



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



BRUNA PERUCCI

ANÁLISE GEOLÓGICA-GEOFÍSICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL NO
SUDOESTE DA PROVÍNCIA CARAJÁS: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS
PARA OS DEPÓSITOS IOCG E DE NÍQUEL HIDROTHERMAL

MONOGRAFIA nº 599

OURO PRETO

Julho 2026

BRUNA PERUCCI

**ANÁLISE GEOLÓGICA-GEOFÍSICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL NO
SUDOESTE DA PROVÍNCIA CARAJÁS: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS
PARA OS DEPÓSITOS IOCG E DE NÍQUEL HIDROTHERMAL**

Monografia do Projeto Final de Curso,
apresentada ao Departamento de Geologia
da Escola de Minas da Universidade Federal
de Ouro Preto, como requisito para avaliação
da disciplina Projeto Final de Curso II –
GEO144.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernandes Dutra
Coorientador: Prof. Dr. Filipe Altoé
Temporim

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P471a Perucci, Bruna.

Análise geológica-geofísica na exploração mineral no sudoeste da Província Carajás [manuscrito]: implicações metalogenéticas para os depósitos IOCG e de níquel hidrotermal. / Bruna Perucci. - 2026.
52 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernandes Dutra.

Coorientador: Prof. Dr. Filipe Altoé Temporim.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica - Lineamentos magnéticos. 2. Alteração hidrotermal. 3. Minas e recursos minerais. 4. Minérios - Vetorização mineral. I. Dutra, Luiz Fernandes. II. Temporim, Filipe Altoé. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.83:553.4

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruna Perucci

Análise geológica-geofísica na exploração mineral no sudoeste da Província Carajás: implicações metalogenéticas para os depósitos IOCG e de níquel hidrotermal

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Geológica

Aprovada em 28 de julho de 2026

Membros da banca

Doutor Luiz Fernandes Dutra - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre Edison Tazava - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor Gustavo Henrique Coelho de Melo - Universidade Federal de Ouro Preto

Luiz Fernandes Dutra, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Fernandes Dutra, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/07/2026, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1149634** e o código CRC **319ECBF7**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter sido meu refúgio nos momentos de incerteza, por renovar minhas forças diante das dificuldades e por me conceder coragem, sabedoria e perseverança para concluir esta etapa tão importante da minha vida.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor, cuidado, incentivo e apoio incondicional ao longo desta caminhada. Em especial, agradeço ao meu pai, Jorge Perreira, por sempre acreditar em mim, por todos os esforços, pelos ensinamentos e pelas palavras de encorajamento que me ajudaram a seguir em frente. Sua presença, sua força e seu apoio foram fundamentais para que esta conquista se tornasse possível.

À memória da minha mãe, Dalva Aparecida, dedico minha eterna gratidão por todos os ensinamentos, pela força e pelo carinho que sempre me ofereceu. Seu amor permanece vivo em meu coração e continua guiando meus passos. Gostaria muito que estivesse aqui para celebrar esta conquista comigo, mas acredito que esteve presente em cada etapa desta trajetória, cuidando de mim e me acompanhando de alguma forma.

Aos meus irmãos, agradeço pelo carinho, pela união, pelo companheirismo e por estarem sempre presentes em minha vida. O apoio de vocês tornou os desafios mais leves e fez com que cada conquista se tornasse ainda mais especial.

Ao meu namorado, Jhonnes Leonardo, agradeço pelo amor, pela paciência, pela compreensão e pelo companheirismo, especialmente nos momentos de cansaço, insegurança e preocupação. Agradeço também a Gislaine Olivia e Iamê Claudino pelas palavras de apoio, pelo carinho e pelo incentivo ao longo desta trajetória.

Aos meus amigos, que compartilharam comigo os desafios, os aprendizados e as conquistas ao longo da graduação, deixo meu carinho e minha sincera gratidão. Em especial, agradeço a Milton Costa, Dener dos Anjos, Lanita Ramalho, Bárbara Maria, Mayele Lacerda, Bruna Ribeiro, Giovana de Paula, Marcos Nerys, Joyce Mendes e Sabriana Mendes por terem tornado esta jornada mais alegre, humana e especial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Fernandes Dutra, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Filipe Altoé Temporim, agradeço pela orientação, pela disponibilidade, pela paciência, pela confiança e por todas as contribuições que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Geologia (DEGEO), agradeço pelos conhecimentos compartilhados em sala de aula e em campo, pela dedicação ao ensino e por contribuírem de forma tão significativa para a minha formação acadêmica.

Por fim, estendo minha gratidão aos demais colegas e a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada e contribuíram para a conclusão de uma etapa tão importante da minha vida. Levo comigo não apenas os conhecimentos adquiridos, mas também as lembranças, os vínculos e os aprendizados construídos ao longo desses anos.

RESUMO

A Província Carajás, localizada no sudeste do Cráton Amazônico, representa uma das principais províncias metalogenéticas do Brasil, hospedando importantes depósitos de cobre, ouro e níquel. Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização geológica-geofísica da porção oeste da Província Carajás, com foco na identificação de parâmetros aplicáveis à vetorização mineral de depósitos IOCG e de níquel hidrotermal. A área de estudo abrange os depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera, inseridos em um contexto geológico marcado pela transição entre os domínios Carajás e Rio Maria, zonas de cisalhamento regionais, rochas do embasamento arqueano, granitoides, rochas máfico-ultramáficas e formações ferríferas bandadas. A metodologia envolveu a integração de dados geológicos e aerogeofísicos, com ênfase em magnetometria e gamaespectrometria. Nos dados magnetométricos, foram utilizados produtos de realce, como a Amplitude Total do Gradiente (TGA) e o Ângulo de Inclinação do Gradiente Horizontal (TAHG), visando à identificação de fontes magnéticas e lineamentos magnéticos. Nos dados gamaespectrométricos, foram analisadas as razões K/eTh e eU/eTh , o Fator F e a composição ternária RGB, com o objetivo de reconhecer variações radiométricas associadas à litologia e à alteração hidrotermal. Os resultados indicaram anomalias magnéticas positivas associadas aos depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera, além de lineamentos com direções preferenciais E-W, NE-SW, N-S e NW-SE. A direção E-W mostrou-se predominante e relacionada principalmente aos depósitos Jaguar e Boa Esperança, enquanto as direções NE-SW e E-W apresentaram relação importante com o depósito Pantera. Os mapas gamaespectrométricos evidenciaram assinaturas distintas entre os depósitos. Jaguar apresentou maior expressão da razão K/eTh e baixos valores de eU/eTh e do Fator F. Boa Esperança apresentou K/eTh moderado e elevados valores de eU/eTh e do Fator F, enquanto Pantera apresentou valores elevados desses três parâmetros. A integração dos resultados permitiu reconhecer áreas favoráveis à vetorização mineral, especialmente nas regiões onde há sobreposição entre anomalias magnéticas, lineamentos magnéticos estruturais, anomalias radiométricas e unidades litológicas favoráveis. Assim, este trabalho reforça a importância da integração geológico-geofísica na identificação de alvos prospectivos e contribui para a compreensão das assinaturas geofísicas associadas aos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal no oeste da Província Carajás.

Palavras-chave: geofísica; alteração hidrotermal; lineamentos magnéticos; sistema mineral; vetorização mineral.

ABSTRACT

The Carajás Province, located in the southeastern portion of the Amazonian Craton, is one of Brazil's most important metallogenic provinces, hosting significant copper, gold, and nickel deposits. This study aimed to conduct a geological and geophysical characterization of the western Carajás Province, focusing on the identification of parameters applicable to the mineral vectoring of IOCG and hydrothermal nickel deposits. The study area encompasses the Jaguar, Boa Esperança, and Pantera deposits, situated within a geological setting marked by the transition between the Carajás and Rio Maria domains, regional shear zones, Archean basement rocks, granitoids, mafic-ultramafic rocks, and banded iron formations. The methodology involved the integration of geological and airborne geophysical data, with emphasis on magnetometry and gamma-ray spectrometry. Magnetometric data enhancement products, including the Total Gradient Amplitude (TGA) and the Tilt Angle of the Horizontal Gradient (TAHG), were used to identify magnetic sources and magnetic lineaments. Gamma-ray spectrometric data included the analysis of the K/eTh and eU/eTh ratios, the F Factor, and the RGB ternary composition to recognize radiometric variations associated with lithology and hydrothermal alteration. The results revealed positive magnetic anomalies associated with the Jaguar, Boa Esperança, and Pantera deposits, as well as magnetic lineaments with preferential E–W, NE–SW, N–S, and NW–SE orientations. The E–W direction was predominant and mainly associated with the Jaguar and Boa Esperança deposits, whereas the NE–SW and E–W directions showed an important relationship with the Pantera deposit. Gamma-ray spectrometric maps revealed distinct signatures among the deposits. Jaguar exhibited a stronger expression of the K/eTh ratio and low eU/eTh and F Factor values. Boa Esperança displayed moderate K/eTh values and high eU/eTh and F Factor values, whereas Pantera exhibited high values for all three parameters. The integration of the results allowed the identification of areas favorable for mineral vectoring, particularly where magnetic anomalies, structural magnetic lineaments, radiometric anomalies, and favorable lithological units overlap. Therefore, this study highlights the importance of integrating geological and geophysical data for the identification of prospective exploration targets and contributes to the understanding of the geophysical signatures associated with IOCG and hydrothermal nickel deposits in the western Carajás Province.

Keywords: geophysics; hydrothermal alteration; magnetic lineaments; mineral system; mineral vectoring

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos depósitos com os produtos magnetométricos e gamaespectrométricos.	37
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da área de estudo com a localização dos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal.....	7
Figura 2 - Províncias geocronológicas e domínios tectônicos do Cráton Amazônico.	10
Figura 3 - Susceptibilidade magnética de algumas rochas.	20
Figura 4 - Mapa da amplitude total do gradiente (TGA) com a localização dos depósitos IOCG e HNi da área de estudo.	25
Figura 5 - Mapa do filtro TAHG com os lineamentos magnéticos interpretados. As direções dos lineamentos são mostradas no diagrama roseta com as três famílias principais.....	26
Figura 6 - Mapa gamaespectrométrico da razão eU/eTh com a localização dos depósitos hidrotermais.	28
Figura 7 - Mapa gamaespectrométrico da razão K/eTh com a localização dos depósitos hidrotermais.	29
Figura 8 - Mapa radiométrico do Fator F na área de estudo.	30
Figura 9 - Mapa da composição dos canais gamaespectrométricos em ternário RGB.	31
Figura 10 - Ternários das áreas com potencial alteração hidrotermal mapeada em K/eTh (vermelho), Fator F (verde) e eU/eTh (azul).	38
Figura 11 - Mapa de anomalias magnéticas com os depósitos hidrotermais e os lineamentos magnéticos.	39

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
1.1.	APRESENTAÇÃO	5
1.2.	OBJETIVO	7
1.3.	JUSTIFICATIVA	8
1.4.	MATERIAIS E MÉTODOS	8
2.	GEOLOGIA REGIONAL DA PROVÍNCIA CARAJÁS	10
2.1.	GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	12
2.2.	REVISÃO SOBRE OS DEPÓSITOS IOCG E HNi	15
3.	AEROGEOFÍSICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL	19
3.1.	MÉTODO MAGNETOMÉTRICO	19
3.2.	GAMAESPECTROMETRIA	21
4.	RESULTADOS	24
4.1.	MAGNETOMETRIA	24
4.1.1.	Amplitude Total do Gradiente (TGA)	24
4.1.2.	Lineamentos magnéticos	25
4.2.	GAMAESPECTROMETRIA	27
4.2.1.	Mapa de eU/eTh	27
4.2.2.	Mapa de K/eTh	28
4.2.3.	Mapa de Fator F	29
4.2.4.	Mapa RGB	30
5.	DISCUSSÃO	32
5.1.	ANÁLISE DOS MAPAS MAGNETOMÉTRICOS	32
5.2.	ANÁLISE DA ALTERAÇÃO HIDROTERMAL	35
5.3.	VETORIZAÇÃO MINERAL DOS DEPÓSITOS DE NÍQUEL E COBRE HIDROTERMAIS	37
6.	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

A prospecção geofísica é amplamente utilizada na exploração mineral, com ênfase no mapeamento geológico e na identificação de ambientes favoráveis à mineralização (Dentith e Mudge, 2014). Durante a exploração de recursos minerais, a geofísica auxilia na delimitação e avaliação de recursos minerais, bem como no processo de acesso e extração do minério (Dentith e Mudge, 2014). Com o passar dos anos, a utilização da geofísica na prospecção de novos depósitos minerais passou por expressivos avanços, impulsionados pelo aprimoramento das técnicas de aquisição e processamento de dados, pela incorporação de tecnologias mais modernas e pela crescente aplicação de modelagens numéricas em duas e três dimensões. Esses avanços permitiram representar, com maior precisão, cenários geológicos complexos e aprimoraram a resolução dos modelos interpretativos (Airo, 2015).

Atualmente, cinco métodos geofísicos são amplamente empregados na exploração mineral: gravimetria, magnetometria, radiometria, sísmica e métodos eletromagnéticos. Esses métodos contribuem para a caracterização de feições geológicas associadas a processos hidrotermais, contatos litológicos e estruturas em superfície e subsuperfície, que podem hospedar mineralizações ou funcionar como condutos para a circulação de fluidos mineralizantes (Dentith e Mudge, 2014).

A Província Carajás (PC) é uma das regiões metalogenéticas mais importantes do mundo, com depósitos significativos de Cu-Au, Au-EGP, Fe, Ni, Cr, Mn e Sn-W. A PC localiza-se no sudeste do Cráton Amazônico e corresponde a um núcleo arqueano delimitado, ao norte, pelo Domínio Bacajá; a oeste, pelo Domínio Iriri-Xingu, representado por sequências plutônicas e vulcânicas paleoproterozoicas; ao sul, pelo Domínio Santana do Araguaia; e, a Leste, pela Faixa Araguaia, de idade neoproterozoica e direção N-S (Vasquez e Rosa-Costa, 2008; Silva *et al.*, 2023). Estruturalmente, a província é formada principalmente por dois domínios tectônicos arqueanos: Carajás, ao norte, e Rio Maria, ao sul, separados por uma ampla zona de cisalhamento de direção E-W (Vasquez *et al.*, 2008; Melo *et al.*, 2019). O limite entre esses domínios é pouco definido e situa-se aproximadamente ao norte do Cinturão de *Greenstone* Sapucaia (Feio *et al.*, 2013). Esses domínios apresentam evolução tectônica contrastante, evidenciada por suas características litológicas e metalogenéticas distintas (Monteiro *et al.*, 2014).

Dentre os depósitos mais importantes da PC, destacam-se aqueles associados ao ferro, cobre e níquel de classe mundial. Os depósitos de cobre são classificados como do tipo óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG, *iron oxide copper-gold deposit*). O níquel, por sua vez, ocorre tanto em mineralizações sulfetadas e em depósitos lateríticos desenvolvidos sobre complexos máfico-ultramáficos quanto em descobertas recentes de mineralizações hidrotermais nos depósitos Jaguar e GT-34 (Monteiro *et al.*, 2014; Siepierski, 2008; Ferreira Filho *et al.*, 2021).

Os depósitos de níquel hidrotermal (HNi), assim como os depósitos IOCG, são envolvidos por zonas de alteração hidrotermal potássica (biotita) e cálcico-férrica (anfibólio-magnetita), cujas mineralizações são estruturalmente controladas por zonas de cisalhamento (Ferreira Filho *et al.*, 2021).

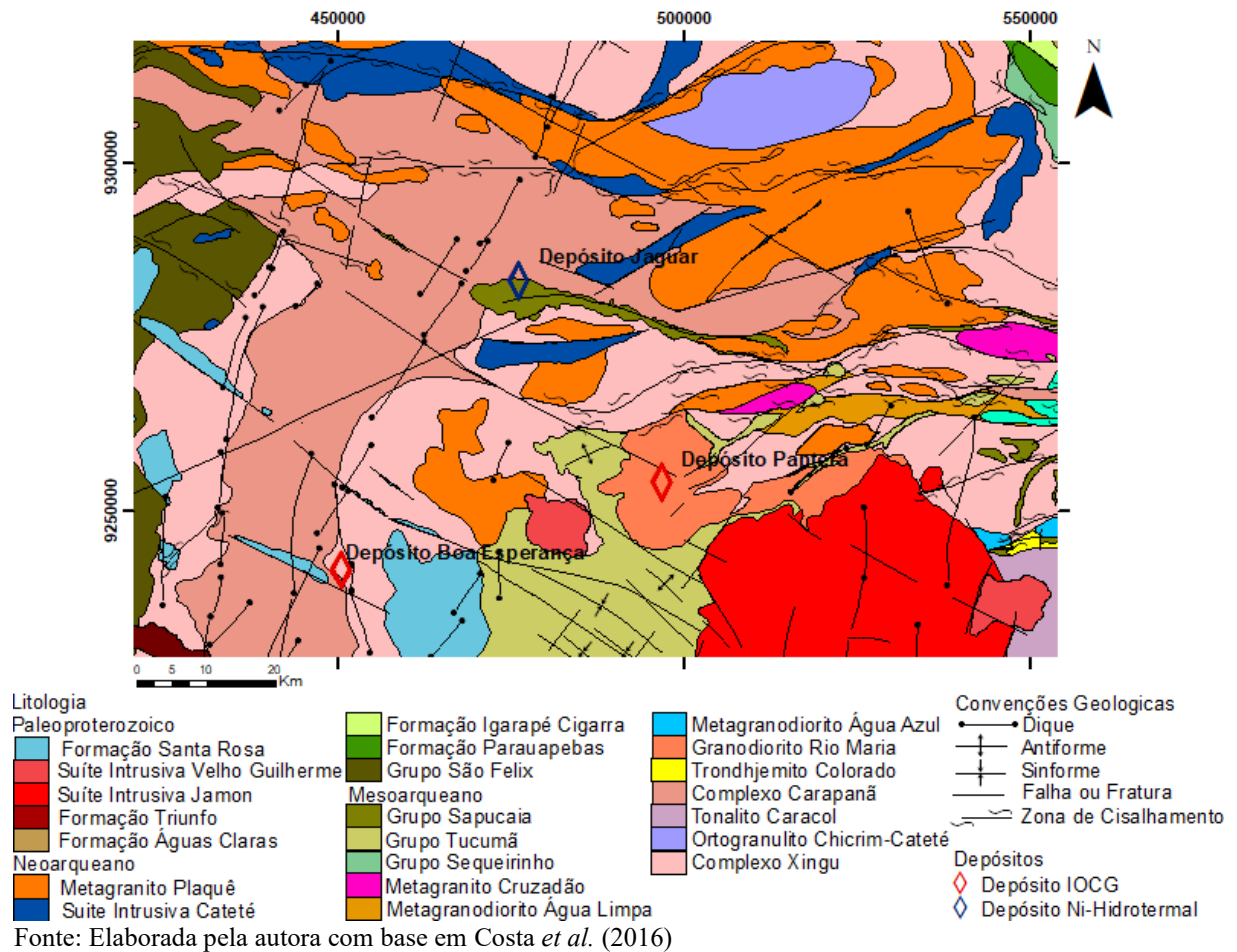
Diante desse cenário, a magnetometria permite reconhecer anomalias associadas à presença de minerais magnéticos, especialmente a magnetita, além de auxiliar no mapeamento de falhas, contatos litológicos e zonas de cisalhamento (Ferreira *et al.*, 2013). A gamaespectrometria, por sua vez, possibilita identificar variações nas concentrações de potássio, urânio e tório, contribuindo para a delimitação de possíveis zonas de alteração hidrotermal (Montreuil *et al.*, 2016). A integração desses dados com as informações geológicas pode, portanto, fornecer parâmetros úteis para a vetorização mineral e para a definição de áreas favoráveis à ocorrência de depósitos IOCG e HNi.

Apesar da relevância econômica dessas mineralizações, ainda é necessário compreender de que maneira suas assinaturas geofísicas se relacionam com os controles litológicos, estruturais e hidrotermais na porção oeste da Província Carajás. Dessa forma, este trabalho busca responder ao seguinte problema, como a integração de dados magnetométricos e gamaespectrométricos permite reconhecer padrões associados aos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal e contribuir para a identificação de novas áreas favoráveis à mineralização.

Parte-se da hipótese de que a presença de minerais magnéticos, especialmente magnetita, os processos de alteração hidrotermal e o controle exercido por falhas e zonas de cisalhamento produzem assinaturas magnetométricas e gamaespectrométricas específicas. Assim, a integração desses dados com as informações geológicas pode auxiliar na caracterização dos depósitos IOCG e HNi na definição de parâmetros aplicáveis à vetorização mineral.

A área de estudo abrange o depósito HNi Jaguar e os depósitos IOCG Boa Esperança e Pantera. Localiza-se na porção sudoeste do Domínio Carajás, próxima ao contato com o Domínio Rio Maria (FIG. 1), e ocorre ao longo da interseção entre o sistema de falhas Canaã, com direção WNW–ESE, e a Falha McCandless, de direção NE–SW.

Figura 1 - Mapa geológico da área de estudo com a localização dos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal.



1.2. OBJETIVO

O objetivo principal do projeto é realizar a caracterização geológica-geofísica na porção sudoeste da PC, visando à identificação de parâmetros úteis para a exploração mineral de depósitos IOCG e HNi, seguindo as etapas de:

- Mapear estruturas geológicas em superfície e em profundidade por meio da avaliação de técnicas de realce (*edge enhancement*) dos dados aeromagnéticos.
- Mapear áreas potencialmente hidrotermalizadas por meio dos dados gamaespectrométricos.
- Integrar os dados geofísicos e geológicos sob a ótica do conceito de sistema mineral, a fim de avaliar a assinatura geofísica dos depósitos de cobre e níquel hidrotermal conhecidos e propor novos parâmetros para a vetorização mineral.

1.3. JUSTIFICATIVA

Os esforços globais pela transição energética demandam uma atuação integrada e intensiva entre academia e indústria, especialmente na vetorização mineral de elementos estratégicos, como cobre e níquel, devido às suas inúmeras aplicações tecnológicas (Dutra *et al.*, 2023). No Brasil, os depósitos do tipo IOCG constituem as principais fontes de cobre conhecidas (Juliani *et al.*, 2016).

Entretanto, as iniciativas voltadas à vetorização mineral ainda se concentram predominantemente na porção leste da PC, enquanto o segmento sudoeste, onde se situam os depósitos Jaguar (HNi), Boa Esperança (IOCG) e Pantera (IOCG), permanece subexplorado (Ferreira Filho *et al.*, 2021).

Considerando as semelhanças geológicas entre os depósitos IOCG e HNi, especialmente no que se refere ao controle estrutural e à presença de zonas de alteração hidrotermal, torna-se promissora a aplicação de uma análise sistemática de dados aerogeofísicos, como magnetometria e gamaespectrometria, para a identificação de *footprints* característicos que orientem a vetorização mineral (Ferreira Filho *et al.*, 2021). A compreensão das assinaturas geofísicas associadas a esses depósitos, assim como das estruturas tectônicas que os controlam, é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de exploração mais eficazes, contribuindo para a descoberta de novas áreas potenciais de cobre e níquel. Tais avanços são estratégicos para posicionar o Brasil como ator relevante no cenário internacional da mineração verde, voltada para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

1.4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados neste projeto foram organizados em quatro etapas principais:

- 1) **Revisão bibliográfica:** A revisão bibliográfica foi realizada de forma contínua ao longo do desenvolvimento do projeto, com o objetivo de embasar teoricamente as etapas metodológicas e interpretar os dados de forma coerente com o conhecimento geocientífico atual. Foram consultadas fontes como artigos científicos, dissertações, teses, livros, além de dados disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil. A revisão abordou temas relacionados ao contexto da geofísica aplicada à prospecção mineral, técnicas de interpretação de dados magnetométricos e gamaespectrométricos, bem como aspectos da geologia regional das províncias Carajás e Rio Maria. Essa etapa teve como finalidade contextualizar o estudo no

âmbito dos avanços científicos da área, identificar lacunas no conhecimento e auxiliar na definição dos parâmetros de análise utilizados nas etapas seguintes da pesquisa.

2) Base de dados aerogeofísicos: Os dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos foram obtidos dos levantamentos Oeste de Carajás (Projeto 1125) e Rio Maria (Projeto 1129), disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Os levantamentos foram realizados com linhas de voo N–S espaçadas em 500 m, linhas de controle E–W espaçadas em 10 km e altura nominal de voo de aproximadamente 100 m. A aeromagnetometria mede variações do campo magnético terrestre relacionadas ao contraste de suscetibilidade magnética das rochas, enquanto a aerogamaespectrometria detecta a radiação gama natural emitida pelos radioelementos K, eU e eTh, permitindo identificar variações litológicas e possíveis zonas de alteração hidrotermal.

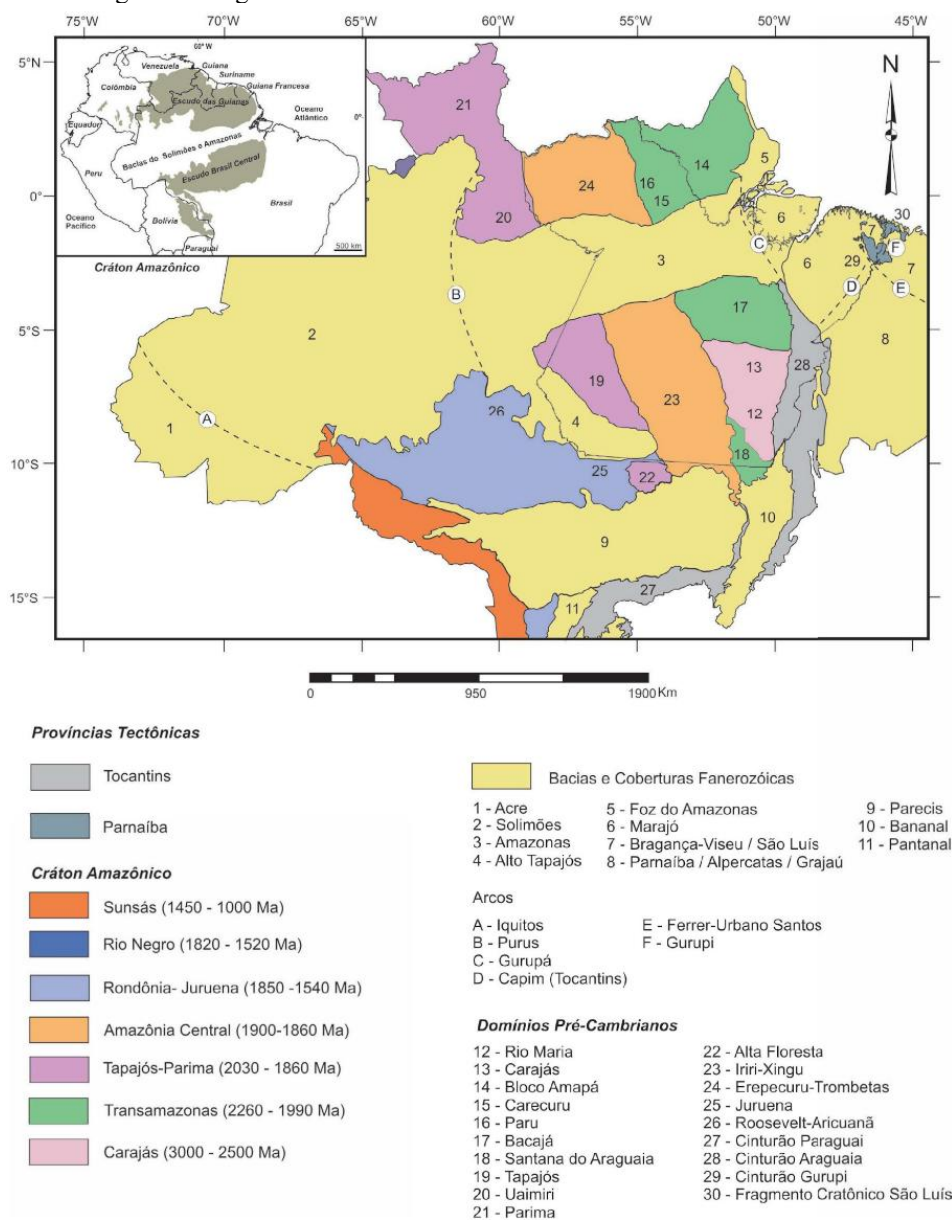
3) Pré-processamento e processamento: Os dados aeromagnéticos foram interpolados pelo método bidirecional, enquanto os grids aerogamaespectrométricos foram gerados por interpolação de curvatura mínima. Em ambos os casos, os dados foram interpolados em uma malha regular de 100 m usando o Oasis montaj. O filtro da Amplitude Total do Gradiente (TGA) foi aplicado no grid de campo magnético anômalo para realçar contrastes de suscetibilidade magnética e delimitar corpos magnéticos. Também foi utilizado o filtro do Ângulo de Inclinação do Gradiente Horizontal (TAHG), empregado no mapeamento de lineamentos estruturais. Para os dados gamaespectrométricos, foram gerados mapas das razões eU/eTh e K/eTh, do Fator F e da composição ternária RGB, utilizados na identificação de possíveis zonas de alteração hidrotermal.

4) Etapa exploratória: Os produtos magnetométricos e gamaespectrométricos foram integrados ao mapa geológico regional no software QGIS. A interpretação concentrou-se na correlação entre anomalias geofísicas, lineamentos estruturais, unidades litológicas e os depósitos conhecidos da área: Jaguar (HNi), Boa Esperança (IOCG) e Pantera (IOCG), permitindo definir parâmetros aplicáveis à vetorização mineral.

2. GEOLOGIA REGIONAL DA PROVÍNCIA CARAJÁS

A PC está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, sendo limitada, ao norte, pelo Domínio Bacajá; a oeste, pelo Domínio Iriri-Xingu; ao sul, pelo Domínio Santana do Araguaia; e, a leste, pela Faixa Araguaia. A PC é constituída por dois domínios tectônicos arqueanos, Domínio Carajás e Domínio Rio Maria (FIG. 2), que foram diferenciados por possuírem características litológicas, estruturais e metalogenéticas contrastantes e apresentarem evoluções crustais diferentes (Vasquez *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2012; Motta *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2020).

Figura 2 - Províncias geocronológicas e domínios tectônicos do Cráton Amazônico.



Fonte: Adaptado de Vasquez *et al.* (2008)

O Domínio Rio Maria está situado na porção sul da PC e é constituído por granitoides pertencentes às suítes tonalito-trondhjemitó-granodioríticas (TTG), de idades entre 2,98 e 2,93 Ga e ca. 2,86 Ga (Almeida *et al.*, 2011; Leite *et al.*, 2004; Macambira e Lancelot, 1996; Rolando e Macambira, 2003), sanukitoides de ca. 2,87 Ga (Macambira e Lancelot, 1996; Oliveira *et al.*, 2011), circundados por uma sequência do tipo *greenstone belt*, com idades de ca. 3,0–2,9 Ga, agrupadas nos supergrupos Sapucaia e Andorinhas (Macambira e Lafon, 1995; Souza *et al.*, 2001; Costa *et al.*, 2020). Essa associação é interpretada como um típico terreno granito-*greenstone* arqueano (Vasquez *et al.*, 2008). Essa sequência é seccionada por suítes granitoides de 2,87–2,86 Ga, que incluem leucogranodioritos, leucogranitos potássicos e monzogranitos com anfibólio e biotita (Almeida *et al.*, 2011; Leite *et al.*, 2004; Costa *et al.*, 2020). Além dessas unidades, ocorrem complexos máfico-ultramáficos de ca. 2,97 Ga (DOCEGEO, 1988) e uma ampla variedade de granitoides anorogênicos orosirianos (ca. 1,88 Ga) (e.g., granitos Jamon e Musa; Machado *et al.*, 1991; Dall'Agnol *et al.*, 1999).

O Domínio Carajás apresenta um embasamento mesoarqueano reunido no Complexo Xingu e em unidades correlatas, sobre o qual se desenvolveram unidades supracrustais neoarqueanas da Bacia Carajás (Vasquez *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2012). O Complexo Xingu é composto por gnaisses tonalíticos a trondhjemiticos e migmatitos, com idade de 3066 Ma, e pelo Complexo Pium, formado por ortogranulitos máficos a félsicos, com idade de 3002 Ma. Essas unidades registram eventos metamórficos de alto grau, com idades em torno de 2,86 Ga (Machado *et al.*, 1991; Pidgeon *et al.*, 2000; Silva, 2014).

O embasamento é sobreposto por sequências metavulcanossedimentares neoarqueanas, representadas principalmente pelo Supergrupo Itacaiúnas, com idade entre 2,76 e 2,73 Ga, e pelo Grupo Rio Novo, localizado no setor nordeste da província (Hirata *et al.*, 1982; Machado *et al.*, 1991; Trendall *et al.*, 1998). O Supergrupo Itacaiúnas é constituído por rochas metavulcânicas bimodais, metassedimentares e FFB, enquanto o Grupo Rio Novo inclui anfíbolitos, xistos, metagrauvas, rochas metavulcânicas toleíticas e gabros (DOCEGEO, 1988; Machado *et al.*, 1991; Moreto *et al.*, 2015).

Complexos máfico-ultramáficos de idade próxima a 2,76 Ga cortam as unidades anteriores e incluem a intrusão acamadada Luanga e a Suíte Intrusiva Cateté (Lafon *et al.*, 2000; Macambira e Tassinari, 1998; Mansur e Ferreira Filho, 2016; Teixeira *et al.*, 2015). Além disso, granitoides neoarqueanos registram três eventos de magmatismo félsico: i) entre 2,76 e 2,74 Ga, interpretados como sincolisionais (Barros *et al.*, 2004; Feio *et al.*, 2013; Moreto *et al.*, 2015); ii) entre 2,57 e 2,53 Ga, que correspondem a granitoides peralcalinos e metaluminosos; e iii)

em 1,88 Ga, associados a granitos pós-orogênicos, alcalinos a subalcalinos (Machado *et al.*, 1991; Lindenmayer e Teixeira, 1999; Tallarico, 2003).

Por fim, espessos depósitos glaciogênicos, marinhos e siliciclásticos recobrem parcialmente as unidades do Supergrupo Itacaiúnas e do Grupo Rio Novo. Essas sequências sedimentares apresentam idade paleoproterozoica e são reunidas nas formações Águas Claras, azul e Gorotire (Nogueira *et al.*, 1995; Araújo Filho *et al.*, 2020).

A estruturação do Domínio Carajás é controlada por três grandes zonas de cisalhamento transcorrentes: as zonas de cisalhamento Cinzento e Carajás, ao norte, que estiveram ativas entre ca. 2,7 e 2,5 Ga, e a Zona de Cisalhamento Canaã, ao sul (Pinheiro *et al.*, 2013). Juntas, elas formam uma geometria sigmoidal, descontínua e anastomosada de falhas, com direção geral E–W a ESE–NNW, influenciadas pela orientação da antiga Zona de Cisalhamento Itacaiúnas (ca. 2,8 Ga), de alto grau e direção E–W, formada nas rochas do embasamento mesoarqueano (Holdsworth e Pinheiro, 2000). Alguns autores, no entanto, argumentam que essas zonas de cisalhamento são paralelas ao plano axial de dobras E–W, como parte de um sistema de dobras achatadas sob compressão N–S (Rosière *et al.*, 2006).

Durante o Neoarqueano, as rochas do Supergrupo Itacaiúnas sofreram metamorfismo dinâmico sob a influência dessas zonas de cisalhamento, de baixo grau na porção central do cinturão (Grupo Grão Pará) e de médio a alto grau na porção norte, próximo à Zona de Cisalhamento Cinzento, afetando principalmente os grupos Igarapé Salobo e Igarapé Pojuca (DOCEGEO, 1988; Olszewski *et al.*, 1989).

Posteriormente à deposição do Supergrupo Itacaiúnas, essas zonas de cisalhamento passaram por várias fases de reativação de transpressão destrai (Domingos, 2009; Holdsworth e Pinheiro, 2000), o que permitiu a preservação das sequências metavulcanossedimentares em dobras e deslocamentos ao longo das zonas de falha (Holdsworth e Pinheiro, 2000). Um período subsequente de reativação sinistral e inversão tectônica, entre 2,7 e 2,6 Ga, foi responsável pela foliação E–W amplamente observada na região (Holdsworth e Pinheiro, 2000).

2.1. GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo localiza-se na transição entre os domínios Rio Maria e Carajás. As idades das unidades variam do Mesoarqueano ao Paleoproterozoico. A seguir, são apresentados, em ordem geocronológica, os principais aspectos litológicos dessas unidades (FIG. 1).

O Complexo Xingu constitui o embasamento arqueano da área de estudo. É composto predominantemente por rochas gnáissicas e migmatitos de coloração cinza-clara a escura, exibindo estruturas que variam de foliadas a bandadas (Macambira, 1997). Sua composição mineralógica principal inclui plagioclásio, quartzo, microclina e biotita, com ocorrências localizadas de hornblenda e muscovita. Quimicamente, apresenta natureza tonalítica a granodiorítica (Macambira, 1997). O Complexo Chicrim-Cateté, é constituído por ortogranulito charnockítico a enderbítico, anteriormente essa unidade era associada ao Complexo Pium (Hirata *et al.*, 1982; Araújo *et al.*, 1988; Araújo e Maia, 1991). Pidgeon *et al.* (2000) obtiveram idade de cristalização de 3,0 Ga e metamorfismo do protólito ígneo do Complexo Pium com 2,86 Ga.

As suítes tonalíticas-trondhjémíticas arqueanas (Feio *et al.*, 2013) apresentam assinatura geoquímica sanukitoide e TTG (granodioritos Rio Maria, Água Limpa, Água Azul, Trondhjemito Colorado e Tonalito Caracol), enquanto as unidades graníticas reúnem rochas com afinidade transicional (Granito Cruzadão) (Rolando e Macambira 2003, Leite *et al.*, 2004, Macambira e Lancelot, 1996; Vasquez *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2009; Gabriel, 2012; Feio *et al.*, 2013). O Granodiorito Rio Maria possui afinidade sanukitoide, sendo constituído por granito e granodiorito leucocráticos a mesocráticos (Leite e Dall'Agnol, 1994; Oliveira *et al.*, 2010; Barbosa *et al.* 2017; Murray *et al.*, 2021). Frequentemente, estas rochas encontram-se intensamente deformadas e metamorfizadas na fácies anfibolito (Barbosa *et al.*, 2017; Murray *et al.*, 2021). Já os granodioritos Água Azul e Água Limpa apresentam granodiorito biotita-anfibólio, acompanhado de granodiorito biotita e granodiorito biotita-anfibólio (Gabriel, 2012).

O Trondhjemito Colorado é composto por tonalito/trondhjemitos com biotita, com granodioritos subordinados, essas rochas apresentam afinidade geoquímica com a suíte TTG (Costa *et al.*, 2016), mas podem ser encontrados sanukitoides de 2,88 Ga, que incluem os granodioritos Água Azul e Água Limpa (Gabriel, 2012). Já o Tonalito Caracol é constituído por tonalito e trondhjemitos com foliação penetrativa (Leite *et al.*, 2004; Oliveira, 2017).

O Complexo Carapanã é composto por granodiorito e tonalito (Costa *et al.*, 2016). O Granito Cruzadão apresenta bandamento com intercalações de bandas de composição granítica e tonalítica (Feio *et al.*, 2013).

O Grupo Sequeirinho (Siepierski e Ferreira Filho, 2016) representa as supracrustais mesoarqueanas no Domínio Carajás. Ele representa um cinturão de *greenstone belts* mesoarqueanos, composto por rochas metavulcânicas máficas-ultramáficas, representadas por komatiitos e basaltos com textura do tipo spinifex, associadas a metadacitos.

Os grupos Tucumã, Sapucaia e São Félix são formados por rochas metaultramáficas, metamáficas, associadas a metavulcânicas ácidas subordinadas e metassedimentares, com diferentes graus de deformação (Macambira e Vale, 1997). As rochas metaultramáficas e metamáficas são representadas por anfíbolitos e clorita xistos, metabasaltos e serpentinitos; a sequência metassedimentar é formada por metarenitos, metarcóseos, metagrauvacas, filitos ferruginosos, xistos micáceos, quartzitos e formações ferríferas bandadas (Araújo e Maia 1991; Macambira e Vale, 1997; Santos e Pena Filho, 2000; Vasquez *et al.*, 2008). Trabalhos geocronológicos sugerem idades entre 3,0 Ga e 2,86 Ga para esses grupos (Avelar *et al.* 1999; Vasquez *et al.*, 2008). O Grupo Grão Pará é constituído por metabasaltos, rochas metavulcânicas félsicas e jaspilitos que hospedam os importantes depósitos de ferro em Carajás (DOCEGEO, 1988). Na área de estudos, o Grupo Grão Pará é representado pelas formações Parauapebas e Igarapé Cigarra.

A Formação Parauapebas (Meireles *et al.*, 1984) é constituída por rochas máficas vulcânicas, que ocorrem na base e no topo da Formação Carajás, e envolve a derrames basálticos associados a rochas vulcânicas félsicas subordinadas e a intrusões máficas; com classificações variadas de basaltos, basaltos andesíticos, andesitos, andesitos basálticos, traquiandesitos, dacitos, quartzo dioritos, dioritos e gabros (Gibbs *et al.* 1986, Olszewski *et al.* 1989, Araújo *et al.* 1991, Lindenmayer *et al.* 1994, 2005, Teixeira *et al.* 1997, Huhn *et al.* 1999b, Meirelles e Dardenne 1991, Macambira 2003, Silva *et al.* 2005, Zucchetti 2007). A Formação Igarapé Cigarra é constituída por metavulcânicas ácidas e metassedimentares clásticas (Macambira *et al.*, 1990), divididas em basaltos com intercalações de tufos, sedimentos clásticos, como quartzo-*wackes* e quartzo-arenitos, além de sedimentos químicos, como formações ferríferas bandadas e chert.

O magmatismo máfico e ultramáfico neoarqueano na área é representado pela Suíte Intrusiva Cateté. Ela é constituída por corpos máficos a ultramáficos dispostos em corpos alongados e alinhados preferencialmente segundo E-W e N-S, que intrudem diferentes unidades arqueanas como o Complexo Xingu, o Granito Plaquê e o Grupo São Félix, descritas anteriormente (Macambira e Vale, 1997; Vasquez *et al.*, 2008). As rochas que compõem essa unidade são gabros, noritos, piroxenitos, serpentinitos e peridotitos, geralmente de granulação média, equigranulares, e sem evidências de deformação e metamorfismo (Macambira e Vale, 1997). Lafon *et al.* (2000) obtiveram uma idade de 2766 ± 6 Ma (U-Pb SHRIMP) para gabros na região, que é significativamente mais velha que a idade de isócrona de Sm-Nd de 2378 Ma obtida por Macambira e Tassinari (1998), interpretada pelos autores como idade mínima de cristalização. A granitogênese neoarqueana da área é representada pelo Metagranito Plaquê

(2,73 Ga; Avelar, 1996) e é composta por moscovita-biotita leucogranitos com assinatura metaluminosa a peraluminosa que ocorrem como corpos estratoides alongados na direção E-W, similares à estruturação dos gnaisses do Complexo Xingu (Araújo *et al.*, 1988; Jorge João e Araújo, 1992).

Não foram descritas rochas neoarqueanas na porção do Domínio Rio Maria dentro da área de estudo. As rochas paleoproterozoicas são representadas pela suíte intrusiva Jamon, que contempla granitos anorogênicos de 1,88 Ga que ocorrem no Domínio Rio Maria (Machado *et al.* 1991, Dall'Agnol *et al.* 1999), esses granitos ocorrem como corpos intrusivos em diversas unidades do domínio, eles podem formar corpos circunscritos e alongados, com contornos irregulares a aspecto isotrópico (Vasquez *et al.*, 2008). Em mapas aerogeofísicos podem se apresentar como anomalias expressivas.

As sequências sedimentares são representadas pelas Formações Águas Claras e Triunfo. A Formação Águas Claras é formada por um membro inferior composto por pelitos, siltitos e arenitos finos. São encontradas estruturas como laminação plano-paralela, estratificação cruzada *hummocky*, marcas onduladas e de sobrecarga, que sugerem uma plataforma marinha influenciada por tempestades. O membro superior é formado por arenitos finos a grossos, ortoconglomerados e pelitos com estratificação do tipo plano-paralela, cruzada acanalada, *hummocky* e tabular, essa associação é interpretada como depósitos costeiros que migram para fluviais entrelaçados, nas porções mais superiores (Nogueira *et al.*, 1995; Vasquez *et al.* 2008). Araújo e Nogueira (2019) estimam sua idade de deposição para a Formação Águas Claras entre a idade da mineralização IOCG hospedada na Formação Igarapé Bahia (unidade sotoposta), ca. 2575 Ma (Tallarico *et al.*, 2005) e a idade mínima de deposição da Formação Águas Claras (unidade sobreposta), ca. 2060 Ma (Mougeot *et al.*, 1996; Fabre *et al.*, 2011). Já a Formação Triunfo, ainda carece de estudos mais detalhados. Essa unidade é descrita principalmente no Domínio Iriri-Xingu, sendo constituída por arenito e conglomerado (Vasquez *et al.*, 2008).

2.2. REVISÃO SOBRE OS DEPÓSITOS IOCG E HNi

A PC concentra importantes depósitos IOCG e HNi. Ambos os tipos de depósitos estão associados às zonas de cisalhamento regionais e a complexos eventos magmáticos e hidrotermais. Eles são espacialmente distribuídos nos cinturões Norte e Sul do Cobre (Moreto *et al.*, 2015). Segundo Oliveira *et al.* (2025), os depósitos IOCG no Cinturão Norte do Cobre são controlados regionalmente por duas zonas de cisalhamento principais, a Zona de Cisalhamento Cinzento e a Zona de Cisalhamento Carajás, ambas com direção predominante

NW–SE. A Zona de Cisalhamento Carajás abriga alguns dos depósitos neoarqueanos do tipo IOCG mais conhecidos (e.g., Salobo, Igarapé Bahia-Alemão, Alvo GT-46, Paulo Afonso e Furnas) (Moreto *et al.*, 2015; Paula *et al.* 2024). No Cinturão Sul do Cobre, os depósitos IOCG (e.g., Sossego, Sequeirinho, Cristalino, Alvo 118, Castanha, Jatobá e Bacuri) estão normalmente associados às rochas metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas e às intrusões máficas e félsicas (Grainger *et al.*, 2008; Xavier *et al.* 2012, 2017; Schutesky e Oliveira, 2020).

Os depósitos IOCG possuem assinatura geoquímica marcada por altos teores de Fe-Cu-Au e de elementos terras raras (ETRs), além de enriquecimento em elementos como U, Co, Ni, Ag, Te e Bi (Xavier *et al.*, 2010). Sua geometria varia de corpos maciços concordantes a discordantes (Salobo; Souza e Vieira, 2000) a brechas e veios (Xavier *et al.*, 2012). A mineralogia do minério evidencia diferentes graus de sulfetação dos fluidos, como calcopirita-bornita em Salobo (Réquia *et al.*, 2003), calcopirita-digenita em Igarapé Bahia (Dreher *et al.*, 2008) e calcopirita-pirita em Sossego (Xavier *et al.*, 2012).

Na área de estudo ocorrem dois depósitos do tipo IOCG: Boa Esperança e Pantera (FIG. 2). O depósito Boa Esperança localiza-se no Domínio Rio Maria. A mineralização é hospedada predominantemente no Granito Boa Esperança (Murray *et al.*, 2021; Cassini *et al.*, 2025). Esse corpo granítico ocupa zonas de cisalhamento dúcteis, limitando-se lateralmente às rochas gnáissicas e migmatíticas mais antigas do Complexo Xingu (Murray *et al.*, 2021; Cassini *et al.*, 2025).

A alteração hidrotermal do depósito Boa Esperança caracteriza-se por um forte metassomatismo potássico sob controle estrutural, acompanhado de intenso metassomatismo de ferro, representado por magnetita em níveis profundos e hematita em níveis mais rasos (Henrique *et al.*, 2013; Murray *et al.*, 2021). A zona mineralizada inclui magnetita, quartzo, biotita, calcopirita, pirita e molibdenita subordinada, além de uma associação geoquímica de cobalto, intimamente ligada à estrutura mineral da pirita (Murray *et al.*, 2021). As zonas de alto teor de cobre ($\geq 1\%$) estão preferencialmente associadas à alteração com biotita-magnetita-(clorita) (Cassini *et al.*, 2025). A mineralização hipogênica consiste em uma série de zonas brechadas e veios controlados por estruturas de cisalhamento orientadas em N60°–70°E, apresentando uma geometria de cone invertido que mergulha abruptamente para sudeste (Murray *et al.*, 2021).

O depósito Pantera localiza-se ao longo da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás (FIG. 2). Esse depósito é hospedado no Granodiorito Rio Maria e em diques de diabásio, quartzo-diorito porfirítico e quartzo-feldspato pórfiro (Lopes, 2018).

As zonas de alteração hidrotermal no depósito Pantera apresentam disposição verticalizada e são fortemente controladas por zonas de cisalhamento, exibindo uma sequência que evolui de termos distais para proximais em relação à mineralização. A alteração mais distal é a sódico-cálcica, composta essencialmente por actinolita e albita, que progride para uma alteração cálcica, caracterizada pelo aumento substancial de actinolita e pela formação local de veios de apatita-actinolita de granulação grossa. Segue-se a alteração férrica-cálcica, caracterizada por intenso metassomatismo de ferro, com a formação de zonas ricas em magnetita e actinolita idiomórfica, frequentemente ocorrendo na forma de brechas hidrotermais. A fase mais próxima ao minério envolve alteração potássica e silicificação, composta pela assembleia de biotita, hastingsita e feldspato potássico, na qual a biotita hidrotermal comumente define a foliação milonítica penetrativa (Lopes, 2018).

A mineralização principal do depósito Pantera ocorre associada predominantemente à calcopirita, em zonas de minério tabulares hospedadas por uma zona de cisalhamento de alto ângulo (Lopes, 2018). Segundo Lopes (2018), o depósito Pantera apresenta mineralização de Cu-Au associada a diferentes formas de ocorrência, como brechas hidrotermais, veios, vênulas e disseminações controladas pela foliação milonítica. As zonas mineralizadas são compostas principalmente por magnetita, pirita e calcopirita. A mineralização ocorre preferencialmente em setores marcados por alteração potássica intensa, caracterizada pela presença de biotita, bem como em zonas silicificadas. Entre os estilos mineralizados, as brechas hidrotermais constituem o principal hospedeiro do minério, enquanto as disseminações ao longo da foliação indicam forte influência do controle estrutural. Já os veios e as vênulas ocorrem de forma subordinada, com menor representatividade no sistema mineralizado.

Além dos depósitos IOCG, a área de estudo apresenta o depósito Jaguar. As características geológicas reconhecidas nesse depósito indicam semelhanças com sistemas IOCG descritos na PC. Entre essas semelhanças, destacam-se a associação comum com sequências metavulcanossedimentares, a intensa alteração hidrotermal férrica-cálcica (magnetita-apatita), a localização ao longo de importantes sistemas de falhas (interseção dos sistemas Canaã e McCandless) e as brechas mineralizadas tardias (Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021).

O depósito Jaguar está estruturalmente relacionado ao sistema de falhas Canaã, próximo à interseção com a Falha McCandless, de direção NE–SW. O depósito Jaguar está hospedado em rochas subvulcânicas félsicas do Supergrupo Sapucaia, na porção sul, e em rochas granítico-gnáissicas da Suíte Plaquê e do Complexo Xingu, na porção norte. O depósito está localizado ao longo de zonas de alteração hidrotermal estruturalmente controladas por falhas regionais,

cuja orientação preferencial é WNW–ESE, em concordância com as principais estruturas regionais. As zonas mineralizadas encontram-se principalmente confinadas ao contato entre as rochas granítico-gnáissicas, ao norte, e as rochas subvulcânicas félsicas, ao sul (Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021).

O sistema de alteração hidrotermal no depósito Jaguar é composto por três assembleias principais: uma alteração precoce e pervasiva de biotita-clorita, uma alteração discreta de anfibólio-biotita e uma assembleia tardia de magnetita-apatita-quartzo (Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021). A zona de magnetita-apatita, que corta as assembleias anteriores, é estruturalmente controlada e apresenta cristais euédricos a subédricos de apatita e magnetita (Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021; Mansur *et al.*, 2023).

A mineralização ocorre em corpos lenticulares subverticais e descontínuos. O minério é classificado em dois tipos: o Tipo I, de baixo teor, ocorre disseminado ou em veios paralelos à foliação milonítica, dentro das zonas de biotita-clorita; o Tipo II, que apresenta teores mais altos, ocorre em corpos de brecha com matriz rica em sulfetos, magnetita e apatita. A assembleia de sulfetos é dominada por pirita e millerita, com quantidades subordinadas de pentlandita, calcopirita, pirrotita e esfalerita (Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021; Mansur *et al.*, 2023).

3. AEROGEOFÍSICA NA EXPLORAÇÃO MINERAL

3.1. MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

A magnetometria é um dos métodos geofísicos mais antigos utilizados na prospecção de minerais metálicos, sobretudo de minerais portadores de ferro. Ela é baseada na detecção de anomalias no campo magnético da Terra causadas por rochas em subsuperfície e superfície; seus produtos são mapas de anomalias magnéticas. Essas anomalias correspondem a variações na amplitude do campo magnético geradas por diferentes corpos magnéticos, em diferentes níveis da crosta, com geometrias e contrastes de suscetibilidade magnética distintos (Dentith e Mudge, 2014).

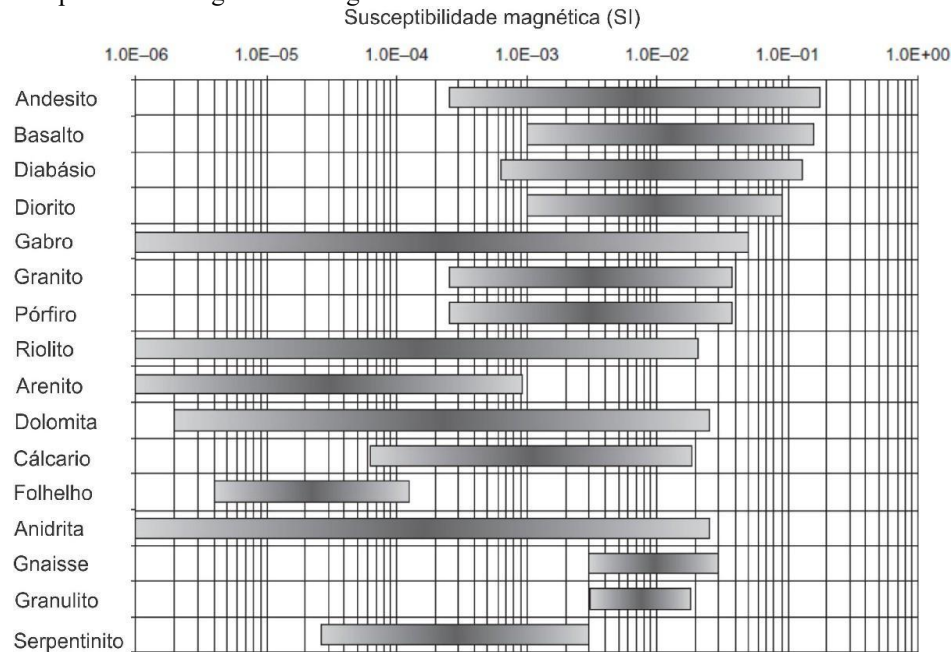
O magnetismo é uma característica intrínseca dos materiais, que podem ser naturalmente magnéticos (magnetização remanente) e/ou estar sujeitos à ação de um campo magnético externo (magnetização induzida) (Dentith e Mudge, 2014). Segundo Barbuena *et al.* (2013), a interpretação dos dados magnéticos é desafiadora devido à influência desses dois tipos de magnetização. Normalmente, nas rochas, a magnetização induzida pelo campo magnético terrestre é predominante em relação à remanente; em consequência disso, as anomalias magnéticas variam de acordo com a localização geográfica. Enquanto o centro da anomalia coincide com a máxima amplitude nos polos (vetor de magnetização vertical) e no equador (vetor de magnetização horizontal), nas regiões de latitudes intermediárias as anomalias apresentam caráter dipolar (Isles e Rankin, 2013).

A suscetibilidade magnética é a propriedade física que controla os efeitos da magnetização das rochas e está relacionada à capacidade de um material magnetizar-se quando submetido a um campo magnético. Essa propriedade permite que os materiais sejam classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Os materiais diamagnéticos possuem suscetibilidades magnéticas baixas e negativas e são praticamente imperceptíveis em dados magnetométricos. Os minerais paramagnéticos apresentam suscetibilidades magnéticas baixas e positivas e são exemplificados por piroxênio, anfibólio e mica. Os minerais ferromagnéticos apresentam altos valores de suscetibilidade magnética e são caracterizados pela presença de magnetita, pirrotita, titanomagnetita e ilmenita (Telford *et al.*, 1990).

A suscetibilidade magnética das rochas (FIG. 3) é controlada por sua composição, pela presença de minerais de ferro na rocha, pelo tipo de magnetização apresentado pelos minerais

(induzida ou remanente) e pela intensidade e orientação do campo magnético terrestre (Isles e Rankin, 2013).

Figura 3 - Susceptibilidade magnética de algumas rochas.



Fonte: Hunt *et al.* (1995)

As principais técnicas de realce utilizadas neste trabalho foram a Amplitude Total do Gradiente (TGA, *Total Gradient Amplitude*) e o método de lineamento magnético TAHG (*Tilt Angle of the Horizontal Gradient*). A Amplitude Total do Gradiente (TGA) é um produto de realce magnetométrico calculado pela combinação das derivadas do campo magnético nas direções horizontais x e y e na direção vertical z. Por corresponder ao módulo do gradiente, a TGA apresenta valores não negativos e tende a produzir máximos sobre regiões caracterizadas por contrastes de magnetização, auxiliando na localização e na delimitação lateral aproximada das fontes magnéticas (Nabighian, 1972, 1984; Roest *et al.*, 1992; Li, 2006; Li e Pilkington, 2016; Melo *et al.*, 2020). Embora permita destacar a geometria geral das anomalias, a TGA não é o produto mais indicado para o traçado detalhado de lineamentos magnéticos, pois outras técnicas de realce de bordas, como o TAHG, apresentam maior eficiência na definição de contatos, discontinuidades e feições estruturais. Nesse sentido, neste trabalho, a TGA foi empregada principalmente na identificação de áreas com elevados gradientes magnéticos e na delimitação das fontes magnéticas.

O Ângulo de Inclinação do Gradiente Horizontal (TAHG) é um método de detecção de bordas para o realce de anomalias magnéticas (Ferreira *et al.*, 2013) e foi aplicado com a

finalidade de destacar os limites das fontes anômalas e auxiliar no reconhecimento de contatos geológicos e lineamentos estruturais. Segundo Ferreira *et al.* (2013), o método utiliza a função arco-tangente da relação entre a derivada vertical da amplitude do gradiente horizontal e o módulo de seu gradiente. A resposta obtida varia entre $-\pi/2$ e $+\pi/2$, e os valores máximos tendem a coincidir com as bordas das fontes magnéticas. O efeito de normalização do filtro permite equilibrar as respostas associadas a fontes superficiais e profundas, contribuindo para uma interpretação estrutural mais detalhada da área de estudo (Ferreira *et al.*, 2013).

A magnetometria e seus produtos derivados constituem ferramentas importantes na investigação de depósitos IOCG e de níquel hidrotermal, pois permitem identificar contrastes de magnetização relacionados a corpos mineralizados, contatos litológicos e descontinuidades estruturais, como falhas e zonas de cisalhamento. Esses métodos também contribuem para o reconhecimento de unidades enriquecidas em minerais magnéticos e alterações hidrotermais, especialmente aquelas ricas em magnetita. A aplicação de filtros magnetométricos favorece o realce das bordas das fontes, dos lineamentos e das feições estruturais, auxiliando na delimitação de áreas potencialmente favoráveis à vetorização mineral.

3.2. GAMAESPECTROMETRIA

A gamaespectrometria mede a concentração dos elementos radiogênicos K, U e Th em rochas, sedimentos e solos. Essa técnica baseia-se na detecção da radiação gama emitida durante o decaimento radioativo natural desses elementos (Adams e Gasparini, 1970; Minty, 1997; Wilford *et al.*, 1997). A radiação gama próxima à superfície é originada principalmente pela desintegração dos isótopos de potássio (^{40}K), tório (^{232}Th) e urânio (^{238}U), encontrados na maioria das rochas. O Th e o U não emitem raios gama durante o seu decaimento e são detectados por meio da emissão oriunda do decaimento de seus isótopos-filho, ^{208}Tl e ^{214}Bi , respectivamente, sendo reportados como equivalentes de tório e urânio (eTh e eU; Dickson e Scott, 1997).

Os espectrômetros possuem quatro canais distintos de medição: um canal de contagem total e três canais específicos para os elementos detectados: ^{208}Tl (mede o eTh), ^{214}Bi (mede o eU) e ^{40}K . Com base nas respostas obtidas, é possível determinar as concentrações de K, eTh e eU na superfície, o que permite identificar os diferentes litotipos da área analisada (Minty, 1997; Barbuena *et al.*, 2013). Esses elementos podem ocorrer em concentrações anômalas na crosta terrestre, refletindo processos de alteração hidrotermal, intemperismo ou até mesmo a presença de um depósito mineral (Dentith e Mudge, 2014). Outros fatores que contribuem para o

enriquecimento relativo dos radioelementos, relacionados principalmente a intrusão magmática, são a diferenciação magmática, contaminação por materiais crustais e interação com outros magmas (Gunn, 1998). Portanto, para identificar tais processos, faz-se necessária a análise dos canais individuais, bem como da composição ternária e das razões radiométricas (K/eTh , eU/eTh e Fator $F = K \cdot eU/eTh$).

Segundo Ulbrich *et al.* (2009), o radioelemento K ocorre principalmente associado ao feldspato potássico e a alguns argilominerais formados durante a diagênese ou por alteração hidrotermal (e.g., Dickson e Scott, 1997; Deer *et al.*, 1995). O K apresenta teores elevados em rochas ígneas félsicas, como granitoides, sienitoides e seus equivalentes vulcânicos, bem como em rochas metamórficas micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas, como filitos, xistos e gnaisses. Também constitui um componente importante de rochas sedimentares, como arenitos arcoseanos, pelitos e folhelhos. O K é um elemento extremamente móvel em ambientes de alteração hidrotermal e intemperismo, nos quais a água atua como principal agente, especialmente em climas tropicais e subtropicais com elevados índices pluviométricos.

Os elementos Th e U, por sua vez, estão comumente presentes em minerais acessórios encontrados em diversas rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas (Boyle, 1982; Bea, 1996). Esses elementos apresentam comportamento geoquímico distinto, e suas concentrações estão relacionadas à composição das rochas, à vegetação, ao intemperismo, à umidade do solo e ao hidrotermalismo (Dickson e Scott, 1997; Wilford *et al.*, 1997).

Conforme Silva e Alves (2021), o Fator F é um índice radiométrico calculado a partir da relação entre os teores de potássio (K), urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh), sendo utilizado para evidenciar enriquecimentos hidrotermais de K e eU em relação ao eTh. Valores elevados desse parâmetro costumam estar associados a processos de alteração potássica. Dessa forma, anomalias positivas do Fator F e da razão K/eTh podem indicar áreas submetidas à circulação de fluidos hidrotermais e potencialmente relacionadas à mineralização sulfetada (Airo, 2002). Por outro lado, Ribeiro *et al.* (2014) destacam que ambientes intensamente intemperizados tendem a apresentar valores reduzidos desses parâmetros devido à lixiviação do potássio. Em contraste, regiões afetadas por processos hidrotermais que promoveram o enriquecimento de K e eU geralmente exibem valores mais elevados do Fator F (Ribeiro *et al.*, 2014).

De acordo com Silva e Alves (2021), a composição ternária RGB é um produto gamaespectrométrico gerado a partir da combinação, em falsa cor, dos canais de potássio (K), tório equivalente (eTh) e urânio equivalente (eU). Cada radioelemento é representado por uma cor primária: o vermelho indica maiores concentrações de K, o verde representa áreas

enriquecidas em eTh e o azul evidencia regiões com maior concentração de eU. A interpretação das cores permite reconhecer variações geoquímicas e litológicas na superfície. Áreas em tons claros ou esbranquiçados indicam concentrações elevadas dos três radioelementos, enquanto regiões em tons escuros ou pretos representam baixos valores de K, eTh e eU. No entanto, é importante considerar que corpos d'água limpos, sem material particulado em suspensão, podem aparecer em tons escuros, pois apresentam baixa emissão de radiação gama devido à reduzida concentração desses radioelementos. As respostas gamaespectrométricas variam de acordo com os contrastes das propriedades físicas e geométricas das fontes radioativas, o tamanho e a resolução dos detectores e os efeitos do meio ambiente (e.g., Adams e Gasparini, 1970; Grasty, 1976; Minty, 1997; Ward, 1981; Grasty *et al.*, 1997). A aplicação da gamaespectrometria em depósitos IOCG e HNi é de grande importância para a detecção de zonas de alteração associadas aos processos de mineralização hidrotermal, aos óxidos de ferro e ao enriquecimento de diversos elementos, incluindo potássio e urânio (Montreuil *et al.*, 2016).

4. RESULTADOS

4.1. MAGNETOMETRIA

A magnetometria e seus produtos derivados constituem ferramentas importantes na investigação de depósitos IOCG e HNi, pois permitem identificar contrastes geofísicos associados a corpos mineralizados, contatos litológicos e descontinuidades estruturais, como falhas e zonas de cisalhamento. Para isso, foram analisados os produtos Amplitude Total do Gradiente (TGA) e *Tilt Angle of the Horizontal Gradient* (TAHG).

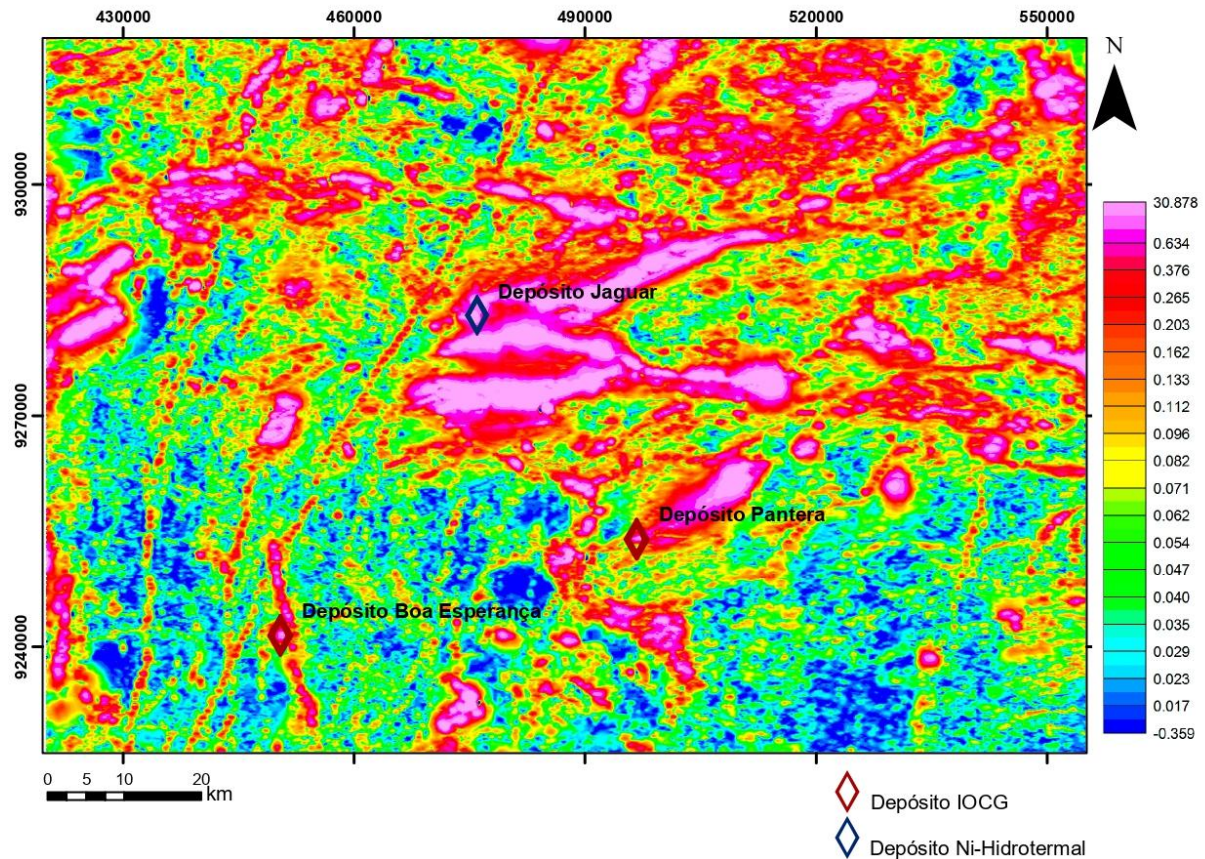
4.1.1. Amplitude Total do Gradiente (TGA)

A técnica de realce Amplitude Total do Gradiente (TGA) (FIG. 4) foi utilizada com o objetivo de destacar anomalias magnéticas positivas associadas às fontes magnéticas presentes na área de estudo. Esse tipo de mapa é mais adequado para delimitar os limites laterais de corpos magnéticos, não sendo o produto mais indicado para o reconhecimento de lineamentos magnéticos. A partir da análise do mapa, foi possível identificar anomalias de alto gradiente magnético, com aspecto alongado e direção E–W, que se destacam como as feições mais expressivas da área. Também foram observadas anomalias com orientações aproximadas NE–SW, N–S e NW–SE, porém, menos contínuas, de menor intensidade e com ocorrência mais localizada.

O depósito Jaguar (HNi), localizado na porção central da área de estudo, ocorre associado a essas anomalias positivas e alongadas, acompanhando a direção preferencial E–W. Já o depósito Boa Esperança (IOCG) está associado a uma anomalia arredondada com direção preferencial E–W, adjacente a uma estrutura alongada de direção NW–SE. O depósito Pantera (IOCG), também localizado na porção central da área de estudo, está associado a uma anomalia magnética alongada na direção NE–SW.

Além disso, foram identificadas outras anomalias magnéticas de alta intensidade distribuídas pela área de estudo, com geometria arredondada a elipsoidal e extensões de até 10 km.

Figura 4 - Mapa da amplitude total do gradiente (TGA) com a localização dos depósitos IOCG e HNi da área de estudo.



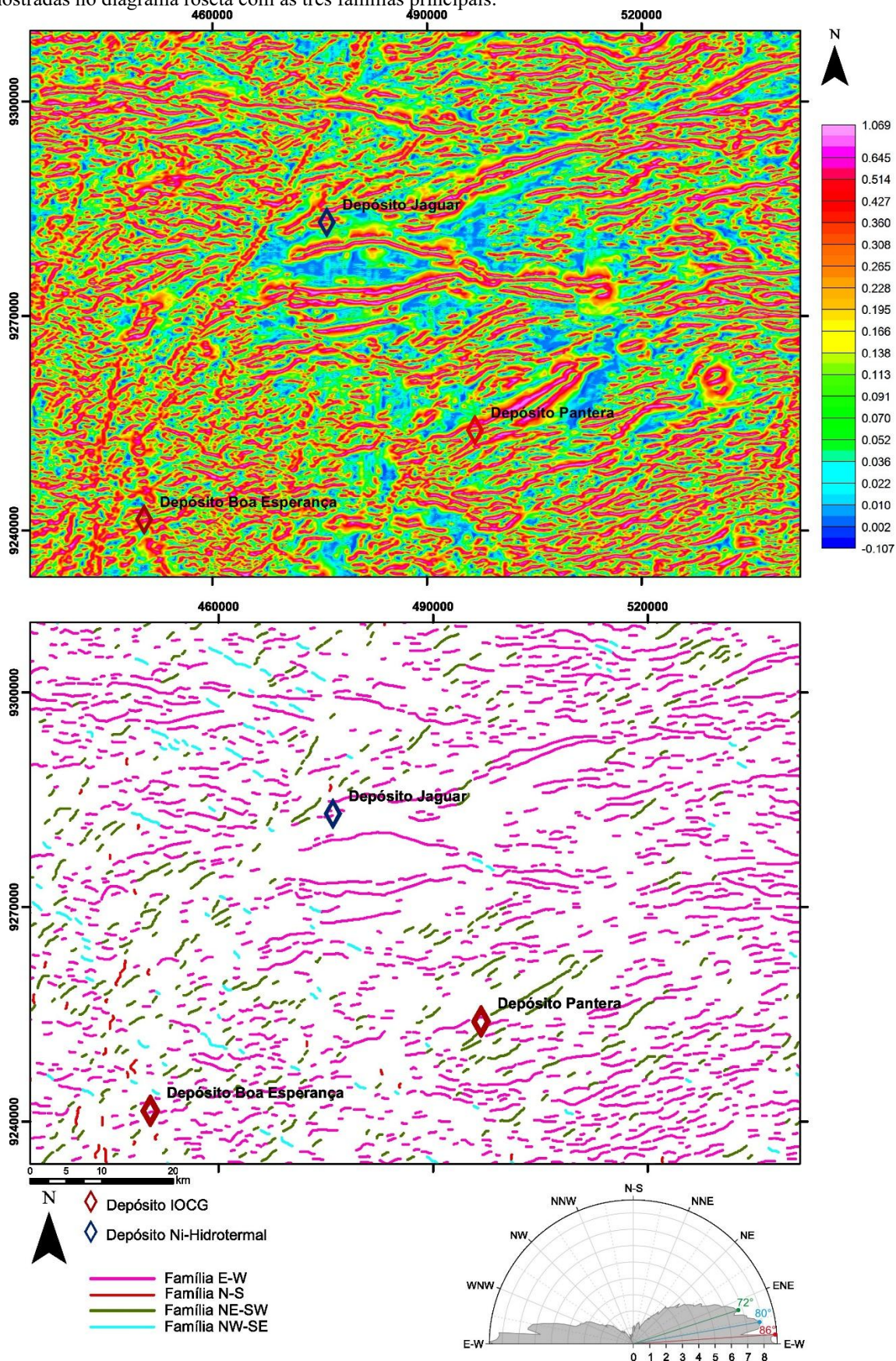
Fonte: Elaborado pela autora

4.1.2. Lineamentos magnéticos

O filtro *Tilt Angle of the Horizontal Gradient* (TAHG) (FIG. 5) foi utilizado com o objetivo de identificar lineamentos magnéticos e possíveis estruturas associadas às fontes magnéticas da área de estudo. A partir da análise do mapa, verifica-se a ocorrência de anomalias lineares, as quais foram agrupadas em quatro famílias principais, de acordo com suas orientações. Observa-se que algumas dessas anomalias coincidem com as bordas das grandes anomalias identificadas no mapa de TGA, evidenciando que o TAHG é um excelente produto para a detecção de bordas de corpos magnéticos, uma vez que tende a gerar picos de máxima amplitude nas bordas das fontes causadoras.

A Família 1 apresenta direção predominante E–W, sendo considerada a principal orientação estrutural da área de estudo (FIG. 5). As três direções principais de lineamentos, 86, 80 e 72° pertencem a essa família. Essa família destaca-se pela maior continuidade espacial e pela associação com as principais anomalias magnéticas observadas no mapa de TGA (FIG. 4).

Figura 5 - Mapa do filtro TAHG com os lineamentos magnéticos interpretados. As direções dos lineamentos são mostradas no diagrama roseta com as três famílias principais.



Fonte: Elaborado pela autora

A Família 2 apresenta direção NE–SW e intercepta os lineamentos da Família 1. Já as Famílias 3 e 4, com direções N–S e NW–SE, respectivamente, ocorrem de forma menos sistemática e mais localizada na área de estudo, sendo representadas por lineamentos de menor continuidade espacial.

Foi observado que os depósitos Jaguar e Boa Esperança estão preferencialmente associados à Família 1 de direção E–W, foi observado também que o depósito Boa Esperança também está associada a Família 4 de direção NE–SW que está adjacente ao depósito. Em contrapartida, o depósito Pantera apresenta maior associação com a Família 2, de direção NE–SW, embora também seja influenciado por estruturas da Família 1, de direção E–W.

4.2. GAMAESPECTROMETRIA

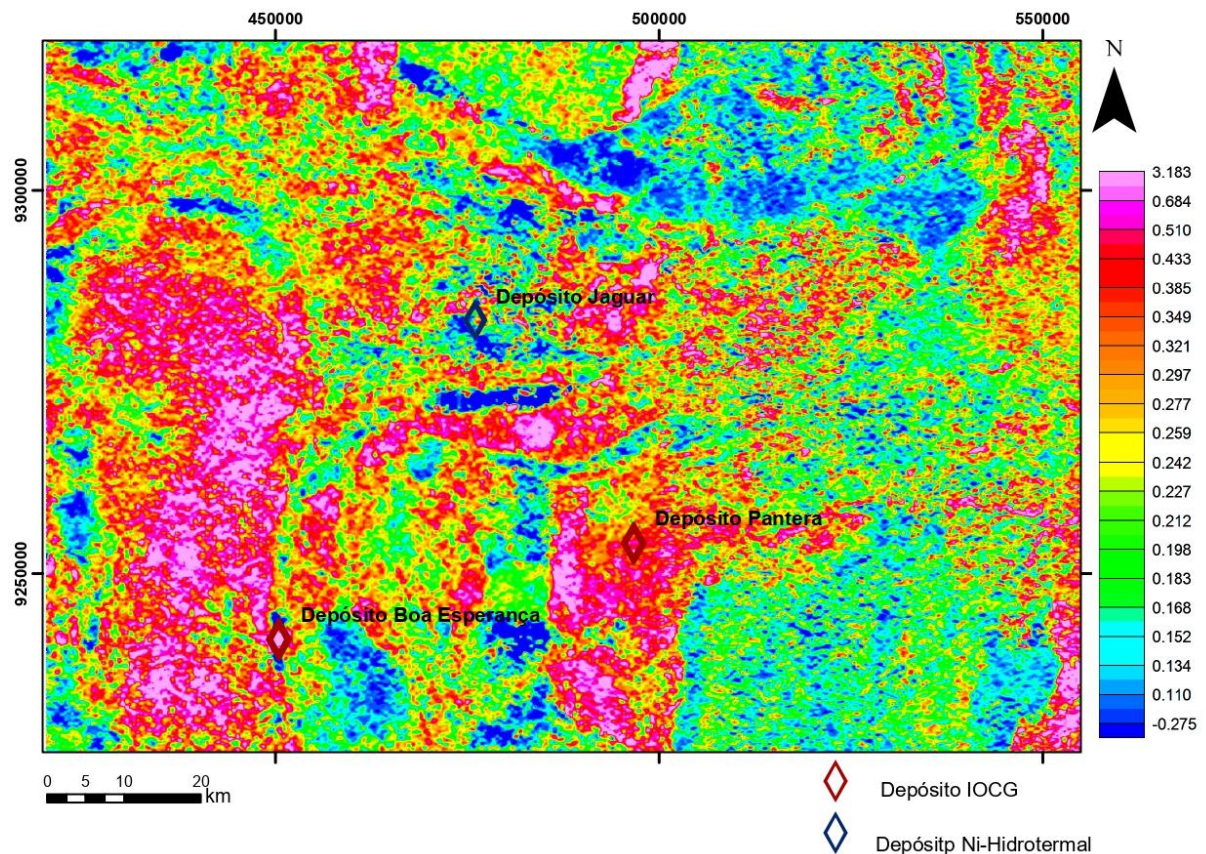
A análise gamaespectrométrica para depósitos de IOCG e HNi foi realizada com o objetivo de reconhecer variações superficiais nas concentrações de potássio (K), urânio (eU) em relação ao tório (eTh), relacionadas a contrastes litológicos e a possíveis zonas de alteração hidrotermal. Para essa avaliação, foram utilizados os mapas das razões K/eTh e eU/eTh, o Fator F e o mapa ternário RGB.

4.2.1. Mapa de eU/eTh

De acordo com o mapa da razão eU/eTh, apresentado na FIG. (6), observa-se uma distribuição heterogênea dos valores radiométricos na área de estudo. As porções representadas por tons quentes, principalmente vermelho, rosa e magenta, indicam valores mais elevados da razão eU/eTh, sugerindo enriquecimento relativo de eU em relação ao eTh. Já as áreas representadas por tons frios, como o verde e o azul, indicam valores mais baixos dessa razão, o que reflete maiores concentrações relativas de eTh.

Os valores mais elevados da razão eU/eTh ocorrem principalmente na porção oeste e estendem-se até a porção sul da área, onde se localizam os depósitos Boa Esperança e Pantera. Na região do depósito Jaguar, observa-se uma resposta radiométrica caracterizada por variações da razão eU/eTh entre valores baixos e moderados. Além disso, observam-se outras anomalias, distribuídas de forma mais pontual, na área de estudo.

Figura 6 - Mapa gamaespectrométrico da razão eU/eTh com a localização dos depósitos hidrotermais.

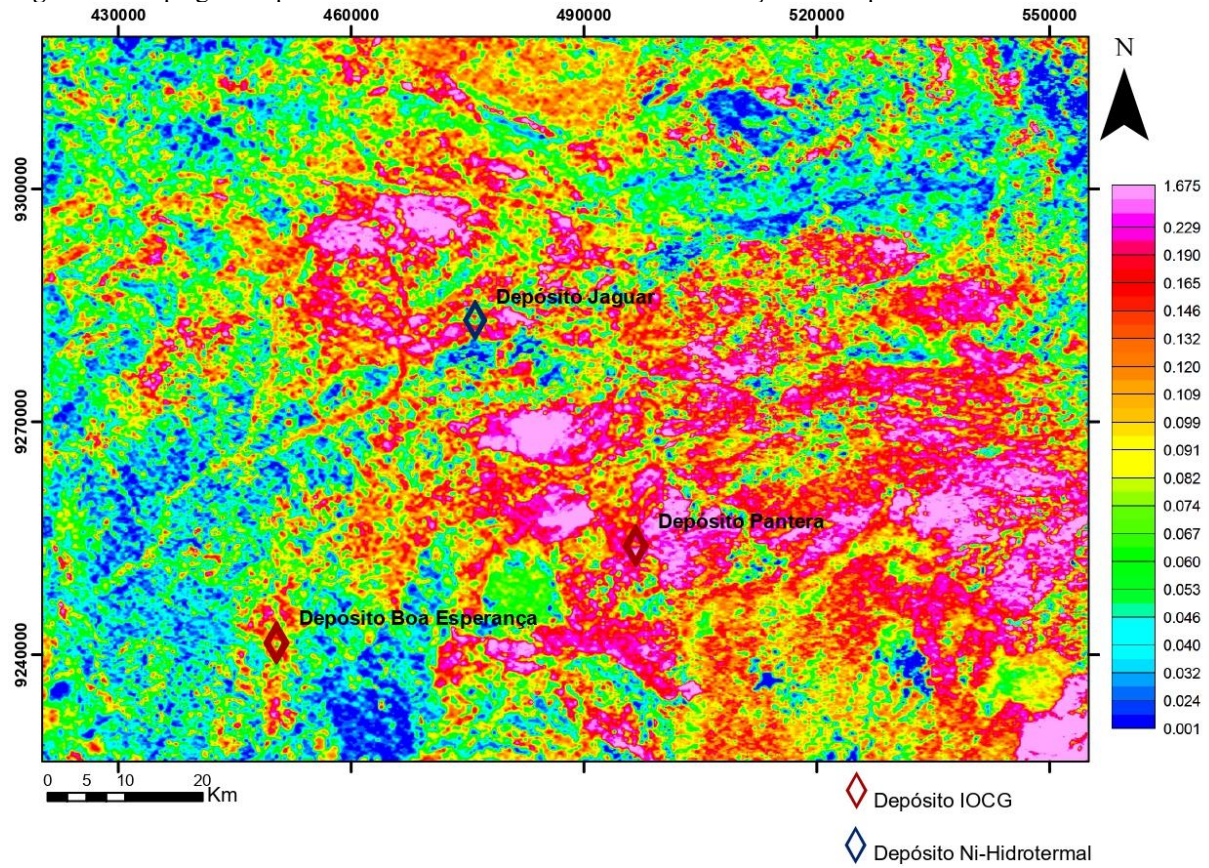


Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2. Mapa de K/eTh

Os altos valores da razão K/eTh (FIG. 7) sugerem enriquecimento relativo de K em relação ao eTh, sendo concentrados nas regiões leste, central e sul da área de estudo. Observa-se que as anomalias de maior intensidade acompanham, em geral, um padrão alongado com direção preferencial E–W, semelhante ao observado nos produtos magnetométricos. Os depósitos Jaguar (HNI), Boa Esperança (IOCG) e Pantera (IOCG) ocorrem predominantemente em uma área marcada por valores moderados a altos da razão K/eTh.

Figura 7 - Mapa gamaespectrométrico da razão K/eTh com a localização dos depósitos hidrotermais.



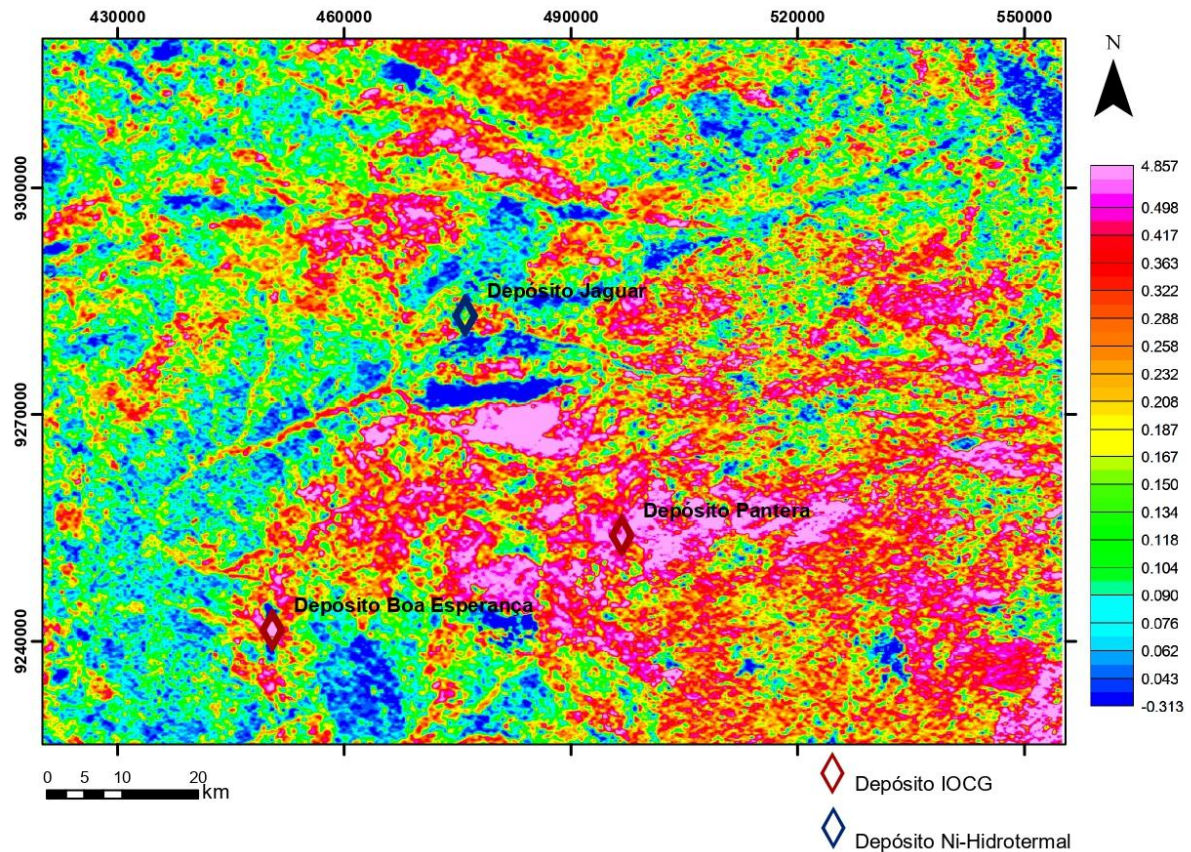
Fonte: Elaborado pela autora

4.2.3. Mapa de Fator F

O mapa do Fator F (FIG. 8) realça áreas com enriquecimento relativo em K e eU em relação ao eTh. Por outro lado, valores muito baixos podem estar relacionados a processos de forte intemperismo e lixiviação de K.

Na área de estudo, observa-se o predomínio de valores intermediários a elevados do Fator F, principalmente nas porções central, sul e leste da área. Essas anomalias apresentam distribuição irregular. As áreas dos depósitos Boa Esperança e Pantera, ambos do tipo IOCG, apresentam resposta marcada por cores quentes, indicando valores moderados a elevados do Fator F. Em contrapartida, a região do depósito Jaguar (HNi) apresenta predominância de cores frias, indicando valores mais baixos do Fator F e, consequentemente, menor enriquecimento relativo de K e eU nessa porção.

Figura 8 - Mapa radiométrico do Fator F na área de estudo.



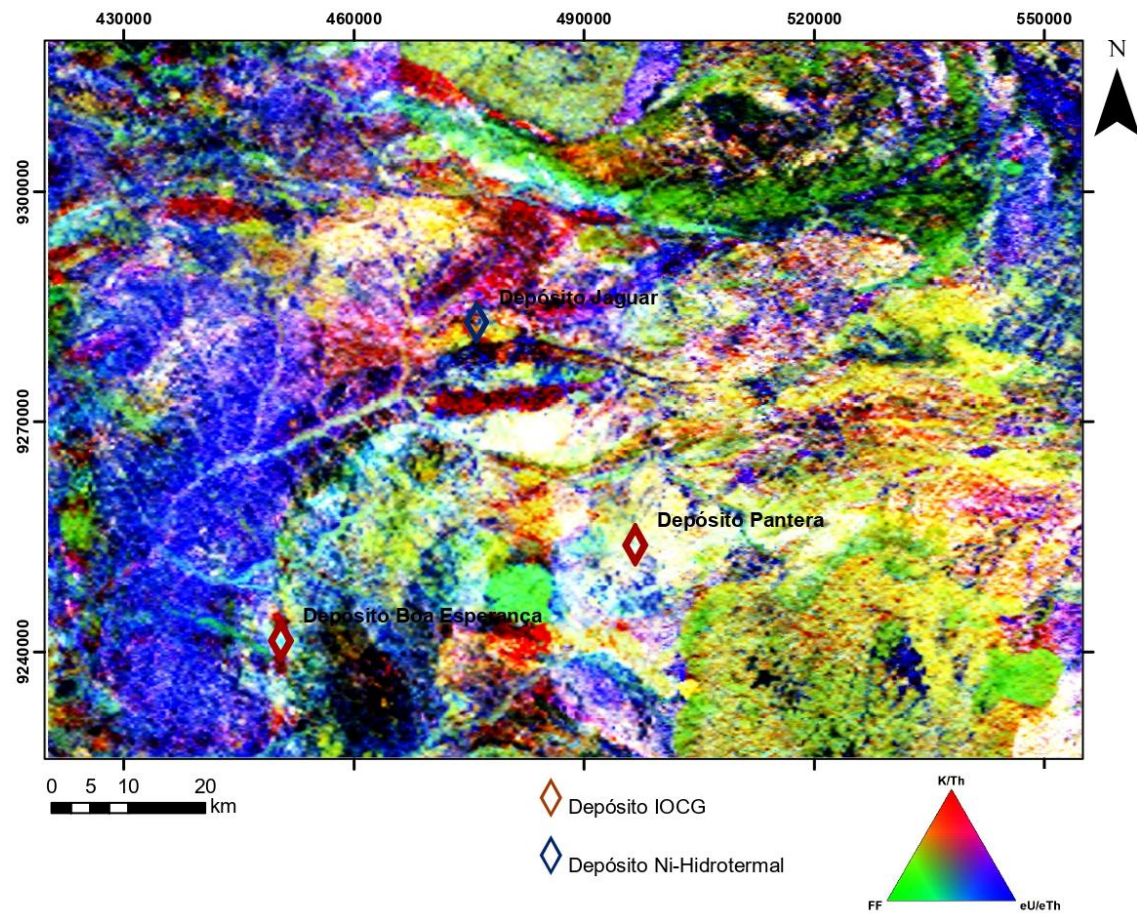
Fonte: Elaborado pela autora

4.2.4. Mapa RGB

A composição ternária RGB (FIG. 9) constitui um importante resultado da interpretação gamaespectrométrica, pois permite reconhecer variações geoquímicas superficiais, contrastes litológicos e possíveis zonas de alteração hidrotermal. Nessa composição, os tons de vermelho representam valores elevados de K/eTh , os tons de azul correspondem a valores elevados de eU/eTh e os tons de verde indicam valores elevados do Fator F. As cores intermediárias resultam da combinação dessas três variáveis.

De modo geral, a maior parte da área de estudo apresenta coloração amarelada (FIG. 9). A região correspondente ao depósito Boa Esperança (IOCG) apresenta tonalidades que variam do vermelho ao azul. O depósito Pantera (IOCG), por sua vez, está associado à coloração branca. Já o depósito Jaguar (HNI) é predominantemente representado por tons de vermelho e amarelo. Além disso, observa-se, na porção central da área de estudo, outra região de coloração clara, indicando a contribuição combinada das variáveis gamaespectrométricas.

Figura 9 - Mapa da composição dos canais gamaespectrométricos em ternário RGB.



Fonte: Elaborado pela autora

5. DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão discutidos os resultados obtidos a partir da interpretação dos mapas magnetométricos e radiométricos, correlacionando-os com a geologia da área de estudo e com trabalhos já publicados na literatura.

5.1. ANÁLISE DOS MAPAS MAGNETOMÉTRICOS

O mapa de TGA evidenciou anomalias magnéticas positivas associadas aos depósitos Jaguar (HNi), Boa Esperança e Pantera (IOCG). O depósito Jaguar (HNi) está associado a uma expressiva anomalia de alto gradiente magnético, relacionada ao Grupo Sapucaia, caracterizado pela presença de rochas metaultramáficas e formações ferríferas bandadas (Costa *et al.*, 2016). Os depósitos Boa Esperança e Pantera (IOCG) também apresentam anomalias magnéticas positivas, sendo o depósito Boa Esperança associado ao Complexo Xingu, composto por ortognaisses tonalíticos e granodioríticos, e o depósito Pantera associado ao Granodiorito Rio Maria, composto por granodioritos com variações faciológicas para monzogranitos e tonalitos (Costa *et al.*, 2016). Segundo Moreto *et al.* (2015), essas unidades, compostas por granitoides, representam importantes unidades hospedeiras dos depósitos IOCG, podendo conter magnetita associada ao processo de alteração hidrotermal.

No depósito Jaguar, o alto valor no TGA pode ser explicado pela alteração hidrotermal com magnetita, além da proximidade com rochas máficas-ultramáficas e formações ferríferas. Essa resposta é coerente com os estudos sobre o depósito Jaguar, nos quais Ferreira Filho *et al.* (2021) e Mansur *et al.* (2023) destacam a presença de magnetita, apatita e sulfetos associados à mineralização de níquel hidrotermal.

Já nos depósitos Boa Esperança e Pantera, a anomalia magnética positiva é compatível com sistemas IOCG, nos quais a alteração férrica, marcada pela presença de magnetita, representa uma importante assinatura geofísica.

Também foram reconhecidas outras anomalias na área de estudo, em concordância com os trabalhos de Ferreira Filho *et al.* (2021), Mansur *et al.* (2023) e Dutra *et al.* (2023), associadas às rochas máficas-ultramáficas da Suíte Intrusiva Cateté. Anomalias magnéticas de alta intensidade também foram identificadas e associadas às intrusões do Grupo Tucumã.

Na porção norte da área de estudo, observam-se anomalias magnéticas positivas associadas aos ortogranulitos Chicrim-Cateté. A leste da área de estudo, observam-se também anomalias associadas ao Metagranito Plaquê e às falhas e zonas de cisalhamento que cortam

essa unidade. Já na porção oeste da área destacam-se anomalias positivas associadas ao Metagranito Plaquê, relacionadas a zonas de cisalhamento, bem como ao Complexo Carapanã. No Grupo São Félix, observa-se que as anomalias magnéticas se concentram preferencialmente nos contatos entre formações ferríferas bandadas e rochas metamáficas a ultramáficas.

A análise do mapa TAHG e do mapa litológico evidencia que a área de estudo é marcada por uma complexa compartimentação estrutural, com presença de zonas de cisalhamento, falhas/fraturas, dobras e diques que cortam diferentes unidades geológicas. A integração entre os mapas evidencia que a estruturação da área é dominada por feições da Família 1, de direção E–W, seguidas por lineamentos da Família 2, de direção NE–SW, da Família 3, de direção N–S, e da Família 4, de direção NW–SE. Foi observado que o depósito Jaguar (HNi) está preferencialmente associado à Família 1, de direção E–W; o depósito Boa Esperança (IOCG) está preferencialmente associado à Família 1 (E–W) e adjacente à Família 3 (NW–SE); depósito Pantera (IOCG) está localizado próximo ao entroncamento entre estruturas da Família 2, de direção NE–SW, e da Família 1, de direção E–W.

Autores como Domingos (2009) e Haddad-Martim *et al.* (2017, 2018) relacionam as estruturas regionais NW–SE e N–S a um papel importante no controle da circulação hidrotermal, atuando como zonas de fraqueza e condutos preferenciais para a migração dos fluidos mineralizantes, sendo essas descontinuidades estruturais associadas a diferentes eventos tectônicos registrados na PC, incluindo a transpressão regional entre ca. 2,76–2,73 Ga, a inversão da Bacia Carajás entre ca. 2,68–2,63 Ga (Moreto *et al.*, 2015) e a colocação de suítes neoarqueanas e orosirianas entre ca. 2,77–2,71 Ga e 1,88–1,86 Ga (Costa *et al.*, 2020; Marangoanha *et al.*, 2020; Teixeira *et al.*, 2018). Nesse contexto, a atividade tectônica pode ter favorecido o aumento do gradiente geotérmico regional, permitindo a circulação de fluidos ao longo de uma rede estrutural que conecta níveis crustais profundos e rasos. Durante esse processo, fluidos hidrotermais e metais lixiviados das rochas encaixantes teriam migrado em direção a porções mais superficiais da crosta, afastando-se da fonte térmica principal (Moreto *et al.*, 2015).

Os sistemas hidrotermais favoreceram a entrada de fluidos em zonas de fraqueza estrutural e em estruturas mais rasas, principalmente com direções E–W, NE–SW e NW–SE (Haddad-Martim *et al.*, 2017, 2018). Segundo Melo *et al.* (2014) e Monteiro *et al.* (2008), esse processo pode ter contribuído para a reativação de estruturas antigas e para a sobreposição de eventos hidrotermais tardios, influenciando a formação e a orientação dos corpos mineralizados na região, além de expor estruturas profundas, resultando na sobreposição dos sistemas mineralizantes IOCG e de HNi.

No depósito Jaguar, a comparação entre os lineamentos magnéticos interpretados no mapa TAHG e o mapa geológico demonstra que os lineamentos magnéticos estão associados a estruturas de direção E–W que coincidem com falhas ou fraturas que cortam as rochas do Grupo Sapucaia. Essa relação evidencia que a mineralização se encontra diretamente associada a estruturas rúptil-dúcteis que favoreceram a ascensão de fluidos hidrotermais mineralizantes. Oliveira (2017) e Ferreira Filho *et al.* (2021) descrevem que a mineralização de Jaguar é fortemente controlada por zonas de cisalhamento e falhas, responsáveis pela formação de corpos mineralizados subverticais e pelo desenvolvimento de intensa alteração hidrotermal rica em magnetita. Assim, a correspondência observada entre os lineamentos magnéticos e as estruturas geológicas reforça a interpretação de que o controle estrutural constitui um dos principais fatores responsáveis pela gênese do depósito.

Em contraste, no depósito Boa Esperança, não foi observada correspondência direta entre os lineamentos da Família 1 identificados no mapa TAHG e as estruturas mapeadas no mapa geológico. Mas essa diferença pode estar relacionada à natureza das estruturas mineralizantes, que podem não apresentar expressão cartográfica na escala do mapa geológico disponível, ou ainda refletir a presença de estruturas profundas parcialmente ocultas sob cobertura laterítica ou mascaradas pelos efeitos do intenso metassomatismo hidrotermal, mas a Família 3, que está adjacente ao depósito, está associada a diques. Henrique *et al.* (2013) demonstram que a mineralização em Boa Esperança está intimamente associada a zonas de cisalhamento que controlaram a colocação do Granito Boa Esperança, localizado no Complexo Xingu, e a circulação de fluidos hidrotermais, sugerindo que parte dessas estruturas pode não ser facilmente reconhecida apenas por meio do mapeamento geológico convencional. Já a Família 4, de direção NW–SE, Cassini *et al.* (2025) e Murray *et al.* (2021) associam a zonas de brechas e veios ricos em magnetita, que são injetados nos granitos alterados.

Além disso, deve-se considerar que o produto TAHG destaca contrastes magnéticos relacionados tanto a contatos litológicos quanto a descontinuidades estruturais ricas em magnetita. Assim, nem todos os lineamentos magnéticos apresentam necessariamente uma correspondência direta com falhas cartografadas em superfície, podendo representar estruturas profundas ou zonas de cisalhamento parcialmente alteradas por eventos tectônicos e hidrotermais posteriores. Essa interpretação reforça a importância da magnetometria como ferramenta complementar ao mapeamento geológico, permitindo identificar estruturas não reconhecidas em superfície e que podem exercer papel significativo na evolução dos sistemas mineralizantes.

Já os lineamentos da Família 2, de orientação NE–SW, considerados a principal estrutura controladora do depósito Pantera (IOCG), que ocorrem de forma menos sistemática, interceptam a Família 1, de direção E–W, e estão associados a falhas e fraturas na área de estudo, indicando uma forte relação com condutos para fluidos hidrotermais. Essa interpretação é consistente com Lopes (2018), que descreve o depósito Pantera como hospedado em um granodiorito intensamente deformado, no qual as zonas de alteração hidrotermal apresentam disposição vertical a subvertical e são fortemente controladas por zonas de cisalhamento. A autora demonstra que as áreas de maior deformação coincidem com o desenvolvimento mais intenso das alterações hidrotermais, evidenciando que o controle estrutural foi determinante para a evolução do sistema mineralizante. Além disso, o depósito encontra-se associado a uma estrutura subsidiária de direção ENE–WSW da Zona de Cisalhamento Canaã (WNW–ESE), reforçando o papel das estruturas regionais como principais condutos para os fluidos hidrotermais.

Os outros lineamentos das Famílias 3 e 4, de direções N–S e NW–SE, que são de menor ocorrência na área de estudo, estão associados a estruturas como diques, além de falhas e fraturas. Essa interpretação está de acordo com Dutra *et al.* (2023), que atribuem às estruturas N–S e NW–SE importante controle estrutural em escala regional na Província Mineral de Carajás.

De modo geral, os resultados corroboram a interpretação de Prado *et al.* (2020), Dutra *et al.* (2023, 2025) e Oliveira *et al.* (2025), segundo a qual a mineralização IOCG e de HNi na PC é controlada pela interação entre estruturas profundas e rasas, associadas a anomalias gamaespectrométricas e magnetométricas. No presente trabalho, os lineamentos magnéticos apresentam direção predominante E–W, com ocorrências subordinadas nas direções NE–SW, N–S e NW–SE. Esse padrão é compatível com o modelo proposto por Dutra *et al.* (2023), no qual estruturas E–W e NE–SW exercem importante controle local sobre a mineralização, enquanto estruturas N–S e NW–SE podem representar controles regionais mais profundos. Dessa forma, os lineamentos identificados podem ser interpretados como zonas de fraqueza e potenciais condutos para a circulação de fluidos hidrotermais (*e.g.*, Moreto *et al.*, 2015).

5.2. ANÁLISE DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

No mapa RGB, a área do depósito Boa Esperança (IOCG) é representada por cores que vão do vermelho ao azul, indicando elevados valores de K/eTh e eU/eTh, evidenciando o enriquecimento relativo de K e eU próximo ao depósito. Essa assinatura radiométrica coincide

com a ocorrência de gnaisses de composição tonalítica a granodiorítica nos complexos Xingu e Carapanã e com o predomínio de lineamentos de direção E–W, indicando que tanto a litologia quanto o controle estrutural exerceram influência na evolução do sistema hidrotermal. A concentração desses radioelementos é coerente com os trabalhos de Henrique *et al.* (2013) e Murray *et al.* (2021), nos quais o depósito Boa Esperança caracteriza-se por intenso metassomatismo potássico, controlado por zonas de cisalhamento, seguido por forte metassomatismo férrico, sugerindo que tanto a alteração hidrotermal quanto a litologia podem ter sido responsáveis pelo enriquecimento dos radioelementos.

O depósito Pantera está associado à coloração branca no mapa ternário RGB, indicando enriquecimento simultâneo em K e eU representado pelos elevados valores de K/eTh, eU/eTh e Fator F. Essa anomalia abrange áreas correspondentes ao Granodiorito Rio Maria e ao Grupo Tucumã, não apresentando, portanto, um controle litológico claramente definido. Em relação aos lineamentos magnéticos (FIG. 5), observa-se que a anomalia está espacialmente associada a uma região com elevada concentração de estruturas orientadas na direção NE–SW. Essa relação sugere que tais estruturas podem ter atuado como zonas de circulação de fluidos hidrotermais, com possíveis implicações para a gênese e o controle da mineralização do depósito Pantera. O enriquecimento simultâneo dos três radioelementos mostra-se compatível com a complexa evolução hidrotermal descrita por Lopes (2018). Segundo o autor, a alteração hidrotermal progride de estágios sódico-cálcicos, caracterizados pela formação de actinolita e albita, para estágios cálcicos, representados principalmente por actinolita e apatita. Posteriormente, desenvolve-se uma intensa alteração férrico-cálcica, marcada pela presença de magnetita e actinolita idiomórfica, culminando em alteração potássica, caracterizada por biotita, hastingsita e feldspato potássico. A sobreposição dessas diferentes assembleias metassomáticas pode explicar a coexistência das respostas radiométricas de K, eU observadas na área do depósito, além da litologia, que pode influenciar a concentração dos radioelementos.

O depósito Jaguar, por sua vez, é representado pelas cores vermelha e amarela, indicando elevada concentração de K, além da correlação espacial com lineamentos E–W. As áreas com altos valores de K podem estar relacionadas a alterações hidrotermais com biotita (*e.g.*, Oliveira, 2017; Ferreira Filho *et al.*, 2021). Segundo Ulbrich *et al.* (2009), o potássio é principalmente incorporado à biotita, ao feldspato potássico e aos argilominerais em sistemas hidrotermais. Esse enriquecimento em K reflete a intensa interação entre os fluidos hidrotermais e as rochas hospedeiras, durante a evolução do sistema mineralizante do depósito Jaguar.

Na porção central da área de estudo, identifica-se outra região de coloração clara, igualmente representativa do enriquecimento conjunto dos radioelementos K e eU. Essa

anomalia encontra-se associada ao lineamento E–W que corta o Complexo Xingu, composto por granodioritos (Costa *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos são concordantes com a literatura sobre os sistemas IOCG e HNi da PC, como o trabalho de Dutra *et al.* (2023), no qual os depósitos IOCG e HNi da área de estudo estão preferencialmente associados a áreas com enriquecimento em K e eU, evidenciado por altos valores das razões K/eTh e eU/eTh, do Fator F e dos desvios de K e eU. Esses parâmetros refletem a sobreposição de alterações hidrotermais e permitem delimitar zonas favoráveis à circulação de fluidos mineralizantes, sendo importantes ferramentas para a vetorização de alvos exploratórios.

5.3. VETORIZAÇÃO MINERAL DOS DEPÓSITOS DE NÍQUEL E COBRE HIDROTERMAIS

A associação espacial entre anomalias magnéticas positivas, lineamentos estruturais e assinaturas radiométricas relacionadas à alteração hidrotermal permitiu reconhecer áreas favoráveis à prospecção mineral, representadas na TAB. 1.

Os mapas magnetométricos evidenciaram que os depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera encontram-se associados a anomalias magnéticas positivas e à proximidade de importantes lineamentos estruturais. A predominância de estruturas E–W observada neste estudo, juntamente com a participação subordinada de lineamentos NE–SW, demonstra a importância dessas discontinuidades como condutos preferenciais para a circulação de fluidos hidrotermais e para o controle da mineralização. Esse comportamento é consistente com o modelo proposto por Dutra *et al.* (2023), que identificaram as estruturas E–W e NE–SW como os principais controles locais da mineralização de depósitos IOCG e de níquel hidrotermal na PC.

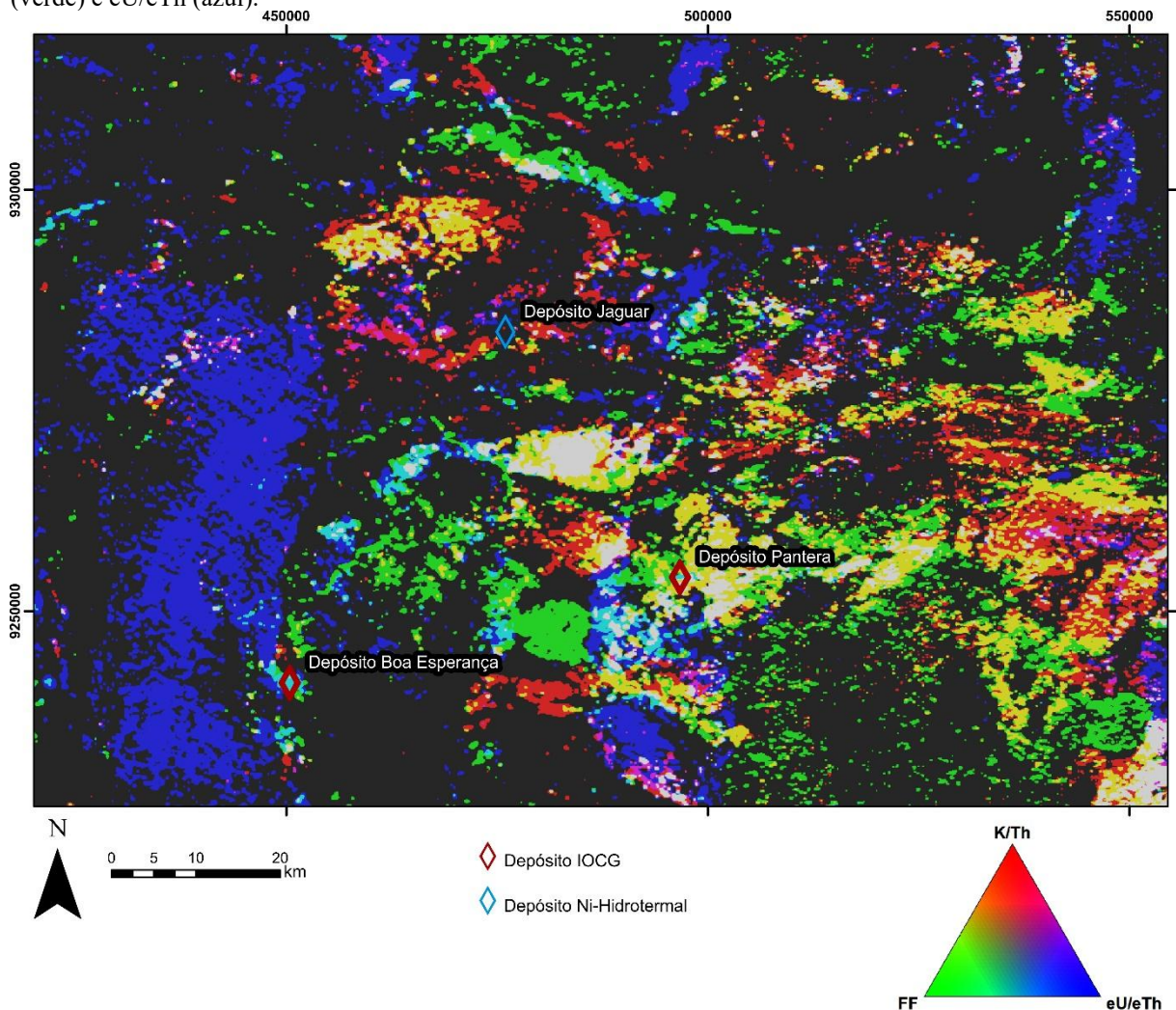
Tabela 1 - Relação dos depósitos com os produtos magnetométricos e gamaespectrométricos.

Depósito	TGA	Lineamento magnético	K/eTh (%/ppm)	eU/eTh	Fator F (%)
Jaguar (HNi)	Anomalia positiva	E–W	Alto (0,926)	Baixo (0,101)	Baixo (0,124)
Boa Esperança (IOCG)	Anomalia positiva	E–W	Moderado (0,196)	Alto (0,565)	Alto (2,514)
Pantera (IOCG)	Anomalia positiva	NE–SW	Alto (0,334)	Alto (0,498)	Alto (2,395)

Fonte: Elaborado pela autora

As áreas potencialmente hidrotermalizadas apresentam valores anômalos nas razões radiométricas, superiores à soma da média e do desvio padrão (Dutra *et al.*, 2023). Desse modo, as áreas coloridas na FIG. 10 indicam as anomalias em cada parâmetro, enquanto a área preta sugere ausência ou hidrotermalismo incipiente. Esses resultados gamaespectrométricos apresentam forte concordância com os depósitos da área de estudo. Desse modo, a definição das áreas anômalas de K/eTh, eU/eTh e Fator F pode sugerir zonas de alteração hidrotermal associadas aos sistemas mineralizados representados no mapa (TAB. 1, FIG. 10).

Figura 10 - Ternários das áreas com potencial alteração hidrotermal mapeada em K/eTh (vermelho), Fator F (verde) e eU/eTh (azul).

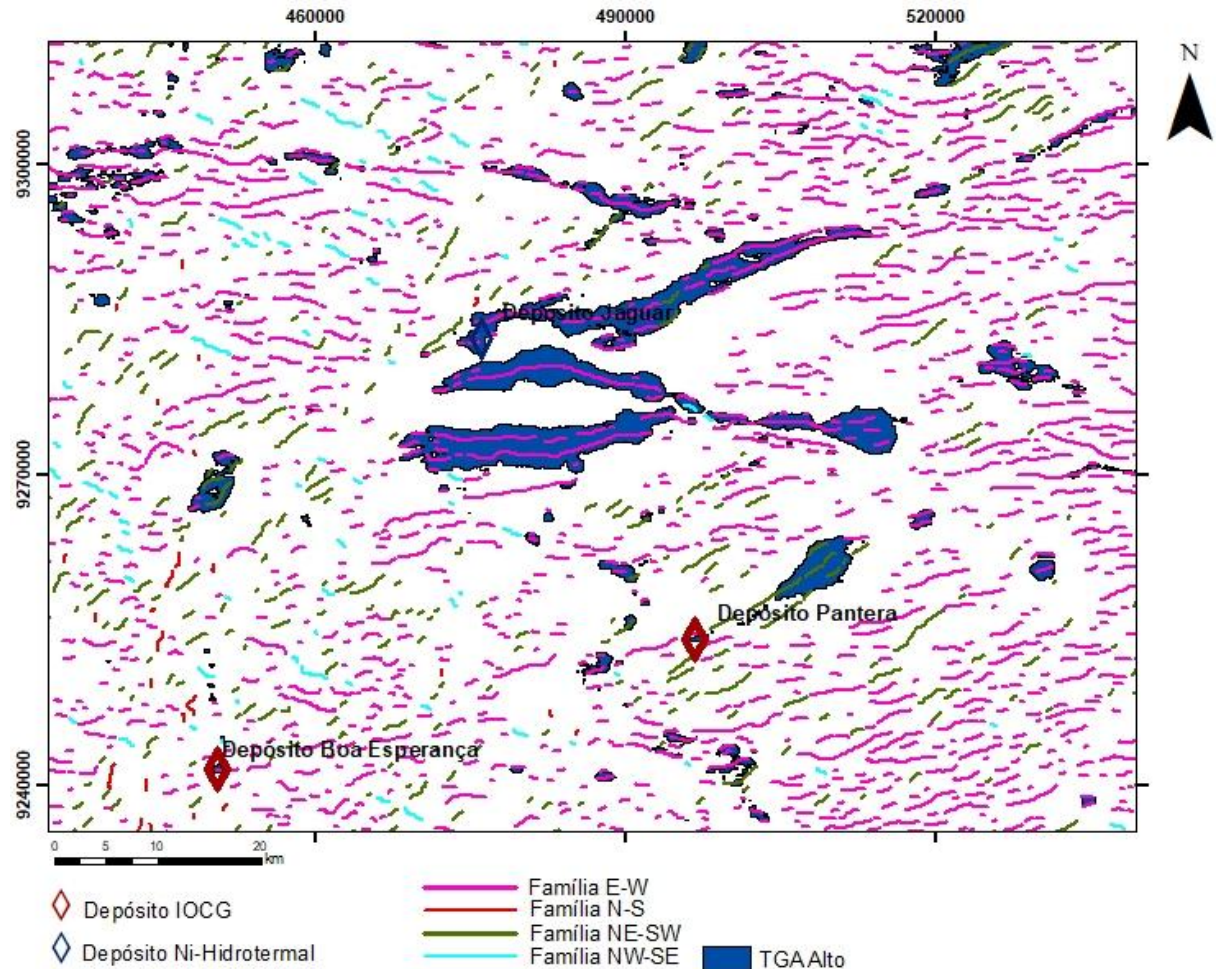


Fonte: Elaborado pela autora

Ferreira Filho *et al.* (2021) demonstraram que o depósito de níquel hidrotermal (HNi) apresenta características comuns aos depósitos de cobre hidrotermal do tipo IOCG da PC, como forte controle estrutural por falhas regionais, intensa alteração hidrotermal e associação com

corpos ricos em magnetita. Essas características explicam a forte resposta magnetométrica observada sobre os depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera e reforçam o uso das anomalias magnéticas como critério de vetorização mineral (FIG. 11). Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que a vetorização mineral não deve basear-se em um único parâmetro geofísico, mas sim na integração de múltiplos indicadores (FIGs. 10 e 11).

Figura 11 - Mapa de anomalias magnéticas com os depósitos hidrotermais e os lineamentos magnéticos.



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da relação entre os depósitos e da análise das FIGs. 10 e 11, as regiões mais favoráveis à prospecção correspondem àquelas onde ocorrem simultaneamente anomalias magnéticas positivas (FIG. 11), predominância de lineamentos estruturais E–W e NE–SW, enriquecimento relativo de K e eU, evidenciado pelos parâmetros K/eTh, eU/eTh e Fator F (FIG. 10), e associação com litologias favoráveis e zonas de alteração hidrotermal com magnetita.

Na área de estudo, também foram reconhecidos outros setores caracterizados pela coincidência entre lineamentos estruturais de direção E–W e NE–SW, anomalias magnéticas positivas (TGA) e enriquecimento relativo de K e eU, evidenciado pelos mapas ternários RGB (FIGs. 10 e 11). A sobreposição desses parâmetros sugere que essas regiões representam novos alvos para vetorização mineral, uma vez que reúnem características semelhantes às observadas nos depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera. Essa integração entre estruturas, assinaturas magnetométricas e evidências de alteração demonstra que essa assinatura geológico-geofísica pode ser utilizada como um importante guia para a seleção de novos alvos exploratórios na porção sudoeste da PC, reduzindo as áreas de pesquisa e direcionando futuras campanhas de exploração mineral.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a integração entre magnetometria, gamaespectrometria e dados geológicos constitui uma ferramenta eficiente para a caracterização geológico-geofísica da porção sudoeste da PC e para a definição de parâmetros aplicáveis à vetorização mineral de depósitos IOCG e de níquel hidrotermal. As anomalias magnéticas positivas associadas aos depósitos Jaguar, Boa Esperança e Pantera podem indicar a presença de minerais magnéticos e a influência do controle estrutural sobre as mineralizações. Os lineamentos E–W predominam na área e apresentam maior relação com Jaguar e Boa Esperança, enquanto os lineamentos NE–SW estão mais associados ao depósito Pantera. Essa distribuição estrutural sugere que a mineralização na área estudada é fortemente condicionada por zonas de fraqueza crustal e por estruturas reativadas, que podem ter atuado como condutos para a circulação de fluidos hidrotermais.

Os dados gamaespectrométricos indicam assinaturas distintas entre os depósitos estudados. O depósito Jaguar apresenta maior associação com o enriquecimento relativo em potássio, enquanto Boa Esperança evidencia maior influência de urânio. Já o depósito Pantera apresenta uma assinatura radiométrica composta de K e U.

A comparação dos resultados com os de Dutra *et al.* (2023, 2025) reforça a ideia de que os depósitos IOCG e de níquel hidrotermal da PC estão associados à interação entre estruturas regionais e locais, bem como à sobreposição de eventos hidrotermais ocorridos durante o Neoarqueano e o Paleoproterozoico. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram essa interpretação, uma vez que os depósitos estudados estão associados a anomalias magnéticas, lineamentos estruturais e respostas gamaespectrométricas.

A integração entre os dados geológicos e geofísicos também permitiu reconhecer novas áreas favoráveis à vetorização mineral em diferentes setores da área de estudo. Essas regiões são caracterizadas pela associação entre lineamentos de direções E–W e NE–SW, anomalias gamaespectrométricas de K e eU, interpretadas como possíveis zonas de alteração hidrotermal, e anomalias magnéticas. Entretanto, essas áreas devem ser consideradas alvos prospectivos, e não depósitos confirmados. A validação de seu potencial requer estudos complementares, incluindo mapeamento geológico de detalhe, amostragem geoquímica e levantamentos geofísicos de maior resolução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. A. S.; GASPARINI, P. **Gamma-ray spectrometry of rocks**. Amsterdam: Elsevier, 1970. 295 p.

AIRO, M.-L. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration. **Surveys in Geophysics**, v. 23, p. 273-302, 2002. DOI: 10.1023/A:1015556614694.

AIRO, M.-L. (ed.). **Geophysical signatures of mineral deposit types in Finland**. Espoo: Geological Survey of Finland, 2015. p. 9-70. (Special Paper, 58).

ALMEIDA, J. A. C. de; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M. A. de; MACAMBIRA, M. J. B.; PIMENTEL, M. M.; RAMO, O. T.; GUIMARÃES, F. V.; LEITE, A. A. S. Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. **Precambrian Research**, v. 187, p. 201-221, 2011.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N.; JORGE-JOÃO, X. S.; COSTA, J. B. S. A megaestruturação da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7., 1988, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBG, 1988. p. 324-333.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. **Serra dos Carajás: folha SB.22-Z-A, Estado do Pará. Escala 1:250.000**. Texto explicativo. Brasília: DNPM/CPRM, 1991. 164 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

ARAÚJO, R.; NOGUEIRA, A. Serra Sul diamictite of the Carajás Basin (Brazil): A Paleoproterozoic glaciation on the Amazonian craton. **Geology**, v. 47, n. 12, p. 1166-1170, 2019. DOI: 10.1130/G46923.1.

ARAÚJO FILHO, R. C.; NOGUEIRA, A. C. R.; ARAÚJO, R. N. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian Craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 102, art. 102665, 2020. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102665.

AVELAR, V. G. **Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia Oriental. 1996**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.

AVELAR, V. G.; LAFON, J. M.; CORREIA JÚNIOR, F. C.; MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 453-460, 1999.

BARBOSA, C.; MENDONÇA, R.; TOMI, G. **Feasibility study technical report: Boa Esperança Copper Project, Pará State, Brazil: an NI 43-101 technical report**. Belo Horizonte: SRK Consultores do Brasil Ltda., 2017. Relatório técnico preparado para Ero Copper Corp.

BARBUENA, D.; SOUZA FILHO, C. R. de; LEITE, E. P.; MIGUEL JÚNIOR, E.; ASSIS, R. R. de; XAVIER, R. P.; FERREIRA, F. J. F.; PAES DE BARROS, A. J. Airborne geophysical data analysis applied to geological interpretation in the Alta Floresta Gold Province, MT. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 31, n. 1, p. 169-186, 2013.

BARROS, C. E. M.; MACAMBIRA, M. J. B.; BARBEY, P.; SCHELLER, T. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 531-538, 2004.

BEA, F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: implications for the chemistry of crustal melts. **Journal of Petrology**, v. 37, n. 3, p. 521-552, 1996.

BOYLE, R. W. **Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits**. Amsterdam: Elsevier, 1982.

CASSINI, L. V.; VALLE, J. G. X. P.; OLIVEIRA, E. L. C. Boa Esperança Copper Deposit: An Unique Magmatic-Hydrothermal System in the Rio Maria Domain, Eastern Amazonian Craton, Northern Brazil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 6., 2025, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: [s.n.], 2025.

COSTA, F. G. da; SANTOS, P. A. dos; SERAFIM, I. C. C. de O.; COSTA, I. S. L.; ROOPNARAIN, S. From Mesoarchean drips to modern-style tectonics in the Carajás Province, Amazonian Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 104, art. 102817, 2020. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102817.

COSTA, U. A. P.; PAULA, R. R.; SILVA, D. P. B.; BARBOSA, J. P. O.; SILVA, C. M. G.; TAVARES, F. M.; OLIVEIRA, J. K. M.; JUSTO, A. P. **Programa Geologia do Brasil - PGB. Mapa de integração geológico-geofísica da ARIM Carajás. Estado do Pará. Escala 1:250.000**. Belém: CPRM, 2016.

DALL'AGNOL, R.; RAMO, O. T.; MAGALHÃES, M. S.; MACAMBIRA, M. J. B. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian Craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. **Lithos**, v. 46, p. 431-462, 1999.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 2. ed. Harlow: Longman, 1995.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for the mineral exploration geoscientist**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys: adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás: litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBG, 1988. p. 11-54.

DOMINGOS, F. H. G. **The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás, Brazil**. 2009. Tese (Doutorado) - Durham University, Durham, 2009.

DREHER, A. M.; XAVIER, R. P.; MARTINI, S. L.; TAYLOR, B. E. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province, Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 43, p. 161-184, 2008.

DUTRA, L. F.; LOURO, V. H. A.; MONTEIRO, L. V. S. The southern IOCG and hydrothermal nickel mineralization trend of the Carajás Mineral Province: airborne geophysical and remote sensing evidences for structural controls and hydrothermal signature. **Journal of Applied Geophysics**, v. 213, art. 105016, 2023. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105016.

DUTRA, L. F.; MONTEIRO, L. V. S.; COUTO JÚNIOR, M. A.; CARNEIRO, C. C. Mineral prospectivity maps for critical metals in the clean energy transition: examples for hydrothermal copper and nickel systems in the Carajás Province. **Minerals**, v. 15, n. 10, art. 1086, 2025. DOI: 10.3390/min15101086.

FABRE, S.; NÉDÉLEC, A.; POITRASSON, F.; STRAUSS, H.; THOMAZO, C.; NOGUEIRA, A. Iron and sulphur isotopes from the Carajás Mining Province (Pará, Brazil): Implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean-Proterozoic transition. **Chemical Geology**, v. 289, n. 1-2, p. 124-139, 2011. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.07.019.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L.; MACAMBIRA, M. J. B.; SANTOS, J. O. S.; ALTHOFF, F. J.; SOARES, J. E. B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157-185, 2013. DOI: 10.1016/j.precamres.2012.04.007.

FERREIRA, F. J. F.; SOUZA, J.; BONGIOLO, A. B. S.; CASTRO, L. G. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. **Geophysics**, v. 78, n. 3, p. J33-J41, 2013. DOI: 10.1190/geo2011-0441.1.

FERREIRA FILHO, C. F.; OLIVEIRA, M. M. F.; MANSUR, E. T.; ROSA, W. D. The Jaguar hydrothermal nickel sulfide deposit: evidence for a nickel-rich member of IOCG-type deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, art. 103501, 2021.

GABRIEL, E. O. **Geologia, geoquímica e petrologia magnética dos granitoides Arqueanos da Porção Nordeste de Água Azul do Norte - Província Carajás**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11658>. Acesso em: 16 jul. 2026.

GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K.; OLSZEWSKI JR., W. J. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 201-211, 1986.

GRAINGER, C. J.; GROVES, D. I.; TALLARICO, F. H.; FLETCHER, I. R. Metallogensis of the Carajás Mineral Province, southern Amazonian Craton, Brazil: varying styles of Archean to Neoproterozoic base and precious metal mineralization. **Ore Geology Reviews**, v. 33, p. 451-489, 2008. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2006.10.010.

GRASTY, R. L. Applications of gamma-ray spectrometry in geophysics. In: HOOD, P. J. (ed.). **Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores**. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1976. p. 455-470.

GRASTY, R. L.; GLYNN, J. E.; GRANT, J. A. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 45-52, 1997.

GUNN, P. J. Interpretation techniques for airborne radiometric surveys. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 65-79, 1998.

HADDAD-MARTIM, P. M.; SOUZA FILHO, C. R. de; CARRANZA, E. J. M. Spatial analysis of mineral deposit distribution: a review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 81, p. 230-244, 2017. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.038.

HADDAD-MARTIM, P. M.; CARRANZA, E. J. M.; SOUZA FILHO, C. R. de. The fractal nature of structural controls on ore formation: the case of the iron oxide copper-gold deposits in the Carajás Mineral Province, Brazilian Amazon. **Economic Geology**, v. 113, p. 1499-1524, 2018. DOI: 10.5382/econgeo.2018.4600.

HENRIQUE, E. F.; ANDRADE, P. J. M. B.; VALLE, J. G. X. P. Geophysics over the Boa Esperança Copper-Cobalt deposit, Carajás Province, Pará State, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY e EXPOGEF, 13., 2013, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: Brazilian Geophysical Society (SBGf), 2013. p. 779-781. DOI: 10.1190/sbgf2013-160.

HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A. A. C.; MEIRELES, E. A. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1., 1982, Belém. **Anais [...]**. Belém: SBG, 1982. p. 100-110.

HOLDSWORTH, R. E.; PINHEIRO, R. V. L. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 22, p. 1105-1123, 2000. DOI: 10.1016/S0191-8141(00)00036-5.

HUHN, S. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; DALL'AGNOL, R. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6., 1999, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: SBG, 1999b. p. 463-466.

HUNT, C. P.; MOSKOWITZ, B. M.; BANERJEE, S. K. Magnetic properties of rocks and minerals. In: AHRENS, T. J. (ed.). **Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants**. Washington, DC: American Geophysical Union, 1995. p. 189-204.

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

JORGE JOÃO, X. S.; ARAÚJO, O. J. B. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A**. Brasília: CPRM, 1992.

JULIANI, C.; MONTEIRO, L. V. S.; FERNANDES, C. M. D. Potencial mineral: cobre. In: MELFI, A. J. *et al.* (org.). **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 134-154.

LAFON, J. M.; MACAMBIRA, M. J. B.; PIDGEON, R. T. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoarchean magmatism in the southwestern part of the Carajás Province, eastern Amazonian Craton, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. **Abstracts [...]**. Rio de Janeiro, 2000. CD-ROM.

LEITE, A. A. S.; DALL'AGNOL, R. Geologia e evolução geológica do Granodiorito Rio Maria. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, p. 77-85, 1994.

LEITE, A. A. S.; DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M. J. B.; ALTHOFF, F. J. Geologia e geocronologia dos granitoides arqueanos da região de Xinguara-PA e suas implicações na evolução do terreno granito-greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 447-458, 2004.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p. L13-L16, 2006. DOI: 10.1190/1.2184367.

LI, X.; PILKINGTON, M. Attributes of the magnetic field, analytic signal, and monogenic signal for gravity and magnetic interpretation. **Geophysics**, v. 81, n. 6, p. J79-J86, 2016. DOI: 10.1190/geo2015-0697.1.

LINDENMAYER, Z. G.; FYFE, W. S.; LAUX, J. H. Contribuição à petrologia dos metabasaltos do Grupo Salobo, Carajás, Pará. **Acta Geológica Leopoldensia**, v. 17, n. 40, p. 115-152, 1994a.

LINDENMAYER, Z. G.; TEIXEIRA, J. B. G. Ore gênese at the Salobo copper deposit, Serra dos Carajás. In: SILVA, M. G.; MISI, A. (ed.). **Base metal deposits of Brazil**. Belo Horizonte: MME/CPRM/DNPM, 1999. p. 33-43.

LINDENMAYER, Z. G.; FLECK, A.; GOMES, C. H.; SANTOS, A. B. S.; CARON, R.; PAULA, F. C.; LAUX, J. H.; PIMENTEL, M. M.; SARDINHA, A. S. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. In: MARINI, O. J.; RAMOS, B. W.; QUEIROZ, E. T. (org.). **Caracterização de depósitos minerais de distritos mineiros da Amazônia**. Brasília, DF: DNPM; CT-Mineral; FINEP; ADIMB, 2005. p. 137-205.

LISBOA, I. B. **Caracterização geológica-geofísica do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás (Cráton Amazônico): implicações metalogenéticas para os depósitos IOCG Pantera e Pedra Branca**. 2023. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

LOPES, A. M. **Caracterização geológica e metalogenética do depósito IOCG Pantera, Domínio Rio Maria, Carajás-PA**. 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MACAMBIRA, E. M. B. **Geologia e aspectos metalogenéticos dos elementos do Grupo da Platina no Complexo Máfico-ultramáfico da Serra da Onça, Sul do Pará**. 1997. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1997.

MACAMBIRA, E. M. B.; VALE, A. G. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: São Félix do Xingu, Folha SB.22-Y-B, Estado do Pará**. Brasília: DNPM/CPRM, 1997. 384 p.

MACAMBIRA, E. M. B. **O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará**. 2003. 217 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MACAMBIRA, J. B.; RAMOS, J. F. F.; ASSIS, J. F. P.; FIGUEIRAS, A. J. M. **Projetos Serra Norte e Pojuca: relatório final**. Belém: DNPM; DOCEGEO; UFPA, 1990. 150 p.

MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra**, v. 7, p. 263-287, 1995.

MACAMBIRA, M. J. B.; LANCELOT, J. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. **International Geology Review**, v. 38, p. 1134-1142, 1996.

MACAMBIRA, M. J. B.; TASSINARI, C. C. G. Estudos Sm/Nd no complexo máfico-ultramáfico da Serra da Onça, sul do Pará: implicações geocronológicas e geotectônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: SBG, 1998.

MACHADO, N.; LINDENMAYER, D. H.; KROGH, T. E.; LINDENMAYER, Z. G. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 329-354, 1991.

MANSUR, E. T.; FERREIRA FILHO, C. F. Magmatic structure and geochemistry of the Luanga mafic-ultramafic complex: further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil. **Lithos**, v. 266-267, p. 28-43, 2016.

MANSUR, E. T.; DARE, S. A. S.; FERREIRA FILHO, C. F.; MIRANDA, A. C. R.; MONTEIRO, L. V. S. The distribution of trace elements in sulfides and magnetite from the Jaguar hydrothermal nickel deposit: exploring the link with IOA and IOCG deposits within the Carajás Mineral Province, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 152, art. 105256, 2023. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105256.

MARANGOANHA, B.; OLIVEIRA, D. C. de; GALARZA, M. A.; MARQUES, G. T. Crustal anatexis and mantle-derived magmas forming Neoarchean A-type granitoids in Carajás Province, northern Brazil: petrological evidence and tectonic control. **Precambrian Research**, v. 338, art. 105585, 2020. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.105585.

MEIRELES, E. M.; HIRATA, W. K.; AMARAL, A. F.; MEDEIROS FILHO, C. A.; GATO, W. C. As mineralizações de ferro da Serra dos Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., 1984, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: SBG, 1984.

MEIRELLES, M. R.; DARDENNE, M. A. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 1, p. 41-50, 1991.

MELO, A. T.; LI, Y.; HITZMAN, M. **Is there hidden potential in Carajás? Insights through the geophysical signature of Cristalino deposit?** *Ore Geology Reviews*, v. 126, art. 103735, 2020. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103735.

MELO, G. H. C. de; MONTEIRO, L. V. S.; MORETO, C. P. N.; XAVIER, R. P.; DELINARDO-SILVA, M. A. Paragenesis and evolution of the hydrothermal Bacuri iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Province (PA). *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 1, p. 73-90, 2014. DOI: 10.5327/Z2317-4889201400010007.

MELO, G. H. C. de; MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; MORETO, C. P. N.; ARQUAZ, R. M.; SILVA, M. A. D. Evolution of the Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province (Brazil): early syngenetic chalcopyrite overprinted by IOCG mineralization. *Ore Geology Reviews*, v. 111, art. 102993, 2019. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.102993.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 39-50, 1997.

MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; CARVALHO, E. R. de; HITZMAN, M. W.; JOHNSON, C. A.; SOUZA FILHO, C. R. de; TORRESI, I. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129-159, 2008. DOI: 10.1007/s00126-006-0121-3.

MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; SOUZA FILHO, C. R. de; MORETO, C. P. N. Metalogênese da Província Carajás. In: SILVA, M. G.; ROCHA NETO, M. B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R. M. (org.). **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. p. 43-84.

MONTREUIL, J.-F.; CORRIVEAU, L.; POTTER, E. G. Alteration facies linkages among iron oxide copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Bear Magmatic Zone, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, v. 111, p. 2045-2072, 2016.

MORETO, C. P. N.; MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; CREASER, R. A.; DUFRANE, S. A.; MELO, G. H. C.; DELINARDO DA SILVA, M. A.; TASSINARI, C. C. G.; SATO, K. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 517-546, 2015. DOI: 10.1007/s00126-014-0549-9.

MOTTA, J. G.; SOUZA FILHO, C. R. de; CARRANZA, E. J. M.; BRAITENBERG, C. Archean crust and metallogenic zones in the Amazonian Craton sensed by satellite gravity data. *Scientific Reports*, v. 9, 2565, 2019.

MOUGEOT, R.; RESPAUT, J. P.; BRIQUEU, L.; LEDRU, P.; MILESI, J. P.; LEROUGE, C.; MARCOUX, E.; HUHN, S. B.; MACAMBIRA, M. J. B. **Isotope geochemistry constraints for Cu, Au mineralizations and evolution of the Carajás Province (Pará, Brazil). 1996. Congresso Brasileiro de Geologia, 39.** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. v. 7, p. 321-324.

MURRAY, K.; PATTERSON, E. L.; ELFEN, S.; RÉ, E. R.; GUZMAN, C. **Boa Esperança Project: NI 43-101 technical report on feasibility study update, Southern Pará State, Brazil.** Vancouver: Ausenco Engineering Canada Inc., 2021. Relatório técnico preparado para Ero Copper Corp.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 507-517, 1972. DOI: 10.1190/1.1440276.

NABIGHIAN, M. N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. **Geophysics**, v. 49, n. 6, p. 780-786, 1984. DOI: 10.1190/1.1441706.

NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W.; PINHEIRO, R. V. L. Formação Águas Claras, Pré-cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra**, v. 7, p. 177-197, 1995.

OLIVEIRA, J. K. M. de; SILVA, A. M.; TAVARES, F. M.; COSTA, I. S. L. Mapping Cu-Au mineral potential (IOCG and Cu-Au polymetallic) in the Northern Copper Belt, Carajás Mineral Province: a data-driven, mineral systems-based approach. **Ore Geology Reviews**, v. 185, art. 106770, 2025. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106770.

OLIVEIRA, M. A. de; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A. A. S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian Craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, n. 2-3, p. 146-160, 2009. DOI: 10.1016/j.jsames.2008.07.003.

OLIVEIRA, M. A.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A. A. S. Geochemistry of the Neoarchean Rio Maria Granodiorite and associated rocks, Rio Maria granite-greenstone terrane, southeastern Amazonian Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 30, p. 100-116, 2010.

OLIVEIRA, M. M. F. de. **Caracterização e metalogênese do depósito de Ni do Jaguar, Província Mineral de Carajás. 2017.** Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

OLSZEWSKI, W. J.; WIRTH, K. R.; GIBBS, A. K.; GAUDETTE, H. E. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. **Precambrian Research**, v. 42, p. 229-254, 1989.

PAULA, F. C.; MELO, G. H. C.; XAVIER, R. P. O depósito de cobre Paulo Afonso: um exemplo de mineralização IOCG paleoproterozoica no setor norte da Província Carajás, Cráton Amazônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 51., 2024, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2024. p. 673.

PIDGEON, R. T.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology**, v. 166, p. 159-171, 2000.

PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 597-606, 2000.

PINHEIRO, R. V. L.; KADEKARU, K.; SOARES, A. V.; FREITAS, C.; FERREIRA, S. N.; MATOS, F. M. V. Carajás, Brazil: a short tectonic review. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 13., 2013, Belém. **Anais [...]**. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 2013. p. 1086-1089.

PRADO, E. M. G.; SOUZA FILHO, C. R. de; CARRANZA, E. J. M.; MOTTA, J. G. Modeling of Cu-Au prospectivity in the Carajás Mineral Province (Brazil) through machine learning: dealing with imbalanced training data. **Ore Geology Reviews**, v. 124, art. 103611, 2020. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103611.

RÉQUIA, K.; STEIN, H.; FONTBOTÉ, L.; CHIARADIA, M. Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 38, p. 727-738, 2003.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. **Terrae Didactica**, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2014.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57, n. 1, p. 116-125, 1992. DOI: 10.1190/1.1443174.

ROLANDO, A. P.; MACAMBIRA, M. J. B. Archean crust formation in Inaja range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., 2003, Salvador. **Extended Abstracts [...]**. Salvador, 2003. CD-ROM.

ROSIÈRE, C. A.; BAARS, F. J.; SEOANE, J. C. S.; LOBATO, L. M.; SILVA, L. L.; MENDES, G. E. Structure and iron mineralization of the Carajás Province. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B**, v. 115, p. 126-133, 2006.

SANTOS, A.; PENA FILHO, J. I. C. **Xinguara: folha SB.22-Z-C, Estado do Pará. Escala 1:250.000**. Brasília, DF: CPRM, 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. 1 CD-ROM.

SCHUTESKY, M. E.; OLIVEIRA, C. G. de. From roots to roof: an integrated model for Neoproterozoic Carajás IOCG system. **Ore Geology Reviews**, v. 127, art. 103833, 2020. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103833.

SIEPIERSKI, L.; FERREIRA FILHO, C. F. Spinifex-textured komatiites in the Carajás Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 66, p. 41-58, 2016.

SILVA, A. B. da; ALVES, F. da M. (org.). **Atlas aerogeofísico do estado do Tocantins**. Goiânia: CPRM, 2021.

SILVA, A. R. C.; OLIVEIRA, J. K. M.; LIMA, R. B.; TAVARES, F. M.; BRILHANTE, J.; SILVA, C. M. G.; GAIA, S. M. S.; COSTA, F. G. Estilos e timing da mineralização de cobre no depósito AQW-1, região do Aquiri (W de Carajás). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 17., 2023, Santarém. **Anais [...]**. Santarém: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 2023. p. 514-519.

SILVA, M. A. D. **Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás. 2014.** Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SILVA, M. G.; TEIXEIRA, J. B. G.; PIMENTEL, M. M.; VASCONCELOS, P. M.; ARIELCO, A.; ROCHA, W. J. S. F. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento), Carajás. In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (ed.). **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia.** Brasília: DNPM-CT-Mineral-ADIMB, 2005. p. 94-151.

SOUZA, S. R. B.; VIEIRA, E. A. Salobo: geology and mineralization. In: PORTER, T. M. (ed.). **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective.** Adelaide: PGC Publishing, 2000. p. 213-224.

SOUZA, Z. S. de; POTREL, A.; LAFON, J.-M.; ALTHOFF, F. J.; PIMENTEL, M. M.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, C. G. de. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region, Carajás Province, Brazil: implications for crustal evolution. **Precambrian Research**, v. 109, p. 293-315, 2001.

TALLARICO, F. H. B. **O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. 2003.** Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

TALLARICO, F. H. B.; FIGUEIREDO, B. R.; GROVES, D. I.; KOSITCIN, N.; MCNAUGHTON, N. J.; FLETCHER, I. R.; REGO, J. L. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of Iron-Oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. **Economic Geology**, v. 100, n. 1, p. 7-28, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/100.1.0007>.

TEIXEIRA, A. S.; FERREIRA FILHO, C. F.; DELLA GIUSTINA, M. E. S.; ARAÚJO, S. M.; SILVA, H. H. A. B. da. Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: evidence for a PGE-mineralized magmatic suite in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 64, p. 116-138, 2015. DOI: 10.1016/j.jsames.2015.09.006.

TEIXEIRA, J. B. G.; OHMOTO, H.; EGGLER, D. H. Geochemistry of the mafic rocks of the Grão Pará Group, Carajás, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, p. 409-420, 1997.

TEIXEIRA, M. F. B.; DALL'AGNOL, R.; SANTOS, J. O. S.; OLIVEIRA, D. C. de; LAMARÃO, C. N.; MCNAUGHTON, N. J. Crystallization ages of Paleoproterozoic A-type granites of Carajás Province, Amazon Craton: constraints from U-Pb geochronology of zircon and titanite. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 312-331, 2018. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.08.020.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics. 2. ed.** Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TRENDALL, A. F.; BASEI, M. A. S.; DE LAETER, J. R.; NELSON, D. R. SHRIMP U-Pb constraints on the age of the Carajás Formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 11, p. 265-277, 1998.

ULBRICH, H. H. G. J.; ULBRICH, M. N. C.; FERREIRA, F. J. F.; ALVES, L. S.; GUIMARÃES, G. B.; FRÜCHTING, A. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. *Geologia USP. Série Científica*, v. 9, n. 1, p. 33-53, 2009.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. da (org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000.** Belém: CPRM, 2008. 328 p.

WARD, S. H. Gamma-ray spectrometry in geologic mapping and uranium exploration. In: SKINNER, B. J. (ed.). **Economic Geology, Seventy-Fifth Anniversary Volume.** Littleton: Society of Economic Geologists, 1981. p. 840-849.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.

XAVIER, R. P.; MONTEIRO, L. V. S.; SOUZA FILHO, C. R.; TORRESI, I.; CARVALHO, E. R.; DREHER, A. M.; WIEDENBECK, M.; TRUMBULL, R. B.; PESTILHO, A. L. S.; MORETO, C. P. N. The iron oxide copper-gold deposits of the Carajás Mineral Province, Brazil: an updated and critical review. In: PORTER, T. M. (ed.). **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective.** Adelaide: PGC Publishing, 2010. v. 3, p. 285-306.

XAVIER, R. P.; MORETO, C. P. N.; MELO, G. H. C. de; TOLEDO, P. I. F.; JUNGER, R.; DELINARDO-SILVA, M. A.; FAUSTINONI, J.; LOPES, A.; MONTEIRO, L. V. S.; PREVIATO, M.; JESUS, S. S. G. P. de; HUHN, S. B. Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil. In: MINERAL RESOURCES TO DISCOVER, 14th SGA Biennial Meeting, 2017. **Proceedings [...].** Quebec: SGA, 2017.

XAVIER, R. P.; MONTEIRO, L. V. S.; MORETO, C. P. N.; PESTILHO, A. L. S.; MELO, G. H. C. de; SILVA, M. A. D.; AIRES, B.; RIBEIRO, C.; FREITAS E SILVA, F. H. The iron oxide copper-gold systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: HEDENQUIST, J. W.; HARRIS, M.; CAMUS, F. (ed.). **Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard Sillitoe.** Littleton: Society of Economic Geologists, 2012. p. 433-454.

ZUCCHETTI, M. **Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA. 2007.** 165 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.