., Vidal-Solano, J.R., Alva-Valdivia, L.M., 2022. Paleomagnetic Study of the Late Miocene Volcanic Sequence in Sonora, Mexico: Clockwise Vertical Axis Rotation Related to the Oblique Rifting in the Pacific-North American Plate Boundary. *Tectonics* 41. <https://doi.org/10.1029/2021tc007183>
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., MacKenzie, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *Lead. Edge* 23, 116–119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>
- Zhang, J.-S., Gao, R., Li, Q.-S., Guan, Y., Peng, C., Wang, H.-Y., 2011. A combined Euler and analytic signal method for an inversion calculation of potential data. *Chinese J. Geophys.* 54, 1634–1641.
- Zhu, X., Wang, L., Zhou, X., 2022. Structural features of the Jiangshao Fault Zone inferred from aeromagnetic data for South China and the East China Sea. *Tectonophysics* 826, 229252. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229252>

1. CONCLUSÕES

A integração de dados magnéticos com dados geológicos existentes provou ser uma ferramenta importante na compreensão da estruturação tectônica dos processos que ocorrem no interior de um Cráton e de uma faixa orogênica que o bordejia. Neste sentido apresentamos um novo modelo com a identificação de domínios geológicos e crustais, com grande variação de fontes magnéticas, que representam estruturas geradas em diferentes profundidades para o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi no nordeste do Brasil.

Os lineamentos magnéticos identificados em superfície e subsuperfície no Cráton São Luís mostraram uma grande continuidade das orientações E-W e NE-SW, formando estruturas em “amêndoas”, que foram interpretadas como feições sigmoidais relacionadas a um evento regional denominado de D1. Esforços tectônicos dirigidos de SW para NE, associados a empurrões (*thrusting*), sugerem transporte de massas do Cinturão Gurupi em direção a vergência do Cráton, seguida do desenvolvimento de um sistema transcorrente com cinemática sinistral na mesma direção. Um sistema de colisão oblíqua transpressional tem sido sugerido para explicar as feições estruturais relacionadas a este evento.

Delimitamos com maior precisão a geometria da Zona de Cisalhamento Tentugal com orientação geral WNW-ESE, relacionada ao evento D2. Este evento atuou em condições de um regime rúptil-dúctil herdando estruturas NW-SE, no qual deformou e reestruturou rochas fragmentos do embasamento do Cráton São Luís, alongados ao longo do Cinturão Gurupi, com intenso retrabalhamento crustal e forte desenvolvimento de novas fábricas deformacionais, na mesma direção, durante a orogênese Brasileira em torno de 600 Ma.

A tectônica rúptil, relacionada ao evento D3, é bem marcada até pelo menos até 7 km de profundidade, mas predominam estruturas de fontes muito rasas de até 500 metros. Assim observamos a continuidade das estruturas pré-cambrianas, abaixo dos sedimentos das coberturas Fanerozóicas e conseguimos identificar zonas e áreas de reativação de antigas estruturas herdadas. Fraturas e lineamentos estruturais associados às direções NW-NE, que formam um sistema de pares conjugados, bem como a forte orientação E-W e N-S são relacionados aos eventos de abertura do oceano Atlântico durante o cretáceo.

As comparações com a cinemática dos padrões deformacionais encontrados para o Cráton São Luís e o Cinturão Gurupi em outras partes do mundo permite inserir a região dentro do modelo de supercontinentes em escala global.