



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE GEOCIÊNCIAS APLICADA E GEODINÂMICA

Jorge Tomás Trovó Echague

**ASSINATURAS GEOFÍSICA, PETROFÍSICA E GEOQUÍMICA
DAS MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO NA PORÇÃO
CENTRAL DA PROVÍNCIA ALTO GUAPORÉ**

Dissertação de Mestrado nº 231

Brasília – DF
2024

Jorge Tomás Trovó Echague

**ASSINATURAS GEOFÍSICA, PETROFÍSICA E GEOQUÍMICA
DAS MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO NA PORÇÃO
CENTRAL DA PROVÍNCIA ALTO GUAPORÉ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas; Área de Concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão-Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Prudente de Melo

Brasília – DF
2024

TE18aa

Tomás Trovó Echague, Jorge
ASSINATURAS GEOFÍSICA, PETROFÍSICA E GEOQUÍMICA DAS
MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO NA PORÇÃO CENTRAL DA
PROVÍNCIA ALTO GUAPORÉ / Jorge Tomás Trovó Echague;
orientador Marcelo Henrique Leão-Santos ; co-orientador
Rodrigo Prudente de Melo. -- Brasília, 2024.
212 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Prospecção Multiparâmetro. 2. Alteração Hidrotermal.
3. Footprints. 4. Ouro Orogênico. I. Henrique Leão-Santos,
Marcelo, orient. II. Prudente de Melo, Rodrigo, co-orient.
III. Título.

Jorge Tomás Trovó Echague

**ASSINATURAS GEOFÍSICA, PETROFÍSICA E GEOQUÍMICA
DAS MINERALIZAÇÕES DE OURO OROGÊNICO NA PORÇÃO
CENTRAL DA PROVÍNCIA ALTO GUAPORÉ**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão-Santos
(Universidade de Brasília/UnB - Orientador)

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira
(Universidade Federal do Paraná/UFPR)

Prof. Dr. Pedro Maciel de Paula Garcia
(Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT)

Brasília – DF

2024

AGRADECIMENTOS

À medida que encerro este capítulo significativo em minha jornada acadêmica, gostaria de expressar minha profunda gratidão àqueles que tornaram esta conquista possível. Este mestrado não seria uma realidade sem o apoio fundamental e o amor generoso da minha família. Aos meus avós e eternos professores **Lúcia Gomes Trovó** e **Luiz Armando Trovó**. Aos meus pais **Maria Margarida Gomes Trovó** e **Javier Martin Echague**. Aos meus irmãos **Caio Martin Trovó Echague**, **Marcelo Trovó Lopes de Oliveira** e **Frederico Trovó Lopes de Oliveira**. Agradeço por serem minha base e minha fonte constante de inspiração. Além de meus padrinhos, **Tabajara Paques Barros** e **Ana Helena Macedo Gouvea**, pelos conselhos e apoio desde o início.

Meus amigos (Mococa, Faculdade, Trabalho), que compartilharam risadas, desafios e triunfos ao longo desta jornada, merecem um agradecimento especial: **Mococa** representada por Gabriel Astolpho Schuster, André Zamarian, Lucas Lopes Duso, Eduardo Michilin, João Felipe Amato, João Calió, Vinicius Spajari, Felipe Costa e Diego Guidorizzi Delena. À turma da **Faculdade** retratada por Ladislau Aparecido Costa Arruja Junior, Bruno Teixeira Campos, Guilherme Bittencourt, Giovanni Argenta Pasetto, Rodrigo Rockenbach Vargas, Issacar Barroso, Jean Carlo Henzel, Caetano Rutsatz, Miguel Costa, Thiago Lima Mendes e Érico Zacchi. Aos colegas e amigos de **Trabalho**, Caio Teixeira, Amanda Mello, Mariana Benedett, José Roberto Erler, Rodrigo Rocha, Mariana Bandeira, Mariana Caixeta, Ram Betancourt, Airton Ferreira, Rafael Rizzardo, Leonardo Manara, Guilherme Canedo, Marcel Dantas, Matheus Nunes, Livio Moreno, Fernanda Carvalho, Frederico Silva, Antonio Mello, Marcelo Martins de Sousa Vieira, Junior Souza, Jhonnatan Rocha, Markus Adolfo Jampani Bentos, James Schroeder, Isadora Munari e Jordanna Brenda. Além disso, quero estender minha gratidão a todos aqueles que, embora não mencionados aqui, também desempenharam papéis valiosos em minha jornada até o momento.

À Aura Minerals Inc, especificamente a Aura Apoena, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos neste mestrado em um ambiente profissional dinâmico. Agradeço pela confiança depositada em mim e pelo ambiente colaborativo que contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Universidade de Brasília e à Universidade Estadual Paulista, sou grato pelas mentes brilhantes que moldaram meu pensamento crítico, representados por Marcelo Henrique Leão-Santos, Rodrigo Prudente de Melo e Welitom Rodrigues Borges, e pela infraestrutura educacional que possibilitou a realização deste mestrado. Agradeço aos professores, orientadores e colegas de classe por desafiarem e inspirarem meu percurso acadêmico.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - BRASIL (CAPES) pelo apoio concedido para a realização deste trabalho, por meio do Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este capítulo da minha vida. Este mestrado não é apenas uma conquista pessoal, mas um esforço coletivo que celebra a importância das relações e da colaboração. Muito obrigado a todos que fizeram parte desta jornada.

Por fim, obrigado!
Jorge

O segredo do sucesso é a constância do propósito.

Benjamin Disraeli

ECHAGUE, Jorge Tomás Trovó. **Assinaturas Geofísica, Petrofísica e Geoquímica das Mineralizações de ouro orogênico na porção central da Província Alto Guaporé**. 2024, 212f. Dissertação. (Mestrado em Geociências) – Programa de Geociências Aplicada e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Brasília.

RESUMO

A prospecção mineral na Província Aurífera do Alto Guaporé (AGGP), situada no sudoeste do Cráton Amazônico, enfrenta desafios como a diminuição das descobertas de novos depósitos e o aumento dos custos de prospecção. A utilização de métodos geofísicos de superfície, que incluem levantamentos magnéticos e geelétricos, combinados com mapeamento geológico e análises estruturais, tem se mostrado eficiente na otimização da seleção de alvos de prospecção. Os depósitos de ouro na AGGP estão associados a falhas inversas e contatos geológicos entre rochas metassedimentares siliciclásticas mesoproterozoicas e um embasamento granítico mesoproterozoico. O alvo Anomalia BP (ABP), localizado próximo à mina Pau-a-Pique, destaca-se por sua mineralização de ouro relacionada a alterações hidrotermais, evidenciadas por assembleias minerais de óxidos de ferro, sulfetos (como pirita) e veios de quartzo. Enquanto os altos valores de cargabilidade e os baixos valores de resistividade mapearam estruturas favoráveis à mineralização até 150 m de profundidade, devido à presença de zonas sulfetadas, os baixos valores de magnetometria identificaram zonas de falha ao longo do contato entre os metassedimentos e o embasamento granítico, associadas à silicificação. O ABP é influenciado pela Zona de Cisalhamento Corredor com halos de alterações hidrotermais bem definidos, que apresentam predominância dos processos de epidotização, sericitização e cloritização, que refletem um zoneamento mineral complexo que inclui plagioclásio, biotita, feldspato potássico, epidoto, quartzo e carbonatos. A análise geoquímica revelou correlações positivas significativas entre elementos litófilos, como Ca, K₂O, Rb e Li, e a presença de ouro, que caracterizam esses elementos como indicadores (*pathfinders*) para a mineralização na região. As assinaturas petrofísicas, incluem a densidade que varia entre 2,6 e 2,8 g/cm³ e baixa susceptibilidade magnética nas zonas diamagnéticas de silicificação, que indicam processos de alteração hidrotermal nas rochas encaixantes, enquanto os dados de gamaespectrometria ressaltaram a predominância de potássio (K). A correlação e eficiência dos dados petrofísicos, geofísicos e geoquímicos utilizados demonstram sua importância na prospecção de ouro orogênico, possibilitando a identificação de novos alvos promissores e contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento sobre as ocorrências de ouro na região.

Palavras-Chave: Prospecção Multiparâmetro; Alteração Hidrotermal; Footprints; Ouro Orogênico.

ECHAGUE, Jorge Tomás Trovó. **Geophysical, Petrophysical and Geochemical Signatures of Orogenic Gold Mineralizations in the Central Portion of the Alto Guaporé Province.** 2024, 212 p. Dissertation. (Master's degree in Geosciences) – Applied Geosciences and Geodynamics Program, University of Brasília, Brasília.

ABSTRACT

Mineral exploration in the Alto Guaporé Gold Province (AGGP), located in the southwestern Amazon Craton, faces challenges such as a decline in new deposit discoveries and increasing exploration costs. The use of surface geophysical methods, including magnetic and geoelectric surveys, combined with geological mapping and structural analyses, has proven efficient in optimizing target selection for exploration. Gold deposits in the AGGP are associated with reverse faults and geological contacts between Meso-Neoproterozoic siliciclastic metasedimentary rocks and a Mesoproterozoic granitic basement. The BP Anomaly target (ABP), located near the Pau-a-Pique mine, stands out for its gold mineralization related to hydrothermal alterations, evidenced by mineral assemblages of iron oxides, sulfides (such as pyrite), and quartz veins. While high chargeability and low resistivity values mapped mineralization-favorable structures down to 150 m depth, due to the presence of sulfide zones, low magnetometry values identified fault zones along the contact between metasediments and the granitic basement, associated with silicification. The ABP is influenced by the Corredor Shear Zone, with well-defined hydrothermal alteration halos, showing a predominance of epidotization, sericitization, and chloritization processes, which reflect a complex mineral zoning that includes plagioclase, biotite, potassium feldspar, epidote, quartz, and carbonates. Geochemical analysis revealed significant positive correlations between lithophile elements, such as Ca, K₂O, Rb, and Li, and the presence of gold, which characterize these elements as pathfinders for mineralization in the region. Petrophysical signatures include densities ranging from 2.6 to 2.8 g/cm³ and low magnetic susceptibility in the diamagnetic silicification zones, indicating hydrothermal alteration processes in the host rocks, while gamma-ray spectrometry data highlighted the predominance of potassium (K). The correlation and efficiency of petrophysical, geophysical, and geochemical data used demonstrate their importance in orogenic gold exploration, enabling the identification of new promising targets and significantly contributing to the advancement of knowledge about gold occurrences in the region.

KEYWORDS: Multiparameter Prospecting; Hydrothermal Alteration; Footprints; Orogenic Gold.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	14
1 Introdução	14
1.1 Objetivos	16
1.2 Estrutura da Dissertação	17
CAPÍTULO II	18
2 Referencial Teórico e Métodos de Trabalho	18
2.1 Revisão.....	18
2.2 Trabalho de Campo - Mapeamento e Amostragem.....	19
2.3 Geofísica	19
2.3.1 Magnetometria	19
2.3.2 Gamaespectrometria	31
2.3.3 Polarização Induzida	35
2.3.3.2 Medidas de Polarização Induzida (Domínios do Tempo e da Frequência)	39
2.3.3.3 Método de Obtenção e Arranjos	42
2.3.3.4 Aquisição e inversão de dado elétrico (Polarização Induzida)	43
2.3.3.5 Análise e Modelagem dos Dados	44
2.4 Petrofísica.....	44
2.5 Amostragem e Petrografia Microscópica	46
2.6 Dados Geoquímicos	47
CAPÍTULO III	49
Artigo “Aplicação de Métodos Geofísicos na Identificação de Estruturas Mineralizadas e Classificação de Áreas para Sondagem. Exemplificado pela Província Aurífera Orogênica de Alto Guaporé.” Publicado na revista Minerals (MDPI) em 2024.	49
CAPÍTULO IV	84
Artigo “Caracterização da Alteração Hidrotermal e Assinatura Petrofísica em Depósitos de Ouro Orogênico: Estudo do alvo Anomalia BP, Província Aurífera Alto Guaporé.”	84
CAPÍTULO V	139
5. Considerações Finais	139
Referências	141
APÊNDICE 1	145
Descrições Petrográficas	145
APÊNDICE 2.....	195
Artigo publicado na revista Minerals (MDPI)	195

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Mapa de acesso e localização da área de estudo com as principais vias de acesso.	15
Figura 2.1 - Fluxograma associado as metodologias e ferramentas aplicadas de acordo com cada etapa do estudo.	18
Figura 3.2 - Em a) campo geomagnético representado de forma simplificada por um dipolo magnético localizado no centro do planeta. Já em b) uma ilustração esquemática, com o vetor do campo geomagnético e seus ângulos de inclinação e declinação (Adaptado de Lowrie, 2007; Dentith e Mudge, 2014).	21
Figura 4.2 – Tabela com as variações de suscetibilidade magnética, para diferentes rochas e minerais (Adaptado de Dentith e Mudge, 2014).	24
Figura 5.2 – Fluxograma comparativo entre Modelos Iniciais, Inversão Tridimensional (Susceptibilidade) e Inversão Tridimensional (Vetor Magnético).	25
Figura 6.2 – Curva L com os valores de β , retirado de Oldenburg e Li (2007).	27
Figura 7.2 – Parâmetros de Inversão (Susceptibilidade Magnética) do levantamento, disponível gratuitamente em https://www.geoss.com.au/	29
Figura 8.2 – Fluxos de preenchimento de parâmetros de configuração dentro do GDD. Em i) Identificação do nome do projeto e número do furo, quando for análise em furo de sondagem; em ii, iv e v): parâmetros de análise. Respectivamente em ii e v, tipo de superfície (cylinder para furos inteiriços e wall para furos cerrados e/ou superfícies planas, bem como seu respectivo diâmetro; e iv) profundidade inicial e unidade de medida a ser utilizada. Já em iii e vi) parâmetros de leitura.	30
Figura 9.2 – Procedimento de medidas pontuais aplicado para zonas não detalhadas e detalhadas do levantamento petrofísico, dentro do espaçamento de 1m, em furo de sondagem.	31
Figura 10.2 – Gráfico da intensidade de contagem em função da energia de radiação (Extraído de Wilford e Minty, 1997).	32
Figura 11.2 – Tabela com Teores de K, eU e eTh em rochas e solos na Austrália por métodos gamaespectrométricos (Modificada de Dickson & Scott, 1997).	33
Figura 12.2 – Materiais utilizados na análise gamaespectrométrica em testemunhos de sondagem e/ou amostras de rocha. Em (A) caixa de chumbo com RS320 posicionado perpendicularmente a janela que dá acesso ao testemunho na gaveta inferior da caixa. Já em (B) alguns dos moldes de teflon disponíveis para acomodação do testemunho/amostra.	35
Figura 13.2 – Figura esquemática idealizada associada ao fenômeno de polarização de eletrodo/metálica. Em i) Fluxo eletrolítico livre em um canal aberto; ii) Polarização de um grão eletronicamente condutor, que bloqueia um canal. (Modificado de Fraser et al., 1964; Kearey, 2009).	37
Figura 14.2 – Figura esquemática idealizada referente ao efeito da polarização de membrana. Em i) uma constricção dentro de um canal entre grãos minerais; e (ii) partículas de argila negativamente carregadas (Fraser et al., 1964) e elementos fibrosos ao longo dos lados de um canal.	39
Figura 15.2 – Produto da polarização induzida com aplicação de um pulso de corrente com polaridade (Reynolds, 1997).	40
Figura 16.2 – Tensões de decaimento para as áreas de medida de cargabilidade parcial (M_i) em i) e, em ii) cargabilidade global (M_g) (Reynolds, 1997).	41
Figura 17.2 – Ilustração esquemática do funcionamento dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo (Mendes, 2023).	43
Figura 18.2 – Fluxograma para rota de preparo e análises químicas.	48
Figura 19.3 – Configurações geológicas regionais (extraídas e modificadas de Melo, R.P.; et. al. (2022). (A) Principais províncias geocronológicas do Cráton Amazônico de acordo com Cole, K.S.; Cole, R.H. (1941) e sua localização na América do Sul. (B) Principais domínios geológicos e tectônicos do sudoeste do Cráton Amazônico (modificado de (Menezes, R.G.; et. al., 1993; Rizzotto, G.J.; et. al., 2013), após (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2007; Litherland, M., 1984; Schobbenhaus, C.; Bellizzia, G., 2001; Tassinari, C.G.; Macambira, M.J.B., 1999). A linha azul tracejada representa os limites dos cinturões do Neoproterozoico inicial que constituem o Cinturão Ocidental Amazônico (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2017). O Cinturão Aguapeí, o mais jovem cinturão de dobra e empurrão formado durante a orogenia Sunsás-Aguapeí (Litherland, M.; et. al., 1989; Litherland, M.; et. al., 1981; Teixeira, W.; et. al., 2010), começou com a deposição de sedimentos siliciclásticos do Grupo Aguapeí em bacias do tipo rifte (1265–1150 Ma) (D'Agrella-Filho, M.S.; et. al., 2008; Geraldés, M.C.; et. al., 2014; Rizzotto, G.J.; et. al., 2014), posteriormente deformados e metamorfoseados em baixo grau durante os estágios finais de compressão e transpressão ao longo da margem Mesoproterozoica do Cráton Amazônico (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2007; Melo, R.P.; et. al., 2022).	55

Figura 20.3 – Mapa geológico da porção central da Província Aurífera Aguapeí (AGGP), indicando a localização aproximada do depósito estudado (alvo ABP), assim como minas comerciais e ocorrências conhecidas de ouro. BN = Bananal; CL = Caldeirão; ER = Ernesto	57
Figura 21.3 – Mapa geológico e seção de perfil do alvo ABP. (A) Seção geológica interpretada da área estudada.....	58
Figura 22.3 – Fotos mostrando aspectos das exposições de superfície intemperizadas da alteração hidrotermal do alvo ABP. (i) Rochas metassedimentares intensamente deformadas aflorando na parede superior da ocorrência Serrinha, mostrando deformação moderada e estratificação (S0) paralela à foliação principal (Sn + 1); (iii) metarenito ferruginoso da ocorrência ferruginoso caracterizado por hematita/especularita hidrotermal limonitizada e pirita oxidada; (iv) amostra de metarenito silicificado com magnetita disseminada da ocorrência Serrinha; e (v) amostra intemperizada da alteração hidrotermal da ocorrência Serrinha caracterizada por veios de quartzo em forma sigmoidal associados a muscovita, pirita oxidada, limonita e textura “box work”. Az = Azimute; Mgt = magnetita; BW = caixa; PyOx = sulfeto oxidado; Ms = muscovita; Ser = sericita; Lm = limonita e Qtz = quartzo.....	60
Figura 23.3 – Fotos de testemunhos de sondagem mostrando os aspectos da alteração hidrotermal das ocorrências Cunha e Serrinha no alvo ABP. As fotos mostram que a alteração hidrotermal de Cunha é caracterizada por veios de quartzo ± calcita (C) em associação com "xistos" de muscovita-biotita hidrotermais formados no contato cisalhado (A) entre os metassedimentos do Grupo Aguapeí e o embasamento granítico. As outras fases hidrotermais incluem magnetita (B); albita (B, F); calcita (C, E); pirita (A, D–F) e calcopirita (E). As características da mineralização no contexto do sistema Serrinha, com graduação entre o embasamento granítico e zonas deformadas com veios (camadas de muscovita hidrotermal), têm paragênese definida por $Qtz + Cal + Al + Py > Cpy + Ms-Ser$ e Mgt e Bt em traços. Mgt = magnetita; Py = pirita; Cpy = calcopirita; Ms = muscovita; Ser = sericita; Cal = calcita; Bt = biotita e Qtz = quartzo.....	61
Figura 24.3 – Mapa de localização das condições topográficas: (A) linhas de aquisição de dados magnéticos, (B) linhas de aquisição de polarização induzida (IP) e anomalias geoquímicas da área. Modelo digital de elevação (DEM). Fonte: ALOS PALSAR — correção radiométrica de terreno. Os pontos de acesso municipal correspondem às linhas vermelhas. PPQ = Pau-a-Pique e ABP = Anomalia BP.	63
Figura 25.3 – Pseudo-seções invertidas cobrindo as duas configurações testadas na linha 6, dipolo-dipolo (DD) e pólo-dipolo (PD), com espaçamentos de 25 e 50 m entre os eletrodos. Nas seções (A–D) para a linha 6 com espaçamento de 25 m entre os eletrodos, estão apresentados tanto os arranjos dipolo-dipolo quanto pólo-dipolo. As seções (E–H) mostram os dois arranjos com espaçamento de 50 m.....	65
Figura 26.3 – Dados magnéticos terrestres: (A) campo magnético residual e (B) gradiente total. Linhas tracejadas em preto destacam a continuidade da zona de cisalhamento do corredor, demarcada por uma anomalia magnética baixa com orientação NW–SE. O modelo digital de elevação (DEM) é proveniente do ALOS PALSAR—correção radiométrica do terreno. PPQ = Pau-a-Pique e ABP = BP Anomalia.....	67
Figura 27.3 – Mosaico tridimensional com a forma dos corpos magnéticos em profundidade, recuperados pela inversão de anomalias dos dados magnéticos, com linhas tracejadas delimitando a área de maior detalhe (C) e o layout topográfico do DEM da área. (A) Relevo do campo magnético residual (RMF) (vista para NW). (B) Modelo magnético recuperado sobreposto ao modelo digital de elevação (DEM) (vista para NW), com resultados obtidos usando malhas de 50 × 50 e 150 × 150 m. (C) Representação da porção mais ao norte do detalhe com malha de 50	68
Figura 28.3 – Visão 3D dos perfis de resistividade geolétrica, correlacionados com anomalias geoquímicas na superfície. Linhas tracejadas brancas destacam os contatos das unidades mapeadas em campo. FMAR = metarenito feldspático; PBSG = sieno-granito biotítico porfirítico; FERM = metarenito ferruginoso; QZV (SS) = veio de quartzo (Sistema Serrinha) e QZV (CS) = veio de quartzo (Sistema Cunha).....	70
Figura 29.3 – Visualização 3D das linhas de aquisição de cargabilidade geolétrica, associadas a anomalias geoquímicas na superfície. Linhas tracejadas brancas destacam os contatos das unidades mapeadas em campo. FMAR = metarenito feldspático; PBSG = sieno-granito biotítico porfirítico; FERM = metarenito ferruginoso; QZV (SS) = veio de quartzo (sistema Serrinha) e QZV (CS) = veio de quartzo (sistema Cunha).....	71
Figura 30.3 – Modelo interpretativo geofísico-geológico (geolétrico-magnético) para depósitos de ouro na AGGP.....	72
Figura 31.3 – Correlação dos resultados magnéticos e geolétricos na linha 5, com a inversão do vetor magnético da isosuperfície, sobreposta pela isosuperfície de cargabilidade (>18 mV/V). MS = Susceptibilidade Magnética e MVI = Inversão do Vetor Magnético.....	75
Figura 32.4 – (A) e (B) Mapa simplificado do SW Cráton Amazônico mostrando os limites aproximados das principais províncias, orógenos, terrenos e cinturões, elementos tectônicos e unidades litológicas. (C) Principais províncias geocronológicas do Cráton Amazônico. MI, Província Maroni-Itacaiunas; VT,	

Província Ventuari- Tapajós; RNJ, Província Rio Negro-Juruena; RO, Província Rondoniana-San Ignacio; SS, Província Sunsá- Aguapeí. (Extraído e modificado de Bettencourt et al., 2010). O polígono vermelho tracejado delinea os limites aproximados do cinturão aurífero do Alto Guaporé no Brasil. SV = mina São Vicente; SF = mina São Francisco; ERC = Complexo Ernesto; PPQ = mina Pau-a-Pique; CB = mina Cabaçal; DM = mina Dom Mario e SR = Província aurífera San Ramón.	90
Figura 33.4 – Mapa geológico da porção central da Província Aurífera Aguapeí (AGGP). Destaque para o contorno da área alvo ABP ao SW. ERN = Ernesto; PPQ = Pau-a-Pique e ABP = Anomalia BP. (Extraído e Modificado de CPRM, 1993).	92
Figura 34.4 – Mapas aerogeofísicos e de relevo digital da porção central da Província de Ouro Aguapeí (AGGP). Os ícones de martelo representam ocorrências e minas no contexto, destacados pela seta que representa a região de estudo. (Extraído e Modificado de CPRM, 2008).	96
Figura 35.4 - Mapas aerogeofísicos magnetométricos da central da Província de Ouro Aguapeí (AGGP). Em (A) mapa da amplitude do gradiente total e (B) mapa do campo magnético anômalo. (Extraído e Modificado de CPRM, 2008).	99
Figura 36.4 – (A) Mapa de localização e (B) mapa geológico hidrotermal detalhado da área ABP, destacando a zona de confluência estrutural dentro do retângulo ao NW (adaptado e modificado de Echague et al., 2024). ERN = Ernesto; PPQ = Pau-a-Pique; BAN = Bana BAN = Bananal; ABP = Anomalia BP; RA = Rio Alegre.	100
Figura 37.4 – (A) Vista em planta mostrando a localização dos furos e a disposição das amostras petrofísicas na área de estudo, juntamente com as ocorrências Ferruginoso, Serrinha e Cunha em superfície. (B) Seção geológica da área alvo Anomalia BP, com informações litológicas dos furos de sondagem da pesquisa (Adaptado de Echague et al., 2024).	102
Figura 38.4 – Materiais e metodologias para aquisição de dados petrofísicos. Em (A) Medidor de suscetibilidade MPP PROBE; GDD (2018); (B) metodologia de coleta de dados de suscetibilidade, onde X representa as pontos de medida dentro de 1 metro de testemunho; (C) balança industrial digital; (D) metodologia para inserção de um becker de amostra com 500 ml de água e becker com o núcleo completamente imerso; (E) caixa de chumbo e (F) moldes de teflon.	103
Figura 39.4 – Correlações de calibração do gamaespectrômetro RS-320. Correlação entre K (%) e K (cpm) em (A), entre eTh (ppm) e eTh (cpm) em (B) e entre eU (ppm) e eU (cpm) em (C).	105
Figura 40.4 – Boxplot (A) e gráfico de dispersão (B) das análises de suscetibilidade magnética de amostras “punctual” da área alvo Anomalia BP.	108
Figura 41.4 – Distribuição estatística dos dados das litologias Granito (A), Xisto (B) e Veio de Quartzo (C), associadas a amostras petrográficas macroscópicas e microscópicas (e.g., luz transmitida) de alguns furos em estudo. Abreviações: Ap = apatita, Bt = biotita, Cal = calcita, Chl = clorita, Ilm = ilmenita, Fds = feldspato, Qtz = quartzo, Ms = moscovita, Po = pirrotita e Py = pirita.	109
Figura 42.4 – Distribuição dos resultados de suscetibilidade magnética média das unidades no campo da área alvo Anomalia BP e sua associação com as respectivas características macroscópicas.	109
Figura 43.4 – Gráfico de correlação entre a susceptibilidade magnética (SI) e o teor de ouro (g/t), destacando o baixo coeficiente de determinação (R^2) entre os parâmetros. Um conteúdo anômalo de ouro (3,4 g/t), não magnético, foi removido para melhor visualizar os dados.	110
Figura 44.4 – Distribuição estatística dos dados de gamaespectrometria das litologias granito, xisto, anfíbólio e veio de quartzo, associadas a todos os furos da Anomalia BP (A-D) e da mina Pau-a-Pique (E-H). GRA = Granito, QZV = Veio de Quartzo e SQSCH = Sericita-Quartzo-Xisto.	111
Figura 45.4 – Gráfico de correlação entre os dados de espectrometria de raios gama e o teor de ouro (g/t). Destaque para o comportamento da linha de tendência entre os radioelementos. GRA = Granito, QZV = Veio de Quartzo e SQSCH = Sericita-Quartzo-Xisto.	112
Figura 46.4 – Representação estatística das variações de densidade das rochas em (A) e dispersão na área alvo Anomalia BP (B). GRA = Granito, DBS = Diabásio e SQSCH = Sericita-Quartzo-Xisto.	113
Figura 47.4 – Gráfico de correlação entre densidade (g/cm^3) e teor de ouro (g/t). Destaque para o baixo coeficiente de determinação R^2 entre os parâmetros.	114
Figura 48.4 – Amostras dos furos de sondagem ABP0004 e ABP0009. (A) Granito maciço de cor marrom avermelhada (GRA), composto por cristais de feldspato (cm), quartzo, plagioclásio, biotita e epidoto. (B) Halo distal de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada, com foliação incipiente, caracterizada por uma matriz predominantemente maciça e níveis milimétricos compostos por fenocristais de quartzo, feldspato e minerais micáceos (e.g., biotita e moscovita) orientados de acordo com o plano de “foliação.” Geralmente com ocorrências de vênulas preenchidas com quartzo e carbonato, além da presença de porfiroblastos de pirita. Observa-se uma concentração de carbonatação e cloritização. (C) Halo intermediário de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada a esbranquiçada, fortemente foliada, marcada por níveis alternados compostos de quartzo, feldspato e carbonatos. Presença de porfiroblastos de	

pirita > calcopirita e epidoto, além de minerais micáceos (e.g., biotita e moscovita) orientados de acordo com a foliação. Observa-se uma concentração significativa de carbonatação, sericitização e cloritização. (D e E) Halo proximal de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada/esbranquiçada, foliada (com xistosidade bem-marcada) e de grão fino, composta por quartzo, carbonato e minerais micáceos alternados (biotita, moscovita, sericita e clorita), albita e óxidos de ferro.	115
Figura 49.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (182,50 m), determinadas pela foliação gnáissica característica com cristais micáceos ao redor da matriz de feldspato potássico e quartzo. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (61,91 m), sendo o processo de saussuritização evidente no plagioclásio e a foliação incipiente determinada por minerais micáceos nos interstícios da matriz feldspática e de quartzo. <i>NX= Nicóis Cruzados; NP= Nicóis Paralelos</i>	117
Figura 50.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (44,70 m), determinando uma estrutura foliada milonítica incipiente, marcada por minerais micáceos (biotita e moscovita), além de um aumento nos óxidos de ferro (i.e., ilmenita). Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (108,73 m), onde o processo de saussuritização é evidente no plagioclásio e na foliação incipiente determinada por minerais micáceos nos interstícios da matriz quartzo-feldspática. <i>NX= Nicóis Cruzados; NP= Nicóis Paralelos</i>	118
Figura 51.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (257,72 m), determinando uma estrutura fortemente foliada, caracterizada pela presença de minerais micáceos (biotita e moscovita), embora com características ígneas (quartzo-feldspato), com plagioclásio saussuritizado. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (101,18 m), determinadas por forte foliação (S1 e S2) e veios de quartzo associados, definidas por minerais micáceos e intensa cloritização, carbonatação e sericitização, além de aumento nos óxidos de ferro (i.e., ilmenita e magnetita). <i>NX= Nicóis Cruzados; NP= Nicóis Paralelos</i>	120
Figura 52.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (285,74 m), determinando uma estrutura fortemente foliada, caracterizada por minerais micáceos (moscovita- sericita), e a seta vermelha destaca características de migração de borda, extinção ondulante (“deformações repetitivas”) e sombras de pressão em porfiroblastos de pirita com extinção ondulante. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (425,38 m), marcadas por forte foliação caracterizada por minerais micáceos e cloritização, carbonatação e sericitização, além de um aumento nos óxidos de ferro (ilmenita e magnetita) e apatita. <i>NX= Nicóis Cruzados; NP= Nicóis Paralelos</i>	121
Figura 53.4 – Diagramas químicos seguindo a ordem lógica mencionada acima. (A): Diagrama ETR normalizado por condrito de Sun e McDonough (1989); (B): Composição total da rocha no diagrama (Na ₂ O + K ₂ O) versus K ₂ O/(K ₂ O + Na ₂ O) (% em peso) (Hughes, 1973); (C, D, E e F): Diagramas de Hacker de SiO ₂ versus Rb, Na ₂ O, K ₂ O e CaO. (Baseado em Melo, 2016).	123
Figura 54.4 – Diagramas químicos associados à alteração hidrotermal do alvo Anomalia BP. (A): Diagrama molar Na/Al vs K/Al (Modificado de Davies & Whitehead, 2006) e (B): Diagrama ternário Al-K-Mg (Scott Halley, 2016).	126
Figura 55.4 – Diagrama de evolução paragenética do alvo Anomalia BP, de acordo com as zonas de alteração hidrotermal.	128
Figura 56.4 – Compilação de dados petrofísicos e geoquímicos caracterizando o Alvo de Anomalia BP conforme furo ABP0004. Destacando as estimativas visuais da presença de veios de quartzo e da extensão das alterações de sericitização e sulfetação, onde 0 representa ausência de presença e 5 representa forte alteração e/ou forte presença. Para sulfetos (frescos), a escala vai de 0 a 3, onde 1 é uma baixa proporção de sulfetos e granulometria fina e 3 uma alta proporção de sulfeto e granulometria grossa.	130
Figura 57.4 – Compilação de dados petrofísicos e geoquímicos caracterizando o Alvo de Anomalia BP conforme furo ABP0009. Destacando as estimativas visuais da presença de veios de quartzo e da extensão das alterações de sericitização e sulfetação, onde 0 representa ausência de presença e 5 representa forte alteração e/ou forte presença. Para sulfetos (frescos), a escala vai de 0 a 3, onde 1 é uma baixa proporção de sulfetos e granulometria fina e 3 uma alta proporção de sulfeto e granulometria grossa.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.2 – Valores indicativos de cargabilidade para alguns materiais geológicos (modificada de TELFORD et al.,1990; Alagia, 2018)	41
Tabela 2.2 – Relação de amostras de sondagem e superfície, utilizadas para as análises.....	46
Tabela 3.4 – Resumo das características do depósito Pau-a-Pique de acordo com autores anteriores e a área da Anomalia ABP.	100
Tabela 4.4 – Lista de furos de sondagem e amostras de superfície utilizadas para análises.....	105

CAPÍTULO I

1 Introdução

Os depósitos de ouro orogênico, constituem um dos seis principais tipos de depósitos de ouro (Robert et al. 2007). Ocorrem predominantemente hospedados em terrenos metamórficos, que incluem desde sequências metavulcanossedimentares paleoproterozoicas até cinturões metamórficos fanerozóicos (Goldfarb et al., 2001; Goldfarb, 2020).

Atípicas, em termos de idade, as jazidas de ouro da Província Aurífera Alto Guaporé (AGGP), localizadas próximo à fronteira entre o Brasil e a Bolívia, foram formadas no início do Neoproterozóico e constituem uma importante província mineira regional em termos de produção de ouro e potencial exploratório (Melo et al., 2022). Esses depósitos foram formados nos estágios finais de evolução do Cráton Amazônico (~920Ma) e são caracterizados pela presença de ouro (Au), em veios de quartzo e em sulfeto (pirita, raramente arsenopirita) disseminado na zona de minério.

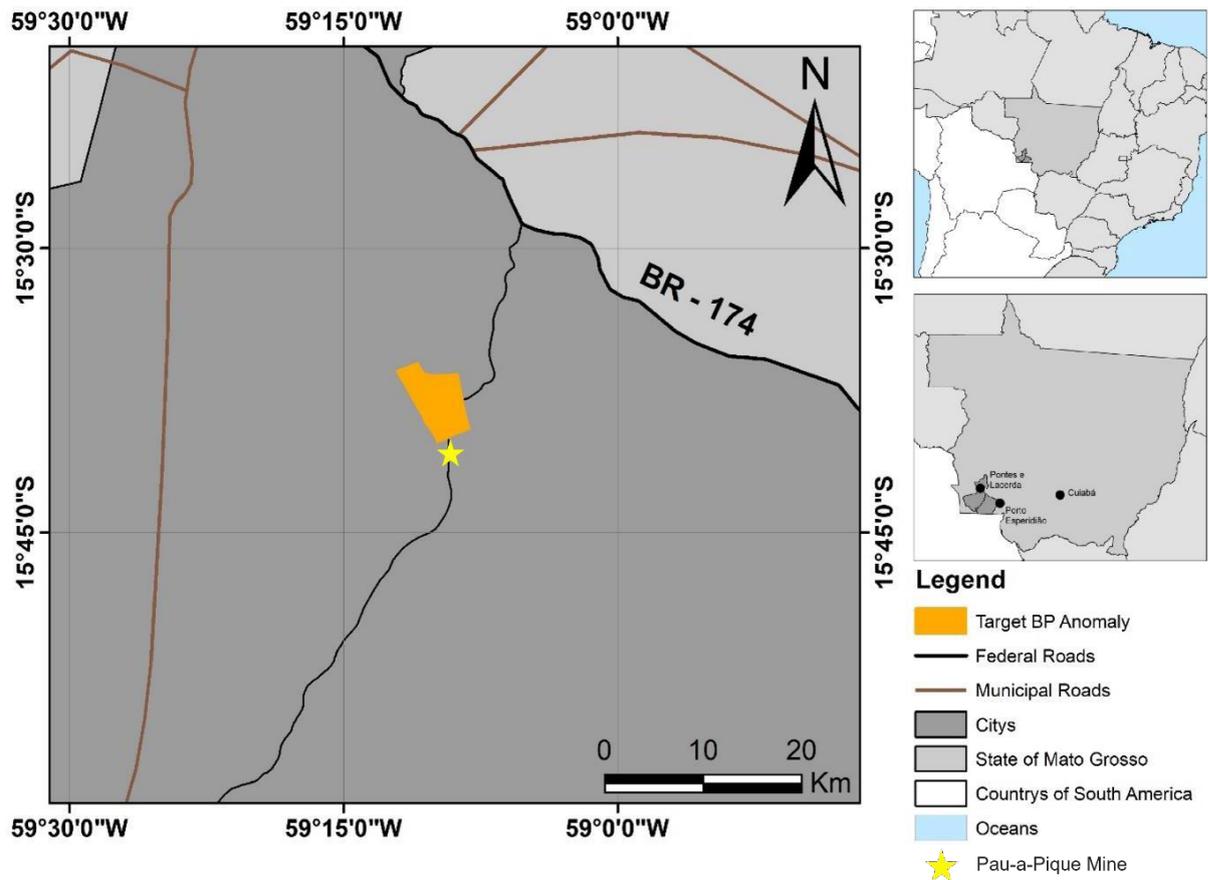
A maioria dos depósitos, estão hospedados em rochas metassedimentares do Grupo Aguapeí, ou ao longo do contato com rochas do embasamento Mesoproterozoico, constituído por rochas ígneas félsicas a intermediárias e sequências vulcanossedimentares.

Os depósitos da porção centro-sul da província (Mina Pau-a-Pique e Complexo Ernesto) são os exemplares mais bem estudados da região, conforme descrito por Melo (2016) e Melo et al. (2022) e por isso foi escolhido para o desenvolvimento da presente pesquisa.

A área de estudo, localizada poucos quilômetros à norte da Mina Pau-a-Pique (Figura 1.1), na porção sul da província encerra longo histórico prospectivo que se inicia na década de 1980 com a chegada da BP Mineração. Na década de 1990, a empresa Mineração Santa Elina Indústria e Comércio S.A. passou a atuar, seguida pela *Yamana Gold Inc.* até meados de 2016, quando as áreas passaram a ser administradas pela *Aura Minerals Inc.*

A região é caracterizada por uma arquitetura estrutural complexa resultante da sobreposição da Sinclinal do Caldeirão com a Zona de Cisalhamento Corredor (*e.g.*, Fernandes et al., 2006) acompanhada de zonas de cisalhamento secundárias, subparalelas. A alteração hidrotermal inclui alteração propilítica, fílica, carbonatação, sulfetação e silicificação, cuja

intensidade e associação mineral variam das porções distais às regiões proximais às estruturas mineralizadas. Em superfície, os halos de alteração associados às ocorrências da anomalia BP (Serrinha, Cunha e Ferruginoso) são identificados por veios de quartzo e silicificação da rocha associados a óxidos/hidróxidos de Fe, que no último caso resultam do intemperismo de sulfetos e de óxidos de Fe e Ti, parte da assembleia associada a essas ocorrências (*e.g.*, Melo et al., 2022; Echague et al., 2024).



O uso indiscriminado da geofísica na identificação de corpos de minério na exploração de depósitos de ouro do tipo orogênico pode apresentar desafios significativos devido aos seguintes fatores: (i) complexidade estrutural e geológica da região onde os corpos de minério estão hospedados; (ii) assembleia hidrotermal caracterizada por sulfeto disseminado em meio a silicatos de natureza predominantemente diamagnética e com alta resistividade; e (iii) amplo equilíbrio termal entre o fluido e as rochas hospedeiras da mineralização, que resulta em halos de alteração hidrotermal menores não telescopados, como é comum em outros tipos de depósitos hidrotermais.

Alguns estudos apontam a necessidade uma análise criteriosa e integrada de dados geológicos e geofísicos para a identificação de alvos e a avaliação do potencial mineral utilizando geofísica (*e.g.*, Yang et al. 2021). Armistead et al. (2006) discutem as fontes de fluidos e metais em depósitos de ouro orogênico, destacando como a compreensão das interações entre os fluidos mineralizadores e as rochas hospedeiras pode impactar diretamente na eficiência dos métodos geofísicos utilizados na exploração. Além disso a aplicabilidade integrada de métodos potenciais, como magnetometria e gravimetria, junto com polarização induzida e/ou HTEM, tem se mostrado eficaz na identificação de zonas mineralizadas e estruturas geológicas em subsuperfície, que podem ser hospedeiras da mineralização (Müller et al., 2021; Echague et al., 2024).

Essa pesquisa buscou integrar dados geológicos, geofísicos, petrofísicos e geoquímicos para caracterizar as assinaturas associadas à mineralização do Alvo BP. Foram executados levantamentos geofísicos terrestres potenciais e elétricos no alvo estudado que foram analisados em conjunto com dados de mapeamento geológico de superfície da área, análises petrofísicas, análises geoquímicas e petrografia das rochas da zona de alteração hidrotermal do depósito. O objetivo foi obter uma integração inovadora entre dados geológicos e geofísicos e sua aplicabilidade na exploração *brownfield* em escala de distrito mineral.

Os resultados mostraram que tal abordagem tem potencial para ser amplamente aplicado na condução de trabalhos de sondagem em trabalhos de exploração *brownfield* e os dados obtidos podem servir de guia prospectivo para outras áreas da província.

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, sob orientação da Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão-Santos e coorientação do Prof. Dr. Rodrigo Prudente de Melo e apoio do Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges.

1.1 Objetivos

De forma mais ampla o objetivo da pesquisa foi investigar os controles geológicos e metalogenéticos do alvo ABP (usado como estudo de caso) por meio da aplicação integrada de dados geológicos, geoquímicos e petrofísicos com ferramentas de geofísica

terrestre. Os parâmetros prospectivos obtidos podem, de maneira geral, ser extrapolados para outros depósitos de ouro na região.

Os objetivos específicos abrangem: (i) compreender o sistema metalogenético do alvo usado como estudo de caso, com a aplicação de métodos geofísicos para entender a extensão do alvo em profundidade e contribuir com trabalhos exploratórios, e geração de modelos prospectivos; (ii) avaliar a aplicabilidade de métodos geofísicos como ferramentas fundamentais na prospecção de depósitos de ouro; (iii) caracterizar as assinaturas geofísicas, petrofísicas (*i.e.*, suas propriedades magnéticas e elétricas) e geoquímicas do alvo, visando sua aplicabilidade para os demais depósitos da província.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos.

Capítulo I: introduz o tema fornecendo a contextualização da pesquisa e apresentando os objetivos gerais e específicos do estudo.

Capítulo II: demonstra o referencial teórico subdividido para cada método empregado nesta pesquisa. As abordagens foram as seguintes: magnética, elétrica, petrofísica (*i.e.* susceptibilidade magnética, radiometria e densidade), geoquímica e geológica, detalhando a aplicação de cada uma delas.

Capítulo III: destaca o primeiro artigo produzido durante a pesquisa, utilizando predominantemente dados geofísicos (*i.e.* elétricos e magnéticos) e geológico-geoquímicos para criação do modelo prospectivo do alvo Anomalia BP. Artigo publicado na revista Minerals (MDPI): Application of Geophysical Methods in the Identification of Mineralized Structures and Ranking of Areas for Drilling as Exemplified by Alto Guaporé Orogenic Gold Province – Echague et al. (2024).

Capítulo IV: apresenta o segundo artigo gerado durante a pesquisa, continuando o trabalho iniciado no primeiro artigo. Aqui, são detalhadas as investigações geofísicas, petrofísicas e geoquímicas (*i.e.* furos de sondagem) realizadas no alvo Anomalia BP, e as associações com as assinaturas regionais por meio dos dados públicos.

Capítulo V: sumariza os conhecimentos adquiridos e desenvolvidos ao longo da pesquisa, por meio de discussões e conclusões que consolidam as descobertas e contribuições do estudo.

CAPÍTULO II

2 Referencial Teórico e Métodos de Trabalho

Neste capítulo, é apresentado o embasamento teórico que fundamenta os diversos métodos empregados nesta pesquisa. Em termos gerais, os métodos geofísicos, geoquímicos e geológicos serão abordados com destaque. A geofísica será investigada por meio das técnicas de magnetometria, gamaespectrometria, eletrorresistividade e polarização induzida. Métodos analíticos foram executadas com os dados geoquímicos, enquanto os métodos de mapeamento geológico e caracterização petrográfica foram aplicados para entendimento e correlações petrofísicas das unidades e mineralizações do ABP.

Uma síntese das metodologias utilizadas para construção deste trabalho foram resumidas no fluxograma a seguir:

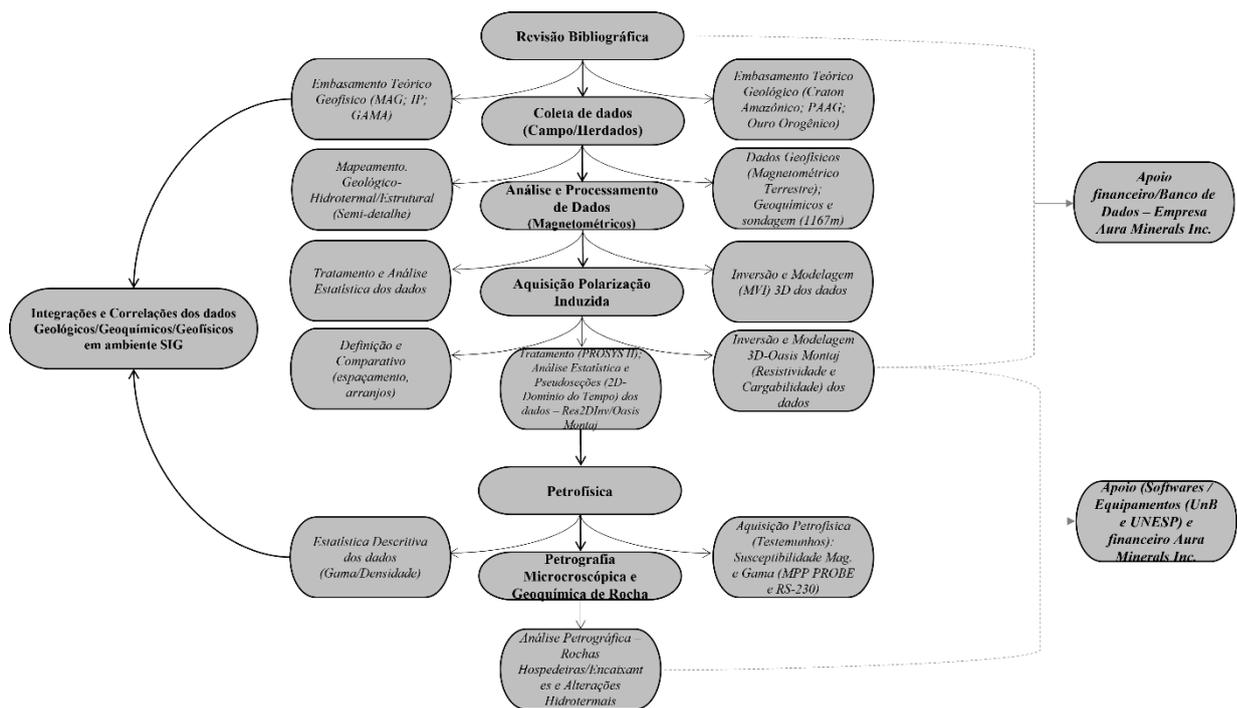


Figura 2.1 - Fluxograma associado as metodologias e ferramentas aplicadas de acordo com cada etapa do estudo.

2.1 Revisão

Etapa centralizada no contexto geológico do sudoeste do Cráton Amazônico, mais precisamente na AGGP. Fundamentada em depósitos metamórfico-hidrotermais (Ouro

Orogênico) na porção sul do cinturão Aguapeí e suas configurações geológicas-geoquímicas-geofísicas preditivas: rochas hospedeiras, alterações hidrotermais, paragêneses de minério, controles estruturais, assinaturas geofísicas (*e.g.*, magnéticas/gamaespectrométricas), etc. Informações estas, compiladas e estruturadas pelo banco de dados geológicos, cedido pela Aura Minerals Inc. E, posteriormente trabalhadas em ambiente SIG na geração de mapas temáticos, seções geológicas, sempre alicerçada nas informações da equipe de exploração e geologia de mina da Aura Aipoena, e que, foram essenciais para construção e interpretação do alvo estudado. Os métodos empregados na pesquisa, geofísica de detalhe (MAG/IP), geoquímica multielementar (ICPMS), petrografia e petrofísica, foram de especial importância para o entendimento metalogênico.

2.2 Trabalho de Campo - Mapeamento e Amostragem

A etapa de campo, associada ao mapeamento geológico semi-sistemático, estrutural e hidrotermal, foi realizada em conjunto com a equipe da Aura Minerals Inc., com o objetivo de compreender o contexto estrutural NE-SW da área. Esse estudo considerou a condição estrutural da Zona de Cisalhamento Corredor (CSZ), as relações de contato entre o embasamento granítico da Suíte Pindaiatuba (PIS) e os metassedimentos do Grupo Aguapeí (AGP), bem como as zonações hidrotermais do alvo investigado.

Posteriormente aos trabalhos em campo, viabilizou-se a geração de mapas geológicos-estruturais-hidrotermais, bem como, a integração de mapas geofísicos terrestres (magnetométricos) cedidos pela empresa e aerolevantamentos públicos, visando tornar ainda mais assertiva as relações de contato em áreas pouco amostradas e identificar possíveis anomalias gamaespectrométricas/magnetométricas. Em adição, foram descritos dois furos de sondagem (1170m), com objetivo de identificar a disposição geométrica, características da alteração hidrotermal e correlações com teores de minério no alvo.

2.3 Geofísica

2.3.1 Magnetometria

A magnetometria é um dos métodos mais antigos da geofísica aplicada e está fundamentada na Lei de Ampère (equações 2, 3 e 4), a qual, associa a geração de um campo magnético (H) por fluxos de correntes elétricas: ôhmicas (J) ou de deslocamento ($\frac{\partial D}{\partial t}$). D representa o deslocamento dielétrico (C/m^2).

$$\int_{\partial S} \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{t}} \, dl - \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\partial v} \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = \iint_S \mathbf{J} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS \quad (1)$$

Aplicando o rotacional:

$$\iint_S \nabla \times \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = \iint_S \mathbf{J} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS \quad (2)$$

E, por fim, transferindo o termo correspondente ao deslocamento dielétrico (\mathbf{D}) para o outro lado da igualdade:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

A magnetometria encontra extensa aplicação na solução de uma variedade de desafios relacionados a materiais magnéticos. Isso inclui atividades como a prospecção de minerais metálicos, identificação e mapeamento de falhas geológicas e outras estruturas, geologia de engenharia, arqueologia, além de diversas outras aplicações (Milsom, 2008).

Segundo a Lei de Ampère, o campo geomagnético surge devido às movimentações convectivas presentes no núcleo externo da Terra, que resultam na geração de correntes elétricas (Hinze et al., 2013). Dentith e Mudge (2014) simplificam a compreensão ao sugerir que 90% do campo geomagnético pode ser conceituado como resultante de um ímã hipotético em forma de barra longa, posicionado no centro da Terra, com suas extremidades alinhadas aos polos magnéticos correspondentes (Figura 3.2).

As anomalias magnéticas provocadas por formações rochosas representam efeitos localizados que se sobrepõem ao campo magnético principal da Terra, conhecido como campo geomagnético. Esse último, ao contrário do campo gravitacional terrestre, apresenta uma complexidade geométrica mais acentuada, manifestando variações irregulares em termos de orientação e magnitude conforme a latitude, a longitude e o tempo (Kearey; Brooks; Hill, 2009).

Posto isso, a direção do vetor campo geomagnético pode ser decomposta conforme a Figura 3.2b (*i.e.* inclinação e declinação magnética), variada principalmente em função da posição na superfície terrestre.

Na Figura 3.2, os elementos do campo magnético são apresentados, onde D representa a declinação do campo magnético, I é a inclinação do campo magnético em relação à horizontal, F representa o módulo do vetor campo magnético, e as coordenadas x e y indicam o norte e leste geográfico, respectivamente, enquanto z representa a componente vertical.

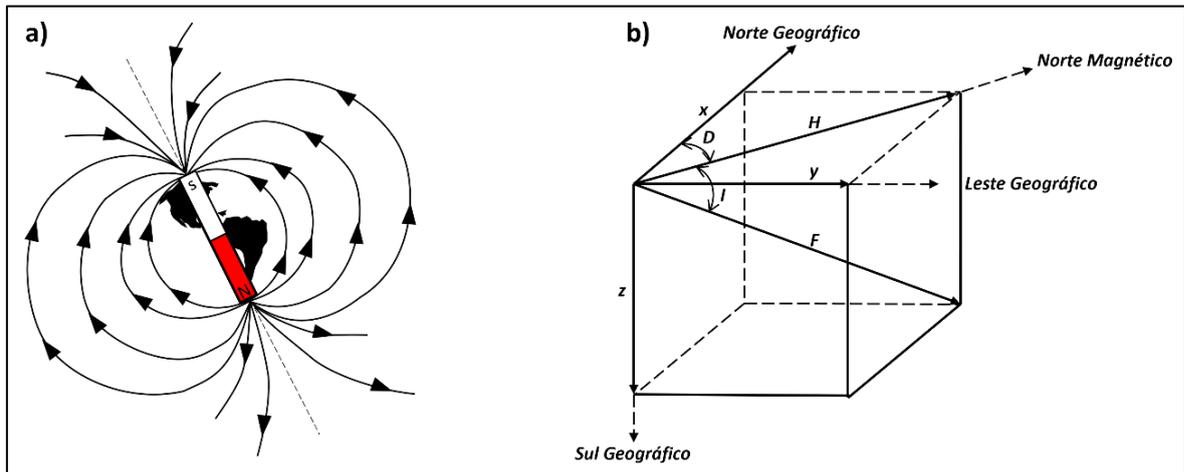


Figura 3.2 - Em a) campo geomagnético representado de forma simplificada por um dipolo magnético localizado no centro do planeta. Já em b) uma ilustração esquemática, com o vetor do campo geomagnético e seus ângulos de inclinação e declinação (Adaptado de Lowrie, 2007; Dentith e Mudge, 2014).

2.3.1.1 Susceptibilidade Magnética

A magnetização é um aspecto essencial na prospecção magnética, sendo a susceptibilidade magnética um parâmetro crucial. Ela representa a capacidade de um material se magnetizar quando exposto a um campo magnético. Ao aplicar um campo H a um material, ele desenvolve uma magnetização ou imantação M , que é diretamente proporcional ao campo, sendo κ a susceptibilidade magnética do material, conforme expresso por:

$$M = \kappa \cdot H \quad (4)$$

Embora a susceptibilidade seja adimensional, Como decorrência do sistema de unidades da magnetização (M) e do campo magnético H ($k = M/H$), a magnitude da susceptibilidade magnética (k) é diferente, ou seja, k (SI) = $4\pi k'$ (cgs). Em alguns materiais, a susceptibilidade é positiva, enquanto em outros é negativa; o sinal positivo ou negativo indica o sentido da intensidade de magnetização em relação ao campo aplicado.

As medições de susceptibilidade magnética podem ser realizadas em campo, diretamente em afloramentos, ou em laboratório, utilizando amostras provenientes de afloramentos e testemunhos de sondagem. Os dispositivos usados para medir a susceptibilidade, conhecidos como susceptibilímetros, geralmente empregam um sistema indutivo. O sensor desses instrumentos consiste em um núcleo em forma de U, feito de material com alta permeabilidade magnética, enrolado por uma bobina. Ao passar corrente alternada pela bobina, ocorre a geração de um fluxo de campo magnético oscilante através do sistema sensor-ar. Quando uma amostra de rocha contendo minerais magnéticos é aproximada do sensor, há uma redução na relutância sensor-amostra, pois a presença da amostra facilita o fluxo magnético. Essa diminuição da relutância resulta em um aumento da indutância do sistema, que pode ser detectado e medido como uma variação de voltagem, representada em uma escala numérica no instrumento. Os valores numéricos fornecidos pelo instrumento são posteriormente convertidos em valores de susceptibilidade por meio de uma curva padrão fornecida pelo fabricante do equipamento, construída a partir de medidas em amostras de susceptibilidade conhecida. É importante que a frequência de oscilação no sistema indutor seja baixa (inferior a 5000 Hz) para minimizar os efeitos gerados pela condutividade elétrica da amostra (Jácomo, 2010).

2.3.1.2 Propriedades magnéticas das rochas e minerais

A característica magnética de uma rocha é influenciada pela proporção de minerais presentes na rocha e pela susceptibilidade magnética específica de cada mineral (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Esses minerais podem ser classificados de acordo com o seu comportamento, quando submetidos a um campo externo em: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (Dentith e Mudge, 2014) (Figura 4.2).

Minerais Diamagnéticos

Estes minerais exibem uma susceptibilidade de baixa intensidade e negativa, gerando um magnetismo oposto ao campo induzido, com valores da ordem de 10^{-5} no Sistema Internacional (SI). Exemplos comuns desses minerais incluem quartzo, calcita, feldspatos, bem como uma ampla variedade de argilas que demonstram comportamento diamagnético (Butler, 1992; Dentith e Mudge, 2014).

Minerais Paramagnéticos

Minerais paramagnéticos exibem uma susceptibilidade positiva, embora fraca, sendo desta ordem maior do que a dos minerais diamagnéticos, geralmente em torno de 10^{-3} no Sistema Internacional (SI). Esses minerais são notáveis pela presença de ferro, incluindo olivina, piroxênios, anfibólios, e alguns exemplares economicamente significativos como pirita e calcopirita (Hinze et al., 2013).

Materiais Ferromagnéticos (Sensu Lato, Ferrimagnéticos e Antiferromagnéticos)

Os materiais ferromagnéticos são caracterizados pelo alinhamento de todos os spins em uma única direção, resultando em uma alta susceptibilidade magnética (positiva). Exemplos incluem ligas metálicas produzidas sinteticamente em laboratórios. Os minerais ferrimagnéticos, equivalentes geológicos dos ferromagnéticos, ocorrem naturalmente no meio geológico. Minerais como magnetita, pirrotita (monoclínica), maghemita e ilmenita são exemplares dessa classe. Já os minerais antiferromagnéticos possuem uma susceptibilidade positiva, porém baixa, semelhante aos paramagnéticos. Um exemplo comum é a hematita (Butler, 1992; Hinze et al., 2013; Dentith e Mudge, 2014).

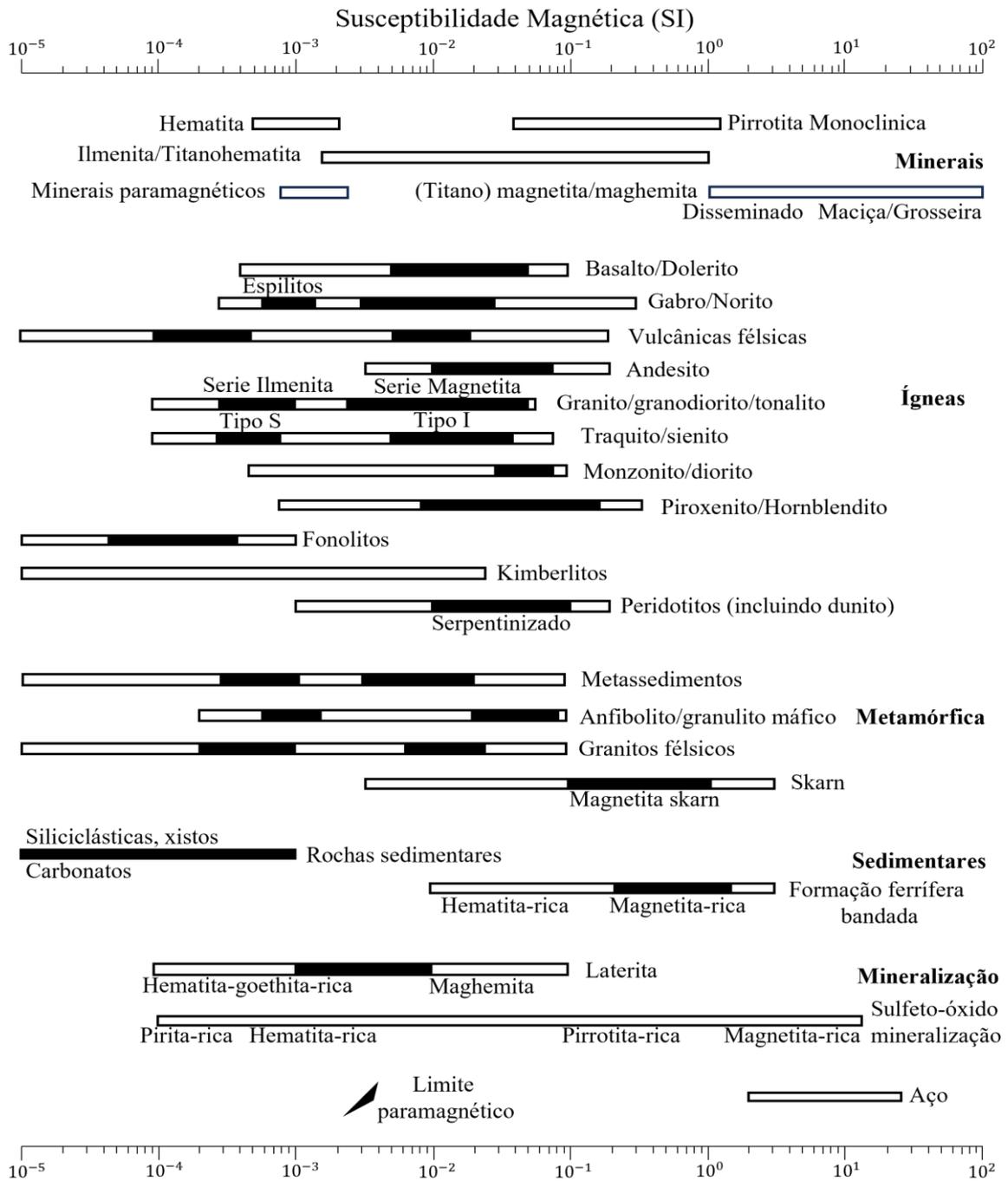


Figura 4.2 – Tabela com as variações de susceptibilidade magnética, para diferentes rochas e minerais (Adaptado de Dentith e Mudge, 2014).

2.3.1.3 Inversão de Dados Magnéticos Tridimensional (Susceptibilidade x Vetor Magnético)

O presente trabalho utiliza comparativamente dois métodos de inversão tridimensional, susceptibilidade magnética e vetor magnético, suas diferenças e/ou evoluções são

resumidamente incorporadas no quadro abaixo (Figura 5.2). O conceito detalhado para o método da inversão será elencado no item 2.3.1.4.

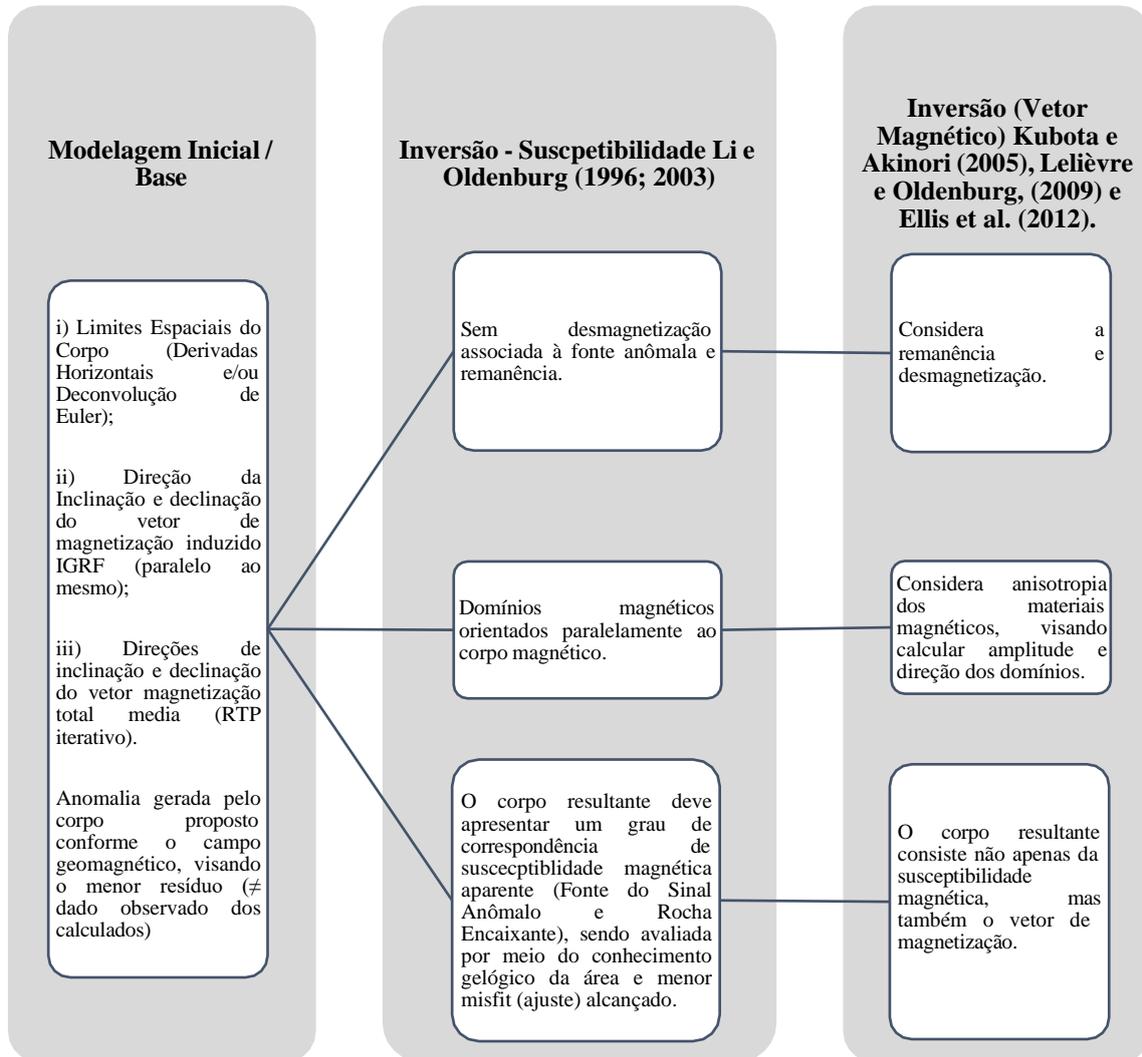


Figura 5.2 – Fluxograma comparativo entre Modelos Iniciais, Inversão Tridimensional (Susceptibilidade) e Inversão Tridimensional (Vetor Magnético).

2.3.1.4 Teoria da Inversão

A inversão de dados magnetométricos terrestres, utilizado neste trabalho, é representada por um algoritmo elaborado por Li e Oldenburg (1996).

De forma resumida, o cálculo matemático associado as estimativas da distribuição da propriedade física (susceptibilidade magnética) são sucedidas pelas diferentes etapas, são elas:

- Exibição genérica dos dados de um levantamento geofísico:

$$F_j[m] = d_j + n_j \quad j = 1, \dots, N \quad (5)$$

F: Operador de modelagem direta que compreende as informações do levantamento;

m: Propriedade física (Susceptibilidade Magnética, neste estudo);

d: Dado adquirido no levantamento;

n: ruído presente nos dados;

N: Número de dados obtidos no levantamento;

j: Posicionamento do dado no conjunto.

- Equação associada ao objetivo da inversão, definido pela recuperação do valor **m**, em função dos dados observados em campo **d**, influenciados pelo ruído inerente ao dado:

$$F_j^{-1}[d] = m_j + n_j \quad (6)$$

- Estimativa do modelo predito (função objetivo do modelo Φ_m), visando minimizar a solução não única e mal posta, segundo Teorema de Gauss, para as diferentes formas de determinar a fonte das anomalias de distribuição de um campo físico conhecido em uma região delimitada.

$$\Phi_m = \alpha_s \int (m - m_{ref})^2 dz + \alpha_x \int \left(\frac{dm}{dx}\right)^2 dx + \alpha_y \int \left(\frac{dm}{dy}\right)^2 dy + \alpha_z \int \left(\frac{dm}{dz}\right)^2 dz \quad (7)$$

O primeiro termo, a esquerda, visa atenuar a diferença entre modelo de referência **m_{ref}** e modelo construído (**m**). Já os demais termos, penalizam a rugosidade nas direções **x**, **y** e **z**. Os coeficientes **α_s**, **α_x**, **α_y** e **α_z** ponderam a importância relativa das direções cartesianas na função objetivo (Bandeira, 2021).

- Equação do ajuste do *Misfit*, demonstra o desajuste entre dado calculado (**F[m]**): e medido (**d^{obs}**), levando em consideração que os erros (**ε_j**) interpretados como gaussianos, como citado anteriormente.

$$\Phi_d = \sum_{j=1}^N \left(\frac{d_j^{obs} - F[m]}{\epsilon_j} \right)^2 = \|W_d (d^{obs} - F[m])\|^2 \quad W_d = \text{diag} \left(\frac{1}{\epsilon} \right) \quad (8)$$

Determinado o misfit, para a construção do modelo ideal utiliza-se um valor de tolerância, regido pelo parâmetro de regularização de Tikhonov. Enfim, se o misfit for igual a esse valor, toma-se que o ajuste entre os termos é aceitável.

Na Fig. 6.2, uma das formas de obter o valor do parâmetro **β**, é com a construção da curva L e/ou curva de Tikhonov (Oldenburg e Li, 2007), representada pela relação entre as

variáveis nos extremos de β . Se β tender ao infinito (região I), têm-se uma situação na qual o *misfit* será muito baixo, ou seja, o modelo recuperado estará subajustado (*underfit*). Em contrapartida, quando β é muito baixo (região II), a função minimizada demonstrará apenas a contribuição do *misfit* e muitas estruturas sem significado geológico serão atribuídas ao modelo final sobreajustado (*overfit*) (Bandeira, 2021).

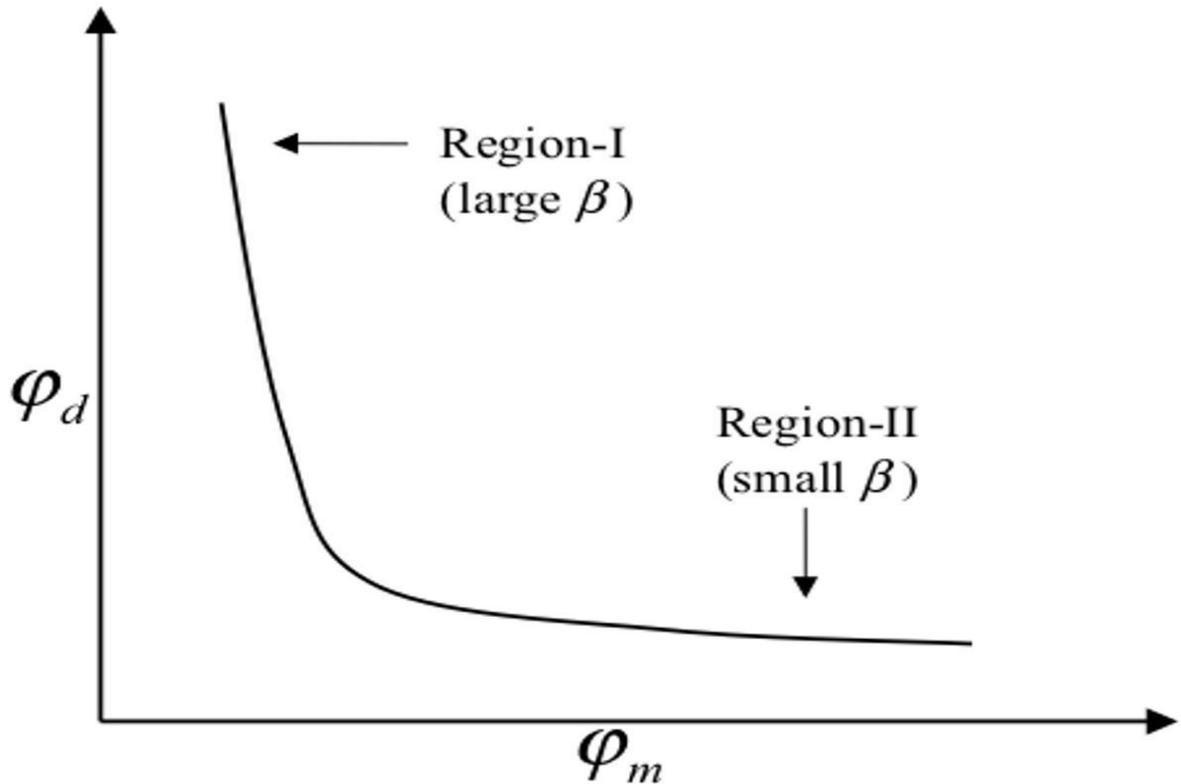


Figura 6.2 – Curva L com os valores de β , retirado de Oldenburg e Li (2007).

Em um primeiro momento, define-se o campo magnético \mathbf{B} num ponto resultante \mathbf{r}_j de um volume (V), representado por células retangulares, com valores constantes de vetor de magnetização $\mathbf{M}(\mathbf{r})$. A formulação descrita a seguir foi desenvolvida nos trabalhos de Kubota e Akinori (2005), Lelièvre e Oldenburg (2009) e Ellis et al. (2012).

$$B(\mathbf{r}_j) = \nabla \int_V \mathbf{M}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3 \quad (9)$$

Um volume representado por um conjunto N de subvolumes V_k , no qual, cada um apresenta um valor magnetização constante \mathbf{M}_k , pode-se definir o problema direto da seguinte forma:

$$B_\lambda(r_j) = \sum_{N,3}^{N,3} m_{k,a} \int_{V_k} \partial_a \partial_\lambda \frac{1}{|r-r_j|} dr^3 \quad (10)$$

Em que $\mathbf{M}_k = (1, 2, \dots, k)$ caracteriza o conjunto de fontes magnéticas, \mathbf{B}_j é a anomalia prevista do campo magnético nos pontos \mathbf{r}_j ($j = 1, \dots, M$). Simplificando a equação (7), obtém-se:

$$\bar{B} = \bar{G}\bar{m} \quad (11)$$

Posteriormente, encontra-se o problema direto com a consideração de um conjunto de subvolumes N , com seus valores constantes de magnetização \mathbf{M}_k , seguido de uma simplificação (matriz de sensibilidade $N \times M$) da equação (direta), onde relacionam-se propriedade física de cada célula com os dados observados, e m , valor a ser recuperado com a inversão. Sendo reescrita da seguinte forma:

$$\min_\phi(m) \Phi(m) = \sum_j^M \left| \frac{G_j m - B_j}{\epsilon_j} \right|^2 + \beta \sum_V^3 |w_V \partial_V m|^2 + |w_0 m|^2 \quad (12)$$

$$\Phi_d = \sum_j^0 \left| \frac{G_j m - B_j}{\epsilon_j} \right|^2 \text{ e } \Phi_m = \sum_V^3 |w_V \partial_V m|^2 + |w_0 m|^2 \quad (13)$$

Procedimentos de inversão mais detalhados e equações são encontrados em Li e Oldenburg (1996, 1998 e 2000).

2.3.1.5 Inversão 3D – Susceptibilidade

A inversão realizada nos dados cedidos pela empresa foi associada ao método da susceptibilidade magnética, com os parâmetros exibidas no programa *Pdyke*, da *GEOSS* (*Geophysical Software Solutions*) (Figura 7.2). O programa calcula a anomalia magnética de um prisma que tem a seção transversal de um paralelogramo (mostrado em vermelho abaixo).

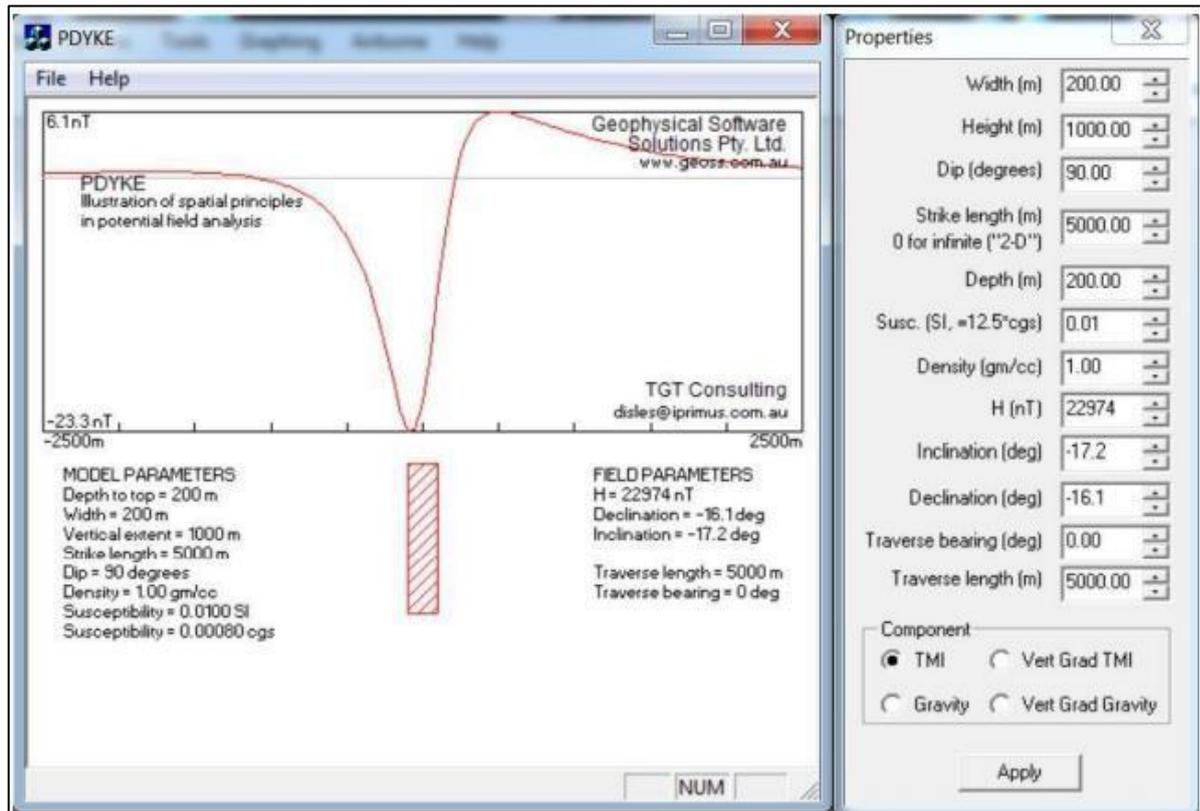


Figura 7.2 – Parâmetros de Inversão (Susceptibilidade Magnética) do levantamento, disponível gratuitamente em <https://www.geoss.com.au/>.

2.3.1.5 Inversão de Dados Magnéticos 3D – Vetor Magnético (MVI)

No presente trabalho utiliza-se o método de inversão tridimensional (MVI), visando compor de modo comparativo ao modelo de susceptibilidade, as influências características desses dipolos dentro da área: indução, remanência, anisotropia, desmagnetização e outras (Telford et al., 1990). O algoritmo utilizado rege-se pela metodologia introduzida por Li e Oldenburg (1996), posteriormente reformulada com a inserção da recuperação do vetor magnético por Kubota e Akinori (2005), Lelièvre e Oldenburg, (2009) e Ellis et al. (2012). Os detalhes do método estão descritos com mais detalhes na seção 2.3.1.4.

Como elencado anteriormente no item 2.3.1.3, de forma distinta do modelo de susceptibilidade, é recuperado, não apenas a susceptibilidade magnética, mas também o vetor

de magnetização. Com esse objetivo, aplicou-se a rotina de inversão do MVI dentro da extensão *VOXI* do programa *Oasis Montaj* versão 9.6 da *Geosoft Inc.* Os parâmetros da inversão realizados no modelo serão demonstrados no capítulo III.

2.3.1.6 Amostragem de susceptibilidade magnética

Minerais magnéticos estão presentes em concentrações notáveis em diversos depósitos minerais, sendo muitos desses depósitos vinculados a rochas com propriedades magnéticas. Em zonas de cisalhamento e alterações hidrotermais em contexto de ouro orogênico, é comum encontrar esse tipo de rochas e minerais, algumas vezes apresentando quantidades excepcionais de magnetita e níveis diamagnéticos (estruturas canalizadoras de fluidos).

Os equipamentos utilizados foram MPP PROBE, Model MPP3wifi, medidor de suscetibilidade magnética e condutividade, da *Instrumentation GDD Inc.*, vinculado ao programa computacional instalado em tablet *Samsung Galaxy A.* A definição das configurações de análise é de extrema importância para as medidas, sendo o fluxo e os parâmetros denotados na figura 8.2.

The screenshot displays the GDD software configuration interface, organized into three main sections: IDENTIFICATION, PARAMETERS, and READING. The interface is divided into two rows of settings.

Top Row:

- IDENTIFICATION (i):** Fields for Project Name, Core ID, and Depth (m) (set to 3).
- PARAMETERS (ii):** Shape dropdown menu (set to Wall), Diameter (mm) field.
- READING (iii):** Mode dropdown menu (set to Punctual), Interval (s) field (set to 0.1), Spacing (m) field (set to 1).

Bottom Row:

- IDENTIFICATION (iv):** Unit dropdown menu (set to Meter).
- PARAMETERS (v):** Shape dropdown menu (set to Cylinder), Diameter (mm) field (set to 43), and a Half checkbox (checked).
- READING (vi):** Mode dropdown menu (set to Continuous), Interval (s) field (set to 0.1), Spacing (m) field (set to 1).

Figura 8.2 – Fluxos de preenchimento de parâmetros de configuração dentro do GDD. Em i) Identificação do nome do projeto e número do furo, quando for análise em furo de sondagem; em ii, iv e v): parâmetros de análise. Respectivamente em ii e v, tipo de superfície (cylinder para furos inteiriços e wall para furos cerrados e/ou superfícies planas, bem como seu respectivo diâmetro; e iv) profundidade inicial e unidade de medida a ser utilizada. Já em iii e vi) parâmetros de leitura.

Quando escolhido modo *punctual* (registro de forma pontual), define-se o espaçamento entre uma leitura e outra, de acordo com intervalo selecionado no espaçamento definido e/ou modo *continuous* (registro de forma contínua), onde insere-se um intervalo de tempo (s) entre uma leitura e outra dentro do espaçamento definido.

O método estabelecido neste estudo para as amostras de furos inteiriços (cilíndricos) foi definido inicialmente como a aquisição de dados essencialmente no metro inteiro, ou seja, considerando profundidades em intervalos completos de 1 metro de amostra coletada em uma determinada seção de perfuração, com o objetivo de contabilizar a totalidade dos furos de sondagem. Em um segundo momento, foram detalhadas as zonas de maiores valores magnéticos e/ou alterações determinadas no momento do registro dos testemunhos de sonda, com 4 medidas (25 em 25 cm) dentro de amostras espaçadas em 1 metro, como demonstrado na figura 9.2. O valor atribuído a cada intervalo medido, foi feito a partir da média aritmética das quatro medidas.

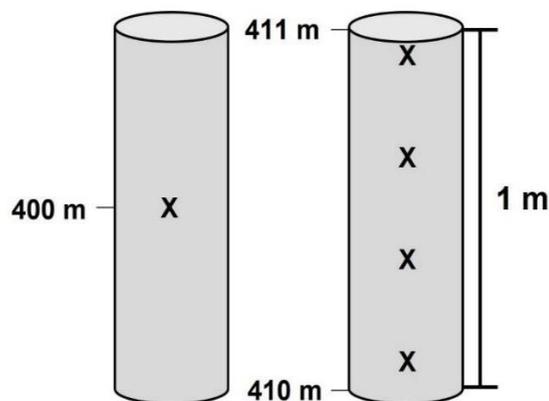


Figura 9.2 – Procedimento de medidas pontuais aplicado para zonas não detalhadas e detalhadas do levantamento petrofísico, dentro do espaçamento de 1m, em furo de sondagem.

2.3.2 Gamaespectrometria

A radioatividade é um fenômeno natural no qual alguns isótopos passam por desintegração espontânea, liberando partículas subatômicas alfa (α), beta (β) e radiação eletromagnética gama (γ) até atingirem um estado estável. a. Esta última, se destaca em relação as outras por duas principais características: maior profundidade de penetração e maior energia liberada durante o decaimento. O método gamaespectrométrico, também chamado de radiométrico, envolve a medição das radiações naturais na forma de raios gama. Este método é considerado passivo, pois realiza a medição de uma fonte de energia elétrica natural (Dentith e Mudge, 2014).

Embora muitos elementos naturais contenham isótopos radioativos, as principais fontes de radiação gama empregadas em geofísica derivam da desintegração do Potássio-40 (^{40}K), Urânio-238 (^{238}U) e Tório-232 (^{232}Th). Isso se deve ao fato de que são os únicos radioisótopos

capazes de gerar raios gama de alta energia com intensidade suficiente para serem utilizados em levantamentos gamaespectrométricos (Figura 10.2).

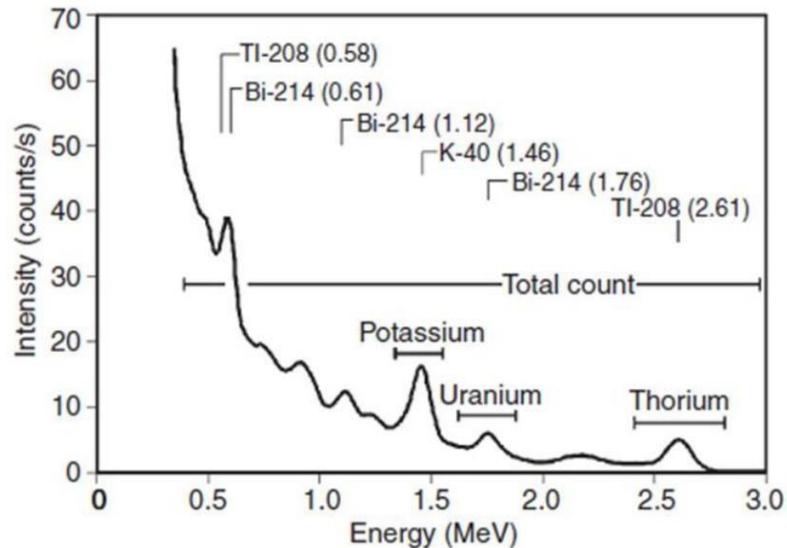


Figura 10.2 – Gráfico da intensidade de contagem em função da energia de radiação (Extraído de Wilford e Minty, 1997).

Noventa por cento dos raios gama são emitidos pela camada superficial de solo ou rocha, situada até 30 cm de profundidade. A intensidade dessa radiação, proveniente da superfície, está relacionada à mineralogia e à composição química das rochas originais, bem como ao tipo de intemperismo que afeta esses minerais (Wilford et al., 1997).

Dickson e Scott (1997) destacam que, embora a gamaespectrometria meça a variação da radiação gama proveniente dos elementos potássio, tório e urânio, essas variações estão diretamente relacionadas às mudanças geoquímicas desses radioelementos nos ambientes geológicos. Os autores afirmam que, devido à considerável variação no teor de radioelementos na fina camada de 30 centímetros, o método é eficaz no mapeamento de litologias. Eles também salientam que pequenas alterações dentro das unidades podem ser atribuídas a modificações litológicas sutis, processos de intemperismo ou eventos mineralizantes.

Estima-se que a abundância média de potássio (K) na crosta terrestre esteja na faixa de 2 a 2,5%, sendo encontrado principalmente em rochas compostas por feldspato e mica. Em contraste, as estimativas para a presença de urânio (U) e tório (Th) na crosta são relativamente baixas, com médias de aproximadamente 2 a 3 partes por milhão (ppm) para o urânio e de 8 a 12 ppm para o tório (Dickson & Scott, 1997).

De forma geral, nota-se uma tendência de aumento nos teores de radioelementos ao passar de rochas básicas para rochas ácidas (Wilford e Minty, 2007). A Figura 11.2 apresenta uma tabela indicando a variação nos teores de radioelementos nos principais materiais geológicos.

Tipo de rocha	Rocha			Solo		
	K	eU	eTh	K	eU	eTh
	dag kg ⁻¹	---- mg kg ⁻¹ ----		dag kg ⁻¹	---- mg kg ⁻¹ ----	
Rochas sedimentares						
Folhelhos do Arqueano	0,4 – 1,6	0,3 – 1,3	1 – 5	0,8	1,2	3,0
Outros folhelhos	0,1 – 4,0	1,6 – 3,8	10 – 55	0,7 – 3,0	1,2 – 5	6 – 19
Arenitos	0,0 – 5,5	0,7 – 5,1	4 – 22	0,1 – 2,4	1,2 – 4,4	7 – 18
Carbonatos	0,0 – 0,5	0,4 – 2,9	0 – 2,9			
Rochas ígneas intrusivas						
Granitóides	0,3-4,5	0,4-7,8	2,3-45	0,4-3,9		
Gnaisse	2,4-3,8	2,1-3,6	18-55	0,7-1,9	1,6-3,8	6-19
Pegmatitos	2,6-5,5	0,3 – 1	0,3 – 9,6			
Aplitos	0,6 – 4	1 – 8	3 – 20			
Quartzo-feldspático	1-5	1,3 – 2,9	6 – 14			
Intrusivas intermediárias	0,7 – 5,6	0,1 – 1,2	0,8 – 6,1	0,7 – 3,4	1,5 – 2,3	2,9 – 8,4
Máficas intrusivas	0,1 – 0,8	0,0 – 1,1	0,0 – 3,1			
Rochas ígneas extrusivas						
Vulcânicas félsicas	2,0 – 4,4	1,4 – 13	13 – 28	1,8 – 3,2	1,3 – 2,4	10 – 18
Vulcânicas intermediárias	1,8 – 4,1	0,9 – 5,6	1,5 – 15	1,0 – 2,7	1,2 – 3,6	4 – 17
Andesitos com baixo K	0,7 – 0,9	1,0 – 2,5	3 – 8	0,8 – 1,5	1,2 – 1,5	4 – 6
Vulcânicas máficas	0,3 – 1,3	0,3 – 1,3	2,0 – 5,0	0,2 – 1,4	0,6 – 2,5	3,3 – 13
Vulcânicas ultramáficas	0,2 – 0,9	0,3 – 0,9	0,0 – 4,0	0,6	2,0	6,0

Figura 11.2 – Tabela com Teores de K, eU e eTh em rochas e solos na Austrália por métodos gamaespectrométricos (Modificada de Dickson & Scott, 1997).

2.3.2.1 Amostragem de gamaespectrometria

O ensaio gamaespectrométrico diferentemente do método do estudo de susceptibilidade magnética, seguiu com 45 medições de 35 amostras de testemunho de rocha e 1 de amostra de rocha, dispostos em trechos de forte alteração hidrotermal, rochas mineralizadas (históricas) e

das encaixantes de 8 furos de sondagem, tanto do alvo ABP, quanto da mina *urderground* de Pau-a-Pique e complexo EPP. Os dados foram obtidos nas mesmas amostras separadas para lâmina petrográficas, como mencionado anteriormente, associado a zonas hidrotermais, encaixantes e mineralizações históricas da mina do contexto, em rocha fresca dos testemunhos de sondagem. O equipamento utilizado foi o gamaespectrômetro portátil RS-230 *BGO Super-SPEC*, fabricado pela *Radiation Solutions*, Canadá. Os gamaespectrômetros são instrumentos que distribuem a radiação gama em várias componentes de energia. O detector, de cristais de germanato de bismuto, cerca 3 vezes mais sensível que os cristais de iodeto de sódio, assimila a radiação gama e a transforma em pulsos luminosos e/ou cintilações. Estas, são convertidas em sinais elétricos (diferença de potencial) proporcionais à intensidade da luz. Em seguida, as medidas em volts são separadas em classes, dependendo da magnitude, de modo a se obter um espectro de energia dos raios gamas incidentes (Hansen, 1975).

O gamaespectrômetro portátil RS-320 versão *BGO Super-SPEC*, exibe integradamente sonda e visor. A sonda tem formato cilíndrico, com um invólucro de alumínio que contém o detector, no caso 0.13 L de cristais de germanato de bismuto e o visor contém os dispositivos para armazenagem e processamento dos sinais medidos. O equipamento registra 1024 canais de informações na faixa de energia de 0,03 a 3,0 MeV, sendo 4 canais correspondendo a contagem total, K, eU e eTh.

A etapa de aquisição foi realizada no Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília, utilizando as amostras de testemunhos de sondagem e de superfície. As amostras foram acondicionadas em moldes de teflon (Figura 12.2-B), de acordo como diâmetro do testemunho, e inseridas em uma caixa de chumbo (Figura 12.2-A) com exposição da amostra para com o aparelho (*e.g.*, perpendicular a caixa) em uma janela, na porção inferior, de mesma proporção do detector do equipamento RS-230, para minimizar os efeitos de variações locais e distribuição de radioelementos. O tempo necessário para uma medida depende da radioatividade da fonte e da precisão requerida da medição (Lovborg & Mose, 1987).

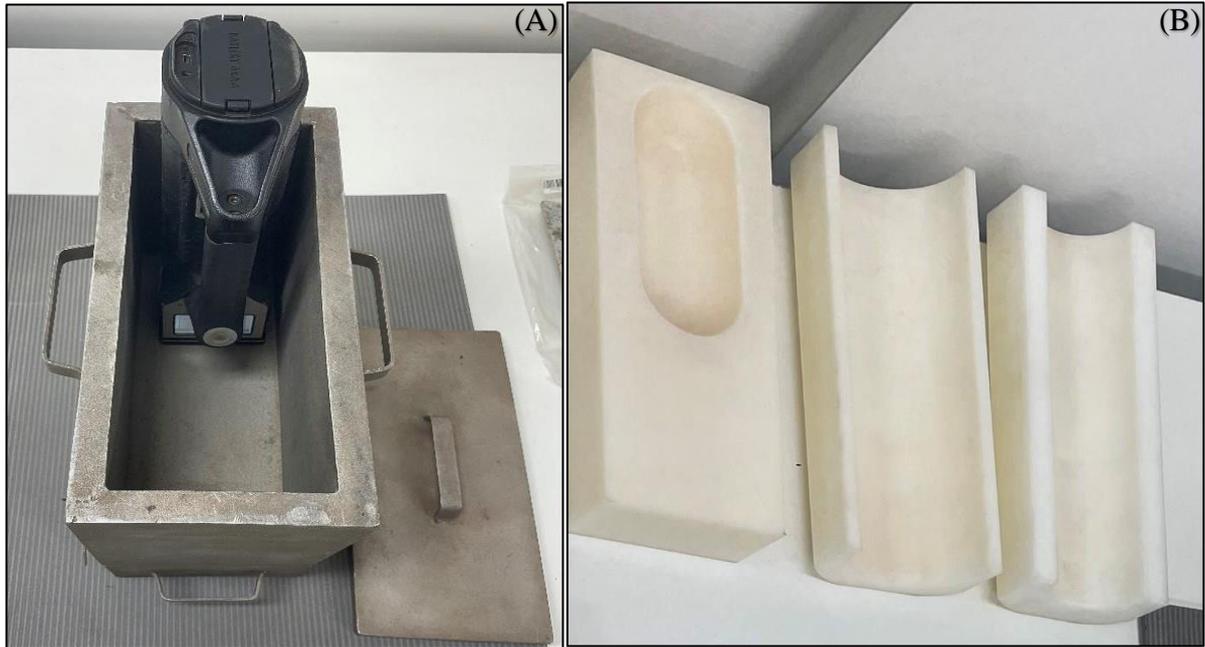


Figura 12.2 – Materiais utilizados na análise gamaespectrométrica em testemunhos de sondagem e/ou amostras de rocha. Em (A) caixa de chumbo com RS320 posicionado perpendicularmente a janela que dá acesso ao testemunho na gaveta inferior da caixa. Já em (B) alguns dos moldes de teflon disponíveis para acomodação do testemunho/amostra.

Assim como Jácomo (2010), decidiu-se por operar com um número de contagens, N , registrado nas janelas de energia para K , eU e eTh e um tempo de contagem, $t=5$ minutos. Estas medidas são convertidas automaticamente para taxa de contagem $n = N/t$ (cpmin) e, conseqüentemente, estimadas as concentrações de K , U e Th nas rochas. A expressão dos dados em contagem por minuto cpm (ou cps, cintilações por segundo) não é recomendável, isto porque as taxas de contagem dependem não só das concentrações dos radioelementos, mas também do tamanho e eficiência do detector, e no caso de deslocamento aéreo, da altitude do voo (Minty, 1997). Porém, como não houve variações na altura entre sensor e alvo desta aquisição, essas medidas são concebidas como confiáveis, conforme a Figura 39.4 – Capítulo IV. Posteriormente ao processo de medição, os dados foram abertos e exportados (.csv) no programa computacional *Geoview*, da empresa *GEORADIS s.r.o.*

2.3.3 Polarização Induzida

Em conjunto com outros métodos aplicados tem-se a polarização induzida (*Induced Polarization – IP*) é um dos métodos mais exitosos em exploração de ouro. Esse método apresenta neste contexto, um viés relacionado a investigação de minerais metálicos

(disseminados) condutores e polarizáveis, comumente associados a ouro orogênico. Alguns exemplos de aplicabilidade deste método na exploração de ouro são dados em Seigel et al. (1984), Johnson et al. (1989), Doyle (1990) e Halloff e Yamashita (1990) e Mitchinson (2009).

O método consiste basicamente na determinação de fenômenos de polarização elétrica e mecanismos eletroquímicos nas rochas e/ou solos (*e.g.*, difusão de íons próximos a minerais metálicos e mobilidade de íons em solução nos poros das rochas) (Sumner, 1976). Estes, se dão por meio da criação de fluxos elétricos artificiais entre dois eletrodos metálicos inseridos no solo e a medição, em superfície, da diferença de potencial (voltagem), por meio de dois eletrodos (potencial) não polarizáveis, registrados no domínio do tempo. As variações de voltagem podem se basear na medida dos domínios do tempo ou da frequência (Telford et al., 1990).

Griffths e King (1965) ressaltam a importância das dimensões da superfície de contato polarizada na influência da resposta do método. Em condições de mineralização do tipo disseminada obtém-se uma maior área de contato (*e.g.*, o somatório das superfícies de minerais disseminados é maior do que as de minerais maciços de mesmo volume, deste modo, eventualmente apresentam maior assinaturas de IP). Entretanto, halos de alteração disseminados, dispostos ao redor de mineralizações maciças podem aumentar sua área de contato. Ademais, a presença de fluidos com altos valores de porosidade e permissividade podem reduzir a assinatura do IP, em função da geração de ambientes de fuga de corrente para o meio, ao contrário de concentração na forma de polarização de eletrodo ou de membrana.

2.3.3.1 Mecanismos de Polarização Induzida (Rochas)

Atualmente são identificados 5 mecanismos causadores de polarização induzida: Eletrodo (*e.g.*, Marshall & Madden, 1959; Ward, 1988; Kearey, 2009), Membrana (Marshall & Madden, 1959; Sumner, 1976; Reynolds, 1997; Olhoeft, 1985; Ward, 1988; Lima & Sharma, 1992; Titov et al., 2002; Revil et al., 2014), Camada de Stern (Lima & Sharma, 1992; Revil & Florsch, 2010; Revil et al., 2014), Camada Difusa (Lima & Sharma, 1992; Revil et al., 2014) e Maxwell-Wagner (Lima & Sharma, 1992; Lesmes & Morgan, 2001; Revil & Florsch, 2010), porém, serão detalhados neste trabalho somente os dois principais aplicados ao viés de estudo, sendo eles o processo de polarização de membrana e de eletrodo.

Polarização de Eletrodo

Na presença de um mineral metálico, uma rede de cargas de sinais opostos é formada em cada face, resultando em um acúmulo de íons no eletrólito adjacente a cada face. A ação é de eletrólise, quando a corrente flui e ocorrem trocas de elétrons entre o metal e os íons da solução. Esse efeito é conhecido como sobrevoltagem. Essa sobrevoltagem é a energia potencial extra requerida para dar início a processos eletroquímicos, particularmente a transferência de elétrons. Também contribui para a sobrevoltagem o gradiente de concentração iônica da solução na interface (Telford et al., 1990).

Como o fluxo de elétrons é muito mais rápido que o fluxo de íons no eletrólito, os íons se acumulam de cada lado do grão e causam um aumento de carga (Figura 13.2). Quando a voltagem impressa é removida, os íons dispersam-se lentamente de volta à condição neutra e causam um decaimento transitório de voltagem (Kearey, 2009).

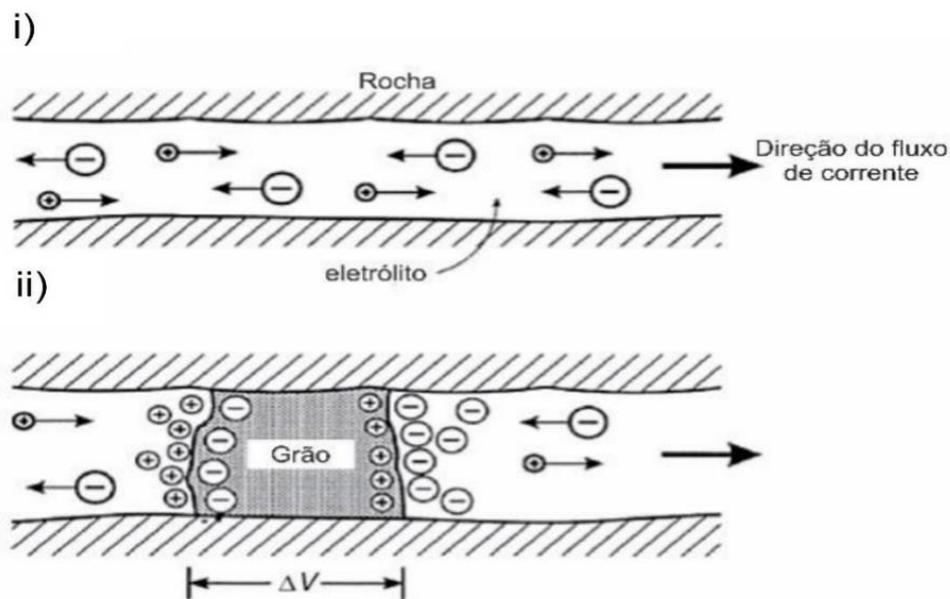


Figura 13.2 – Figura esquemática idealizada associada ao fenômeno de polarização de eletrodo/metálica. Em i) Fluxo eletrolítico livre em um canal aberto; ii) Polarização de um grão eletronicamente condutor, que bloqueia um canal. (Modificado de Fraser et al., 1964; Kearey, 2009).

O fenômeno supracitado depende, entre outros fatores, da fonte de corrente externa e das características do meio, como a porosidade que é um fator limitante, uma vez que oferece caminhos alternativos de condução eletrolítica. Varia também de acordo com a concentração mineral, respondendo mais fortemente às disseminações, do que na presença de mineralização maciça, já que este é um fenômeno de superfície (Kearey, 2009).

Polarização de Membrana

Transcorre em meios fluidos que permitem a mobilidade de íons (Everett, 2013). Além disso, podem existir de duas formas: estreitamento dentro de um poro e a outra é associada à presença de argila no poro, tal como em arenitos impuros (Reynolds, 1997).

A maioria dos minerais presentes nas rochas tem uma carga total negativa em suas superfícies exteriores em contato com o fluido dos poros. Assim, íons positivos acumulam-se nessa interface, enquanto as cargas negativas são repelidas dela. Caso o acúmulo de íons positivos supere o estreitamento do poro nessa região, a mobilidade dos íons será dificultada quando uma voltagem for aplicada. Assim, ocorrerá um acúmulo de íons negativos e positivos de cada lado do bloqueio produzindo uma diferença de potencial (Figura 14.2-i). Por fim, quando a voltagem aplicada é desligada, a concentração iônica volta ao normal gerando, conseqüentemente, uma voltagem residual durante um período finito (Mocitaba, 2014).

No segundo caso, à presença de partículas de argila nas rochas, assim como a maioria dos minerais, tende a ter carga negativa em sua superfície que, por sua vez, atrai os íons positivos, gerando nuvens carregadas positivamente dentro do espaço poroso. Quando uma voltagem é aplicada as cargas negativas são bloqueadas pelas nuvens de cargas positivas produzindo, assim, uma diferença de concentração (Figura 14.2-ii). Quando a voltagem é desligada, os íons voltam para as suas posições originais gerando, também, uma voltagem residual (Reynolds, 1997).

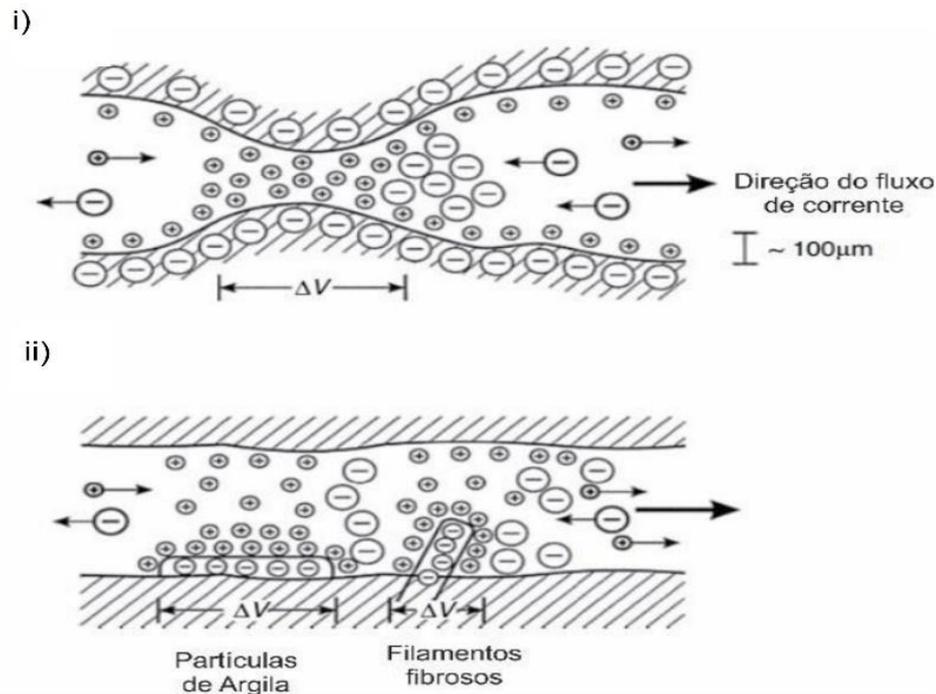


Figura 14.2 – Figura esquemática idealizada referente ao efeito da polarização de membrana. Em i) uma constrição dentro de um canal entre grãos minerais; e (ii) partículas de argila negativamente carregadas (Fraser et al., 1964) e elementos fibrosos ao longo dos lados de um canal.

2.3.3.2 Medidas de Polarização Induzida (Domínios do Tempo e da Frequência)

Os registros das medições podem ser feitos em dois domínios: domínio do tempo (*e.g.*, análogo à descarga de um capacitor) e domínio da frequência (*e.g.*, equivalente à oscilação de impedância de uma corrente alternada; Sumner, 1976). Neste trabalho, o modo utilizado foi o domínio do tempo.

Domínio do Tempo

Quando uma corrente elétrica é aplicada no solo, após o seu desligamento, a voltagem não decai instantaneamente para zero. De fato, a tensão tem uma queda mais acentuada nos instantes iniciais após o desligamento da corrente, e depois, cai de forma gradual. O valor da tensão logo após a esta queda brusca, é simbolizado por V_P . Esse efeito também ocorre nos instantes iniciais logo depois de ligada a corrente, ou seja, a voltagem sobe gradualmente até se estabilizar em seu valor máximo V_{ON} (Figura 15.2). Essas situações ocorrem devido ao efeito de polarização induzida nas rochas. A medição do efeito de polarização induzida no domínio do tempo consiste em analisar o decaimento temporal da voltagem que é gerado após o

desligamento dos pulsos de corrente injetados no solo. Uma maneira simples de medir o efeito de polarização é determinar a razão entre a voltagem primária V_{ON} e a voltagem observada V_P no instante após o desligamento da corrente elétrica. Esse parâmetro é denominado de Polarizabilidade Aparente P_a (Equação 14) (Reynolds, 1997).

$$P_a(\%) = \frac{V_p}{V_{ON}} 100 \quad (14)$$

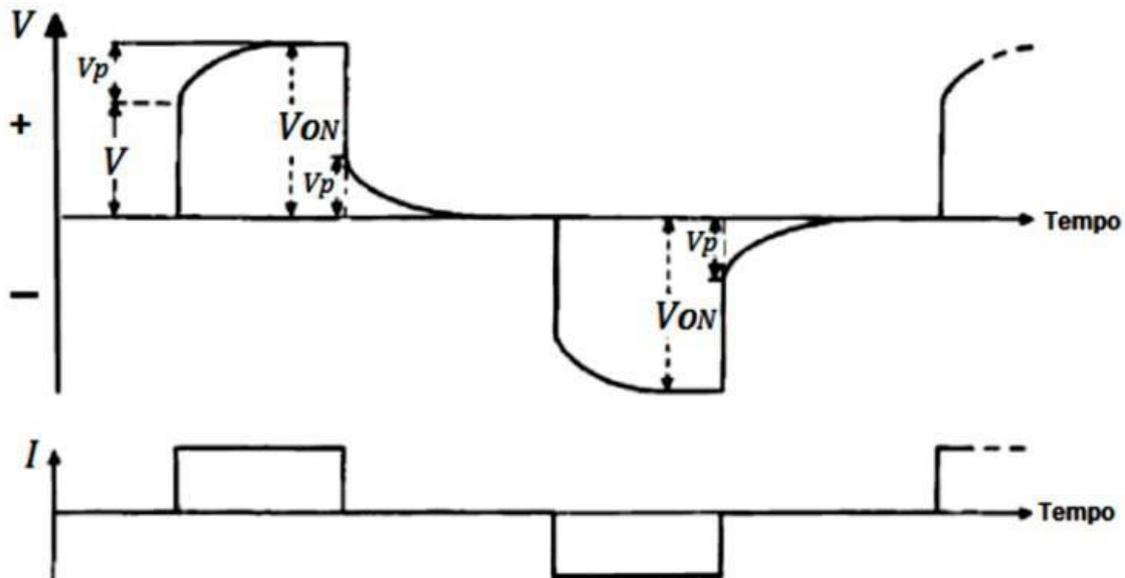


Figura 15.2 – Produto da polarização induzida com aplicação de um pulso de corrente com polaridade (Reynolds,1997).

Segundo Reynolds (1997), é extremamente difícil medir a tensão V_P no exato momento em que a corrente é desligada. Assim, a medida do decaimento da tensão é feita após um pequeno intervalo de tempo ($Mdly$).

Cargabilidade global M_g (Figura 16.2) e as cargabilidades parciais M_i são outros parâmetros de medição. A cargabilidade parcial M_i é a área sob a curva de decaimento durante um discreto intervalo de tempo TM_i normalizado pelo V_{ON} e TM_i (Equação 15) e o valor da cargabilidade global (M_g) com a equação 16.

$$M_i = \frac{1}{TM_i \cdot V_{ON}} \int_{TM_i} V dt \quad (15)$$

$$M_g = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i \cdot TM_i) TM_i}{\sum_{i=1}^n TM_i} \quad (16)$$

No qual i é a posição com relação às n de janelas de tempo.

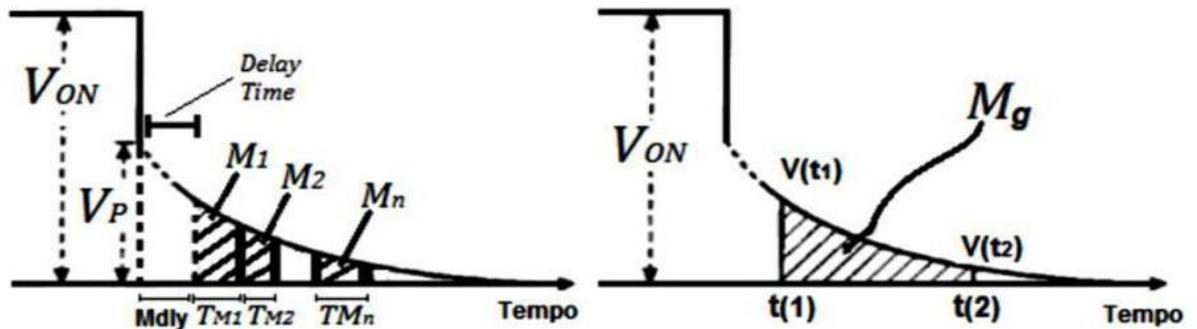


Figura 16.2 – Tensões de decaimento para as áreas de medida de cargabilidade parcial (M_i) em i) e, em ii) cargabilidade global (M_g) (Reynolds, 1997).

Em termos de resposta associada as mineralizações (*e.g.*, tipos e intensidade), não se pode generalizar os valores da polarização induzida, entretanto, Telford et al. (1990) apresenta valores médios de cargabilidade para alguns materiais geológicos (Tabela 1.2). Notoriamente, em função da sobreposição (*e.g.*, intervalo de valores), não é possível delimitar, apenas numericamente, entre rochas mineralizadas e/ou estéreis, como possíveis argilas (Telford et al., 1990).

Tabela 1.2 – Valores indicativos de cargabilidade para alguns materiais geológicos (modificada de TELFORD et al., 1990; Alagia, 2018).

	Materiais	Cargabilidade (ms)
Minerais	Pirita	13,4
	Calcocita	13,2
	Cobre	12,3
	Grafite	11,2
	Calcopirita	9,4
	Bornita	6,3
	Galena	3,7
	Magnetita	2,2
	Malaquita	0,2
	Hematita	0
Sulfetos (%)	20 % Sulfetos	2000-3000
	8 a 20% Sulfetos	1000-2000
	2 a 8% Sulfetos	500-1000

rochas ígneas	Tufos Vulcânicos	300-800
	Vulcânicas Básicas	100-500
	Granito e granodiorito	10-50
	Vulcânicas Ácidas	8-20
Rochas Sedimentares	Calcários e dolomitos	10-20
	Arenitos	3-12
	Argilitos	3-10
Rochas Metamórficas	Gnaisses pré-cambrianos	6-30
	Xistos	5-20
	Quartzitos	5-12
Sedimentos	Cascalhos	3-9
	Aluviões	1-4

2.3.3.3 Método de Obtenção e Arranjos

A aquisição de polarização e resistividade foi realizada por meio da técnica de caminhamento elétrico, que consiste na medição ao longo de uma linha (dados 2D) com vários eletrodos, permitindo obter a variação das resistividades e cargabilidade em relação à distância e profundidade. Diferentemente da aquisição 1D (*i.e.*, Sondagem Vertical Elétrica), que utiliza quatro eletrodos para obter a variação de resistividade em função da profundidade em um único ponto, os dados elétricos são adquiridos por meio de eletrodos dispostos ao longo da linha. Cada leitura consiste em um par de eletrodos de corrente e um par de eletrodos de potencial. A geometria de distribuição desses eletrodos define o arranjo eletródico para as leituras de resistividade. Cada arranjo possui vantagens e desvantagens, adequando-se aos objetivos de investigação de cada área de estudo. As configurações eletródicas utilizadas neste trabalho foram o polo-dipolo (PD) e o dipolo-dipolo (DD) (Figura 17.2), devido à sua maior sensibilidade lateral, o que os torna eficazes na identificação de estruturas verticais, como falhas, fraturas e cisalhamentos (Loke, 2004).

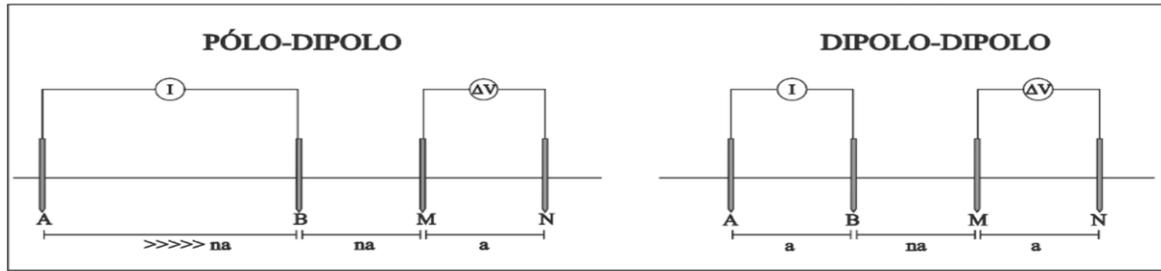


Figura 17.2 – Ilustração esquemática do funcionamento dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo (Mendes, 2023).

Para o arranjo PD, os eletrodos de corrente A e B, estão separados a uma distância maior que o último nível investigado, multiplicado pelo espaçamento entre os eletrodos M e N. Dessa forma, considera-se a distância entre os eletrodos de corrente como uma distância “infinita” e o eletrodo A fica fixo ao longo de todo o levantamento. Os eletrodos M e N medem a diferença de potencial elétrico ao longo da linha e a profundidade de investigação aumenta assim que se distancia mais do eletrodo de corrente B. Os quatro eletrodos no arranjo DD estão dispostos segundo o esquema da Figura 17.2, em que o primeiro par de eletrodos (A e B), sinalizados por I, injeta a corrente. O segundo par de eletrodos sinalizados por ΔV mede a diferença de potencial elétrico entre os dois pontos M e N. À medida que se avançam as leituras, os eletrodos M e N se separam a uma distância cujo valor dividido por “n” definirá o nível de investigação (profundidade).

2.3.3.4 Aquisição e inversão de dado elétrico (Polarização Induzida)

A aquisição dos dados geoeletricos ocorreu em uma das áreas de pesquisa que fazem parte da Aura Minerals Inc, unidade Apoena (Aura Apoena). A pesquisa ocorreu no alvo Anomalia ABP, à norte da mina subterrânea de Pau-a-Pique. No alvo, foram executadas 6 linhas com comprimento ~ 1.5 km, dispostas perpendicularmente (SW-NE) ao strike da mineralização do contexto.

Previamente a etapa de aquisição de dados, foram providenciadas a abertura de picadas, com marcação das estacas no terreno a cada 25 metros, e autorização de acesso às áreas com os superficiários. As etapas de campo ocorreram durante o período de 12/10/2021 a 04/11/2022.

Na aquisição de dados utilizaram-se os seguintes equipamentos: receptor *ELREC-PRO* (*Iris Instruments*) de 10 canais, e o transmissor *VIP 4000* (*Iris Instruments Resistivity & IP 4*

KW) alimentado por um gerador elétrico Branco, Modelo *B4T 8000 E*, monofásico, potência máxima de 6.5 KVA, tensão de 110/220V. Os parâmetros de coleta de dados foram um ciclo de injeção e registro de corrente (*e.g., time*) de 4000ms (*e.g., 2s on e 2 s off*) e janelas temporais (amostragem) da curva de potencial Cole-Cole. O transmissor conseguiu injetar uma corrente elétrica entre 1 a 2.5A, em função das altas resistências de contato elétrico entre o eletrodo de corrente e o solo. Posteriormente a aquisição, foram levantados os dados topográficos de precisão da área, considerando os piquetes supracitados e utilizando o equipamento GPS Geodésico *TOPCON*. De forma comparativa, em um primeiro momento da obtenção dos dados utilizou-se dois arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, com 10 níveis de profundidade de investigação, dipolos (*e.g., MN e AB*) de 25 e 50 metros, na linha teste (Linha 6). Esta linha, priorizada conforme as melhores amostras geoquímicas (*e.g., amostra de rocha*) e furos de sondagem. As informações de forma mais detalhadas, encontram-se no artigo do Capítulo III.

2.3.3.5 Análise e Modelagem dos Dados

Ao longo da atividade de campo, foram efetuados controles de qualidade dos dados, no que se refere a representatividade dos dados de resistividade elétrica e de cargabilidade nas seções levantadas. Os parâmetros ponderados foram resistência de contato elétrico (*e.g. eletrodo x meio*), voltagem, valores de correntes e potenciais elétricos apontados.

A filtragem dos dados ocorreu após a etapa de campo, no programa computacional *Prosys II (Iris Instruments Inc.)* e, baseadas nos seguintes fundamentos: extração dos registros de resistividade e cargabilidade fora da distribuição “log normal” e das cargabilidade com curvas discordantes de funções exponenciais decrescentes.

A modelagem dos dados geoeletricos ocorreu no programa de computador *Res2dinv (GEOTOMO SOFTWARE)*. Este programa determinou automaticamente um modelo bidimensional da subsuperfície do meio, com os dados de campo (Griffiths & Barker, 1993). Na modelagem inversa as rotinas e programas utilizados são exemplificados no capítulo III.

2.4 Petrofísica

A aplicabilidade petrofísica mais habitual em contexto de exploração mineral, refere-se à identificação de contrastes de propriedades físicas associadas à geologia local como um meio

para compreender fontes prováveis de variações observadas em produtos de interpretação geofísica. Desse modo, busca-se relacionar as propriedades físicas com a determinação do que está sendo ‘mapeado’ durante uma análise qualitativa de imagens geofísicas e/ou para quantificar contrastes de propriedades físicas antes da modelagem observada (Dentith et al., 2020). Assim como o vínculo mencionado, as medidas petrofísicas supracitadas nos itens 2.3.1.7 e 2.3.2.1 (e.g., amostragem de susceptibilidade magnética e amostragem gamaespectrométrica), além da densidade, apresentam informações importantes no conhecimento de detalhe dos *footprints* associados as propriedades físicas das rochas do alvo ABP.

Posto isso, é possível associar os resultados obtidos com a descrição macro e microscópica, análise geoquímica, inversão 3D (Susceptibilidade/MVI) e amostragem gamaespectrométrica de rochas e/ou minerais. Neste âmbito, foram adquiridas amostras de três furos de sondagem, ABP0004 (622.26m); ABP0009 (552.06m) e ABP0011, os quais abordam a maioria das unidades do alvo. Os dados adquiridos de susceptibilidade foram levantados na unidade de Ernesto (Aura Apoena), complexo EPP, Pontes e Lacerda – MT e, dos radio elementos, no Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB).

Amostragem de Densidade (aparente)

A determinação do parâmetro densidade (aparente) em campanhas de sondagem, historicamente associada a estimativas de tonelagem de recursos minerais (Rossi e Deutsch, 2014), também exhibe características petrofísicas importantes quando se trata de correlações indiretas em depósitos minerais (e.g., mineralização, rochas encaixantes e/ou hospedeiras).

Para a definição de densidade de cada unidade litológica, utilizou-se o método de amostragem baseado no princípio de Arquimedes (e.g., deslocamento de água), no qual faz parte da rotina de descrição da equipe de exploração da Aura Apoena. As amostras são escolhidas preferencialmente, a cada 20m ou, quando necessário, por intervalo litológico. Os intervalos selecionados obrigatoriamente apresentam de 10 a 20cm de comprimento, que são retirados para a determinação da densidade. A amostra é pesada ao ar (m_{ar}), utilizando balança industrial digital, *Advanced (MC) – Balmak* e depois imersa em uma proveta de plástico graduada, Nalgon (1000 ml), com volume de água conhecido ($v_{inicial} = 500ml$) e medido o novo volume na água (v_{final}), vide equação 17.

$$\rho = \frac{m_{ar}}{v_{final} - v_{inicial}} \quad (17)$$

2.5 Amostragem e Petrografia Microscópica

Baseado na descrição geológica de três furos de sondagem selecionados e uma amostra de rocha de superfície, foram coletadas 21 amostras (Tabela 2.2) representativas das rochas hospedeiras para confecção de sessões delgadas-polidas (petrografia).

Tabela 2.2 – Relação de amostras de sondagem e superfície, utilizadas para as análises.

Lâminas Petrográficas		
Furo	Amostra	Litologia
ABP0004	ABP0004-44.70	Granito sulfetado
	ABP0004-61.91	Granito albitizado
	ABP0004-86.95	Granito albitizado
	ABP0004-108.73	Granito
	ABP0004-110.31	Veio sulfetado
	ABP0004-257.72	Xisto
	ABP0004-261.01	Xisto sulfetado
	ABP0004-285.74	Xisto sulfetado
	ABP0004-491.24	Clorita xisto
ABP0011	ABP0011-396.9	Xisto sulfetado
ABP0009	ABP0009-101.18	Xisto sulfetado
	ABP0009-182.5	Granito
	ABP0009-184.89	Granito sulfetado
	ABP0009-189.37	Xisto sulfetado
	ABP0009-238.69	Granito sulfetado
	ABP0009-293.58	Dique básico
	ABP0009-425.38	Xisto sulfetado
	ABP0009-447.67	Granito cisalhado
	ABP0009-460.47	Xisto sulfetado
ABP0009-473.4	Granito sulfetado	
Campo ABP	RE-RS-1374	Anfibolito magnético

O estudo petrográfico de luz polarizada (*e.g.* transmitida e refletida) foi realizado no Laboratório de Microscopia, Setor de Petrografia de Rochas e Minerais, do Departamento de Geologia, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP (IGCE - Rio Claro, SP). Todas as 21 amostras coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Laminação M3GL, da GEV-LÂMINAS DELGADAS E SERVIÇOS LTDA (Mariana – MG). Assim, foram

analisadas as 21 seções delgadas-polidas selecionadas, representativas das rochas encaixantes, hospedeiras, zonas de alteração hidrotermal e dos veios mineralizados, de forma a caracterizar: a) rochas encaixantes e hospedeiras (composição, textura e estrutura); b) alteração hidrotermal (paragênese, tipologia e estilos) e c) minério (paragênese e estilos).

As análises contaram com o auxílio de microscópio petrográfico ZEISS (modelo AXIOSKOP 40), acoplado a um dispositivo de obtenção de imagens Canon (modelo EOS 5D Mark II), além do microscópio petrográfico Olympus – BX40. No ANEXO, é possível visualizar as descrições petrográficas detalhadas, bem como, fotomicrografias referentes a cada lâmina.

2.6 Dados Geoquímicos

Para a análise das correlações entre mineralização de ouro, elementos maiores, traços e terras raras (ETR's), foram analisados dois furos de sondagem distintos (ABP0004 e ABP0009), com profundidades respectivas de 622,26 e 552,06m, sendo todo o furo amostrado em ½ do testemunho com espaçamento de 1m, porém, com adição de algumas metodologias de análise diferentes em alguns trechos, coincidentes com as lâminas petrográficas e zonas de detalhamento petrofísico.

Os 4 pacotes metodológicos diferentes são melhor indicados no fluxograma de preparo e análise (figura 18.2). Estes, são aplicadas no laboratório de análise da empresa SGS Geosol Laboratórios LTDA, Goiânia – GO.

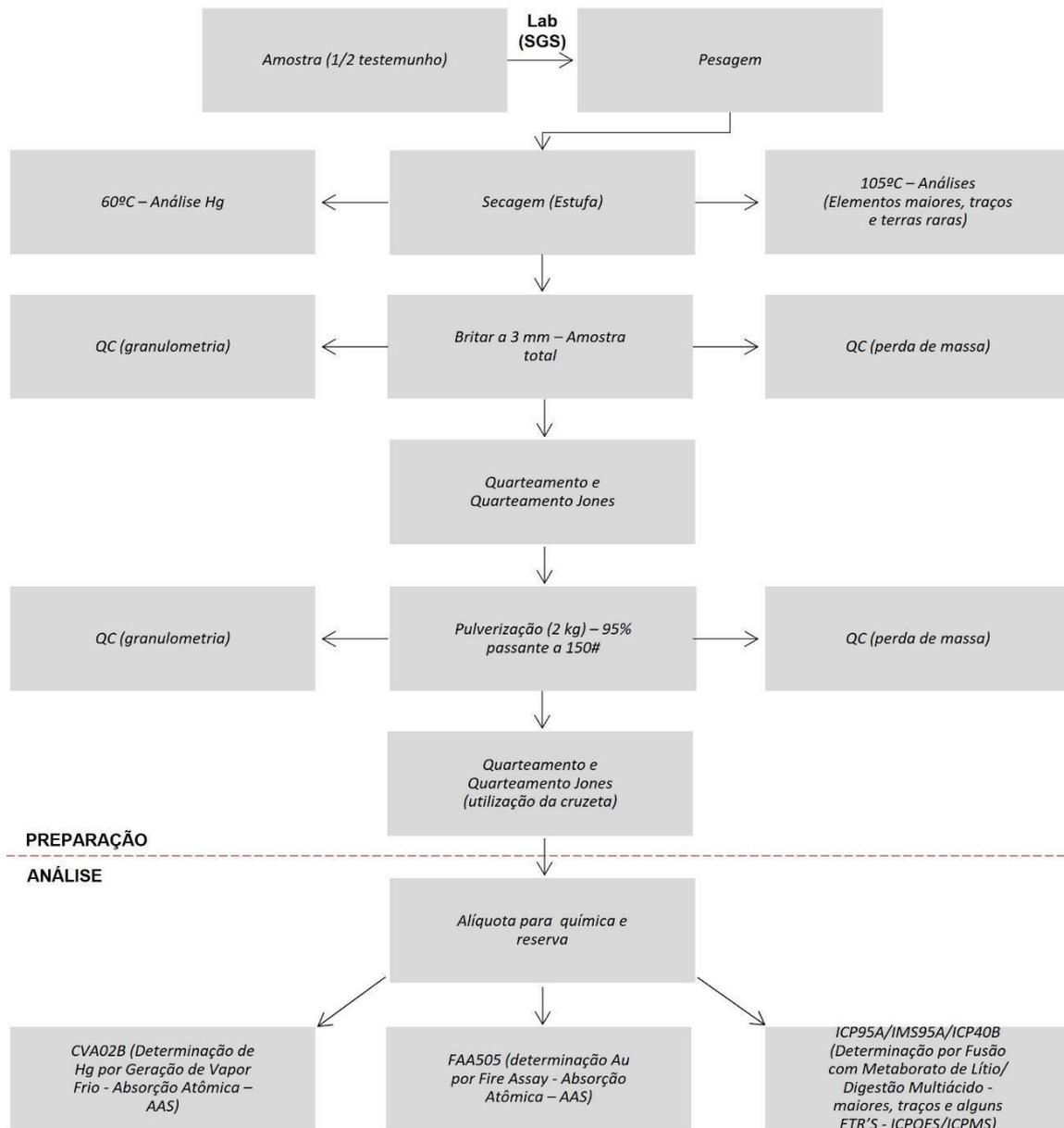


Figura 18.2 – Fluxograma para rota de preparo e análises químicas.

As concentrações de elementos maiores, menores, traços e terras raras serão abordadas IV. Informações detalhadas estão disponíveis integralmente no seguinte link: https://www.dropbox.com/scl/fi/cvrgif2vrk0iv8shrtuwu/Analises_Quimicas_ABP.pdf?rlkey=cgpu1484rk2fjhq8vj75c5aop&dl=0

CAPÍTULO III

Artigo “Aplicação de Métodos Geofísicos na Identificação de Estruturas Mineralizadas e Classificação de Áreas para Sondagem. Exemplificado pela Província Aurífera Orogênica de Alto Guaporé.” Publicado na revista Minerals (MDPI) em 2024.

Resumo:

Trabalhos de exploração mineral realizados na Província Aurífera do Alto Guaporé (AGGP), situada na região sudoeste do Cráton Amazônico no Brasil, enfrentam desafios comuns a muitas províncias de ouro ao redor do mundo, como a diminuição das descobertas de novos depósitos econômicos e o aumento dos custos de exploração. Métodos geofísicos de superfície, combinados com análises estruturais e mapeamento geológico, são ferramentas valiosas que têm o potencial de melhorar a precisão na seleção de alvos de exploração e na determinação de locais de perfuração. Os depósitos da AGGP estão principalmente associados a falhas inversas regionais com direção N20°–W50° e contatos geológicos cisalhados entre rochas metassedimentares siliciclásticas Meso-Neoproterozoicas e o embasamento Mesoproterozoico (granito e sequências vulcanossedimentares). A mineração atualmente em atividade na porção central da província impulsiona os trabalhos de exploração em direção aos muitos alvos existentes na área. Dentre eles, o alvo ABP é um dos mais promissores por estar localizado a poucos quilômetros ao norte da mina Pau-a-Pique. No alvo ABP, o ouro está associado a alterações hidrotermais localizadas nos contatos cisalhados e na zona de dobramento da sequência metassedimentar. As fases hidrotermais incluem óxidos de ferro, sulfetos (pirita), muscovita e veios de quartzo. Neste estudo, utilizamos levantamentos magnéticos e geoeletricos (polarização induzida) combinados com mapeamento estrutural e geológico para identificar possíveis assinaturas no alvo ABP. Os resultados dos perfis de polarização induzida (IP) mapearam com sucesso a forma e a orientação das principais estruturas até aproximadamente 350 m no alvo ABP, indicando locais potenciais para alteração hidrotermal que hospeda ouro. Além disso, inversões de dados magnéticos em 3D ilustraram a distribuição de susceptibilidades magnéticas e vetores de magnetização associados a estruturas de zonas de cisalhamento e corpos magnéticos isolados. Os dados magnéticos destacaram zonas de falha ao longo dos contatos entre rochas metamórficas e granitos, enquanto os dados de IP identificaram áreas com alta cargabilidade, correlacionando com zonas de sulfetação mineralizadas com ouro. Essas descobertas sugerem um modelo metalogenético onde os depósitos de ouro são transportados por estruturas profundas conectadas a falhas regionais, implicando um controle tectônico e estrutural significativo sobre a deposição de ouro. Os resultados ressaltam o potencial da geofísica multiparamétrica na identificação e caracterização de depósitos tanto em profundidade quanto ao longo da direção estrutural, avançando assim nossa compreensão das ocorrências minerais na região e aprimorando a busca por novas zonas mineralizadas.

Palavras-chave: Província Aurífera do Alto Guaporé (AGGP); exploração de ouro; magnetometria; polarização induzida (IP); zonas de falha; modelo prospectivo geológico-geofísico.

Artigo publicado na revista Minerals 2024, 14(8), 788; <https://doi.org/10.3390/min14080788>.

Abstract

Mineral exploration works conducted in the Alto Guaporé Gold Province (AGGP), situated in the southwest region of the Amazon Craton in Brazil, faces the challenges of many gold provinces around the world, *i.e.*, declines in the discoveries of new economic deposits and increases in exploration costs. Ground geophysical methods, combined with structural analyses and geological mapping, are valuable tools that have potential to improve accuracy in selecting exploration targets and in determining drilling locations. AGGP deposits are primarily associated with regional N20°–W50° inverse faulting and sheared geologic contacts between Meso-Neoproterozoic siliciclastic metasedimentary rocks and Mesoproterozoic basement (granite and volcano–sedimentary sequences). Mining currently occurring in the central portion of the province drives exploration works towards the many existing targets at the area. Among them, the ABP target is one of the most promising for being located few kilometers north of the Pau-a-Pique mine. At the ABP target, gold is associated with hydrothermal alteration located in the sheared contacts and in the hinge zone of folded metasedimentary sequence. Hydrothermal phases include Fe-oxides, sulfide (py), muscovite and quartz veins. In this study, we use magnetic and geoelectric (induced polarization) surveys coupled with structural and geological mapping to identify potential footprints within the ABP target. The results from induced polarization (IP) profiles successfully mapped the shape and orientation of the main structures down to approximately 350 m at the ABP target, indicating potential locations for hydrothermal alteration hosting gold. Additionally, 3D magnetic data inversions illustrated the distribution of magnetic susceptibilities and magnetization vectors associated with shear zone structures and isolated magnetic bodies. Magnetic data highlighted fault zones along the contacts between metamorphic rocks and granites, while IP data identified areas with high chargeability, correlating with sulfidation zones mineralized with gold. These findings suggest a metallogenic model where gold deposits are transported through deep structures connected to regional faults, implying significant tectonic and structural control over gold deposition. The results underscore the potential of multiparameter geophysics in identifying and characterizing deposits in both deep and strike, thereby advancing our understanding of mineral occurrences in the region and enhancing the search for new mineralized zones.

Keywords: Alto Guaporé Gold Province (AGGP); gold exploration; magnetometry; induced polarization (IP); fault zones; geological-geophysical prospecting model.

1. Introdução

Ao mesmo tempo em que se percebe um declínio generalizado nas taxas de descoberta de novos depósitos de minerais metálicos, os custos aumentaram de forma acentuada nos últimos anos, o que tem pressionado as equipes de exploração mineral a melhorarem seus índices de assertividade com uma seleção mais criteriosa de alvos (Groves, D.I.; Santosh, M., 2015) e redução nos gastos com sondagens geológicas.

Times de exploração *greenfield*, ao entrar em uma província imatura, normalmente lidam com uma quantidade limitada de informação e a seleção de áreas deve estar baseada no

emprego de modelos robustos, baseado no conceito de sistema mineral, aplicados em escala de província e que leva em conta parâmetros de fertilidade, arquitetura, geodinâmica e preservação (Groves, D.I.; Santosh, M.; Zhang, L., 2020). Um parâmetro importante nessa análise é a questão da escala. Depósitos de ouro de diferentes tipos (*e.g.*, ouro orogênico, Carlin-Type, IOCG, IRGD) quando analisados individualmente, são diferentes entre si, porém em escala litosférica, podem ter sido formados em um mesmo contexto geodinâmico de maneira que a análise e ranqueamento individual de alvos, deve ser acompanhada da análise do contexto tectônico onde esses alvos estão inseridos (Groves, D.I.; Santosh, M., 2015).

Em províncias mais maduras o desafio das equipes de exploração brownfield é integrar e interpretar grandes volumes de dados e gerar novos alvos a partir de dados existentes de maneira a otimizar os trabalhos e reduzir os custos de exploração. Roshanravan, B.; et al. (2023) propõe uma metodologia que envolve os seguintes passos: (a) a integração dos dados disponíveis; (b) identificação de expressões e ingredientes chave de processos de formação de minério mapeáveis, usando modelamento de dados espaciais (em particular a inversão e modelamento juntamente com filtragem avançada de dados geofísicos); (c) desenvolvimento de um modelo conceitual baseado no conceito de sistema mineral; (d) tradução do modelo conceitual para uma ferramenta efetiva na geração de alvos.

Na porção oeste do estado do Mato Grosso, próximo à fronteira entre o Brasil e a Bolívia, há uma série de depósitos de Au ± metais base que incluem: (1) os depósitos de ouro da Província Aurífera Alto Guaporé no Mato Grosso (Costa Neto, M.C., 1998; Fernandes, C.J.; et. al, 2006a; Fernandes, C.J.; et. al, 2006b; Fernandes, C.J.; et. al., 2006c; Fernandes, C.J.; et. al., 2006d; Melo, R.P.; et. al., 2022; Scabora, J.A.; Duarte, C.L., 1998); (2) os depósitos de ouro da Província Aurífera San Ramon na Bolívia; (3) depósito polimetálico de Cu-Au-Ag Don Mario, Bolívia (Don Mario Reserves, 2020) e; (4) Depósito polimetálico de Cu-Au Cabaçal (Pinho, F.E.C., 1996; Pinho, F.E.C.; Fyfe, W.S., 1999) considerado como um VMS por alguns autores (Fig. 1). Apesar de serem depósitos de pequeno a médio a porte, o contexto geotectônico no qual ocorrem (*i.e.*, próximo a margem neoproterozóica do Cráton Amazônico) torna a região uma fronteira exploratória importante na América do Sul, uma vez que a região mescla amplas áreas com pouco ou nenhum trabalho de exploração com províncias relativamente maduras. Os depósitos da Província Aurífera Alto Guaporé (AGGP) são os mais estudados dentre os citados acima. A província compreende um conjunto de depósitos de ouro hospedados ao longo de uma faixa de dobramentos de mais de 500Km de extensão denominada Cinturão Aguapeí

((Litherland, M.; et. al., 1989; Litherland, M.; et. al, 1981; Ruiz, A.S.; et. al., 2007; Teixeira, W.; et. al, 2010)). Os recursos totais são estimados em > 1.8 Moz, considerando apenas a produção, recursos e as reservas provenientes das atividades de exploração e lavra ocorridas nos últimos 40 anos (Melo, R.P., 2022), entretanto estes depósitos são explorados desde o período colonial (Melo, R.P., 2016).

Esses depósitos, formados no início do Neoproterozoico (~920Ma), são interpretados como depósitos de ouro orogênico gerados pela circulação de fluidos aquocarbônicos de baixa salinidade (Costa Neto, M.C., 1998; Fernandes, C.J.; et. al., 2005; Fernandes, C.J.; et. al, 2006b; Fernandes, C.J.; et. al., 2006c; Melo, R.P.; et. al., 2018; Melo, R.P., 2022). Os fluidos mineralizantes se originaram de processos metamórficos envolvendo sequências sedimentares siliciclásticas (Grupo Aguapeí) depositadas em uma bacia de rifte durante o final do Mesoproterozoico (D'Agrella-Filho, M.S.; et al., 2008; Geraldês, M.C.; et al, 2014; Leite, J.A.D.; Saes, G.S., 2020; Melo, R.P., 2016; Saes, G.S. E., 1999; Saes, G.S.; Leite, J.A.D., 1993; Teixeira, W.; et al., 2010.). Os depósitos AGGP estão alojados em estruturas de segunda ou terceira ordem próxima à zona de sutura entre o Bloco Paraguá e o Cráton Amazônico (Rizzotto, G.J.; et. al., 2013). Os estilos de mineralização incluem veios de quartzo com sulfetos (por exemplo, pirita, calcopirita, pirrotita) encontrados em dobras regionais e zonas de cisalhamento no contato entre os metassedimentos de Aguapeí e as rochas de embasamento (Melo, R.P., 2022).

O alvo ABP, situado a 6 km ao norte da mina Pau-a-Pique, representa um local estratégico de exploração. Dentro do alvo, ocorrências de ouro foram encontradas na zona de contato entre os granitos do Conjunto Intrusivo Pindaituba e os metassedimentos do Grupo Aguapeí, assim como em metassedimentos do Aguapeí dobrados e alterados hidrotermalmente. O contato entre o embasamento ígneo e os metassedimentos é marcado por falhas e cisalhamentos associados à Zona de Cisalhamento do Corredor (Ruiz, A.S., 2005; Bettencourt, J.S., 2010). A zona mineralizada consiste em veios de quartzo com muscovita hidrotermal, que abriga mineralização de alto teor. Os metassedimentos do Aguapeí dobrados e alterados hidrotermalmente estão situados no contexto da zona de charneira do Sinclinal Caldeirão (Fernandes, C.J.; et al., 2005a; Fernandes, C.J.; et al., 2005b; Melo, R.P., 2016; Melo, R.P., 2022; Menezes, R.G., 1993).

Apesar de ser considerada uma província madura em termos de exploração, a Província Aurífera Alto Guaporé (AGGP) carece de pesquisas geofísicas significativas em escala de

distrito ou depósito, em comparação com grandes províncias de ouro orogênico no mundo. Regionalmente, a literatura existente consiste em: (1) sismologia que investiga a crosta profunda na região (Mitchinson, D.E., 2009); (2) estudos regionais no depósito vizinho de Cabaçal que utilizam métodos potenciais para identificar intrusões dioríticas/porfíricas que hospedam mineralização de ouro, cobre e zinco (Morais, D.S.F., 2018); (3) estudos que aplicam inversão de dados aeromagnéticos regionais para orientar atividades de exploração (Aisengart, T.; et. al., 2017). Nenhum dos estudos mencionados se concentra na identificação de depósitos de ouro controlados estruturalmente em escala de depósito ou distrito. A eficácia do uso de ferramentas geofísicas e geológicas para buscar mineralização de ouro orogênico foi relatada na literatura. Em escala regional, a integração de dados aeromagnéticos e geoeletrônicos com informações geológicas e estruturais facilita a identificação de áreas prospectivas, que podem ser validadas por meio de interpretação geológica e estrutural robusta (*i.e.*, zonas de cisalhamento) e sua correlação com depósitos conhecidos (MacKenzie, D.; Craw, D., 2017). Em escalas de distrito e depósito, levantamentos terrestres potenciais e eletromagnéticos detalhados, realizados em várias etapas da pesquisa exploratória e integrados com dados geológicos (geoquímicos e estruturais), permitem o desenvolvimento de um modelo de favorabilidade para mineralização, validado por ferramentas matemáticas robustas para estabelecer associações entre depósitos conhecidos, ocorrências e assinaturas geofísicas (Niiranen, T.; Nykänen, V.; Lahti, I., 2019). Nas porções mais profundas da crosta, a integração de dados potenciais, sísmicos e elétricos com informações geológicas de boa qualidade pode aprimorar nossa compreensão da gênese da mineralização de ouro orogênico, conforme validado por dados de perfuração (Song, M., 2021; Adetunji, A.Q., 2023).

Trabalhos anteriores utilizaram polarização induzida para investigar a condutividade elétrica e a cargabilidade (disseminada) de minerais metálicos associados a depósitos de ouro orogênico (Doyle, H.A., 1990; Halloff, P.G.; H.O.; Johnson, I.; Hennessey, J., 1984; Li, Y.; Oldenburg, D.W., 1996; Yamashita, M., 1990). Exemplos que demonstram a aplicação eficaz desse método na exploração de ouro são fornecidos, todos os quais dependem de um conhecimento geológico preciso da área e de escalas de levantamento otimizadas (*i.e.*, espessura da mineralização; alterações; rochas hospedeiras e tipo de sulfetação) (Seigel, H.O.; Johnson, I.; Hennessey, J., 1984; Li, Y.; Oldenburg, D.W., 1996; Doyle, H.A., 1990; Halloff, P.G.; Yamashita, M., 1990).

O alvo ABP foi escolhido como um estudo de caso para levantamentos geofísicos terrestres (magnetometria e polarização induzida) devido à sua localização estratégica próxima à mina Pau-a-Pique e ao seu contexto geológico e estrutural. O objetivo deste estudo foi avaliar a aplicabilidade desses métodos em escala de distrito/deposito na exploração de ouro orogênico em áreas já exploradas. O ambiente geológico onde o alvo está situado é caracterizado por baixos gradientes magnéticos (Ribeiro, V.B.; Mantovani, M.S.M.; Louro, V.H.A., 2013) e potencial para polarização (*e.g.*, presença de sulfetos disseminados). Os resultados deste estudo ilustram o potencial da geofísica terrestre como uma ferramenta para orientar a exploração de depósitos de ouro orogênico em províncias maduras.

2. Contexto Geológico

2.1 Configuração Geológica

A área de estudo está situada na porção sudoeste do Cráton Amazônico (Figura 19.3) dentro do contexto geotectônico da orogenia Sunsás–Aguapeí (1,25–1,00 Ga) (Bettencourt, J.S., 2010; Cole, K.S.; Cole, R.H., 1941; Rizzotto, G.J.; Hartmann, L.; Santos, J.O.S.; McNaughton, N. 2014). Os depósitos AGGP estão alojados ao longo do Cinturão Aguapeí, um cinturão estreito (~30 km de largura) de dobras metamórficas de baixo grau do Neoproterozoico (~0,92 Ga) (Melo, R.P., 2016). O Cinturão Ocidental Amazônico se desenvolveu durante os estágios finais de reativação, transpressão e fechamento de bacias do tipo rifte, resultantes da convergência entre o Bloco Paraguá e o Cráton Amazônico (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2007).

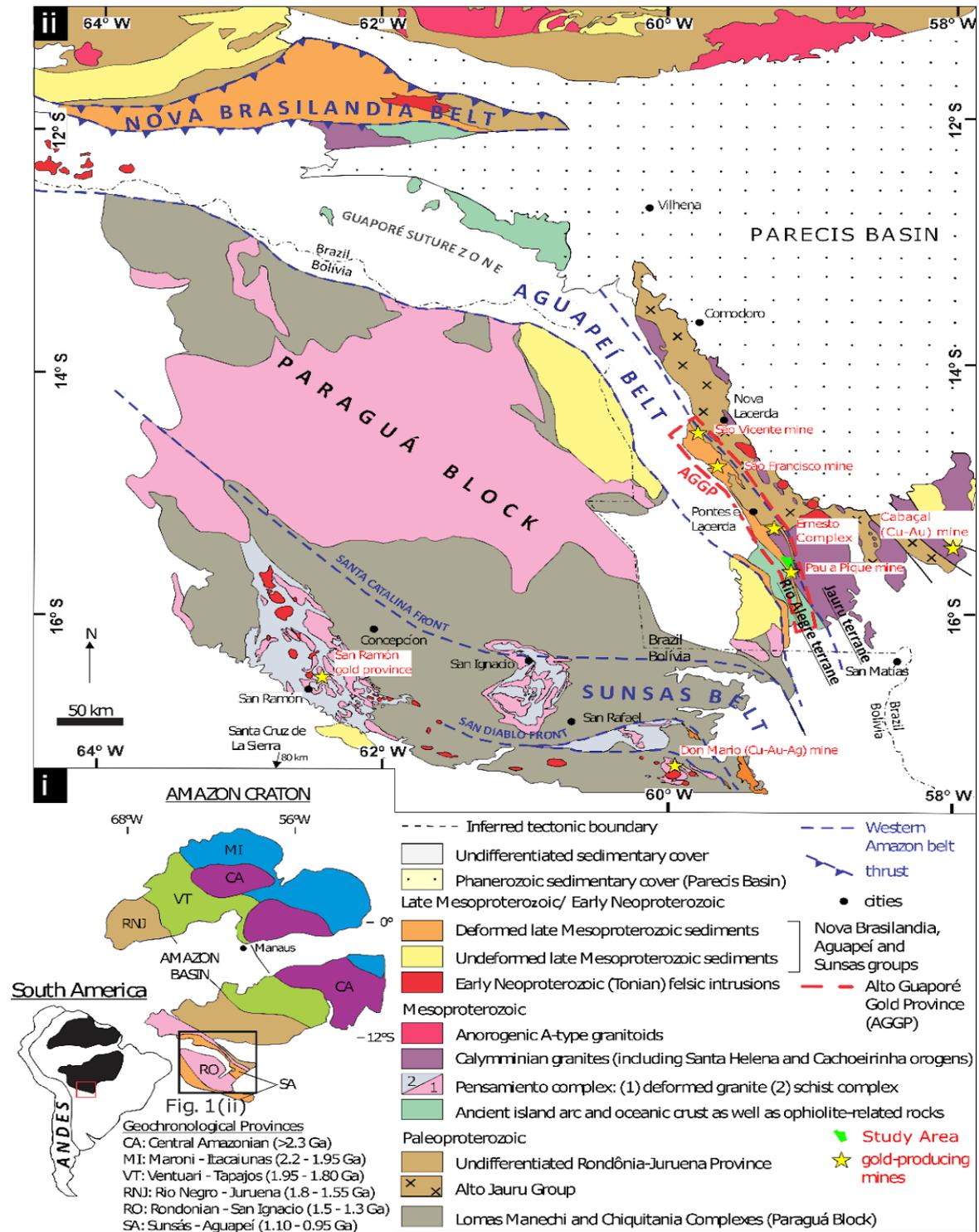


Figura 19.3 – Configurações geológicas regionais (extraídas e modificadas de Melo, R.P.; et. al. (2022)). (A) Principais províncias geocronológicas do Cráton Amazônico de acordo com Cole, K.S.; Cole, R.H. (1941) e sua localização na América do Sul. (B) Principais domínios geológicos e tectônicos do sudoeste do Cráton Amazônico (modificado de (Menezes, R.G.; et. al., 1993; Rizzotto, G.J.; et. al., 2013), após (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2007; Litherland, M., 1984; Schobbenhaus, C.; Bellizzia, G., 2001; Tassinari, C.G.; Macambira, M.J.B., 1999). A linha azul tracejada representa os limites dos cinturões do Neoproterozoico inicial que constituem o Cinturão Ocidental Amazônico (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2017). O Cinturão Aguapéi, o mais jovem cinturão de dobra e empurrão formado durante a orogenia Sunsás-Aguapéi (Litherland, M.; et. al., 1989; Litherland, M.; et. al., 1981; Teixeira, W.; et. al., 2010), começou com a deposição de sedimentos siliciclásticos do Grupo Aguapéi em bacias do tipo rifte (1265–1150 Ma) (D'Agrella-Filho, M.S.; et. al., 2008; Geraldés, M.C.; et. al., 2014; Rizzotto, G.J.; et. al., 2014), posteriormente deformados e metamorfoseados em baixo grau durante os estágios finais de compressão e transpressão ao longo da margem Mesoproterozoica do Cráton Amazônico (Cordani, U.G.; Teixeira, W., 2007; Melo, R.P.; et. al., 2022).

O Grupo Aguapeí abrange uma sequência espessa de rochas metassedimentares siliciclásticas depositadas em uma bacia do tipo aulacogêno Leite, J.A.D.; Saes, G.S., 2000; Leite, J.A.D.; Saes, G.S., 1993; Rizzotto, G.J., 1999), entre 1265 e 1149 ± 7 Ma (D'Agrella-Filho, M.S., 2008; Souza, E.P.; Hildred, P.R., 1980). O grupo é dividido em três formações: a Formação Fortuna (conglomerados e arenitos quartzo), a Formação Vale da Promissão (metapsamitos e metapelitos) e a Formação Morro Cristalina (arenitos fluviais e siltitos) (Saes, G.S., 1999; Saes, G.S.; Leite, J.A.D., 1993; Leite, J.A.D.; Saes, G.S., 2000). As rochas mencionadas exibem metamorfismo de baixo grau em fácies xisto verde (Melo, R.P., 2016; Saes, G.S.; Menezes, R.G., et. al., 1993; Leite, J.A.D., 1993).

O embasamento do Grupo Aguapeí é composto por rochas dos terrenos Rio Alegre e Jauru. O Terreno Rio Alegre é composto por rochas metavulcanossedimentares (Formações Minouro, Santa Izabel e São Fabiano) (Pulz, G.M.; et. al., 2003), interpretadas como uma zona de sutura entre o Bloco Paraguá e o Cráton Amazônico (por exemplo, (Rizzotto, G.J.; et. al., 2013). O Terreno Jauru (1780 Ma–1420 Ma) abrange rochas ígneas e metamórficas do Paleoproterozoico e Mesoproterozoico, incluindo o Grupo Alto Jauru, o Complexo Metamórfico Alto Guaporé e o Conjunto Intrusivo Figueira Branca (Bettencourt, J.S.; et. al., 2010).

Na área do estudo, o embasamento do Grupo Aguapeí é representado por granitos e granitoides do Conjunto Intrusivo Pindaituba (granitos Maraboa, Guaporé, Santa Elina e Tonalito Lavrinha) (Bettencourt, J.S.; et. al., 2010; Ruiz, A.S., 2005). Essas rochas são interpretadas como granitoides de arco magmático continental, com idades de cristalização estimadas entre 1465 ± 4 Ma (Geraldés, M.C.; et. al., 2001) e $1461,6 \pm 4$ Ma (Melo, R.P.; et. al., 2022).

2.2 Alvo ABP

O alvo ABP está localizado na parte central da Província Aurífera Alto Guaporé (AGGP), entre os municípios de Pontes e Lacerda e Porto Esperidião, aproximadamente 6 km ao norte da Mina Pau-a-Pique (Figura 20.3). Nesta área, granitos Mesoproterozoicos estão expostos nas encostas relativamente planas da crista Pau-a-Pique, orientada a NW, enquanto rochas metassedimentares do Grupo Aguapeí formam afloramentos na encosta média e no topo da crista. O relevo sombreado no fundo do mapa geológico (Figura 21.3-B) ilustra a topografia e as diferenças de elevação, que variam de 325 m a 575 m, na área do alvo.

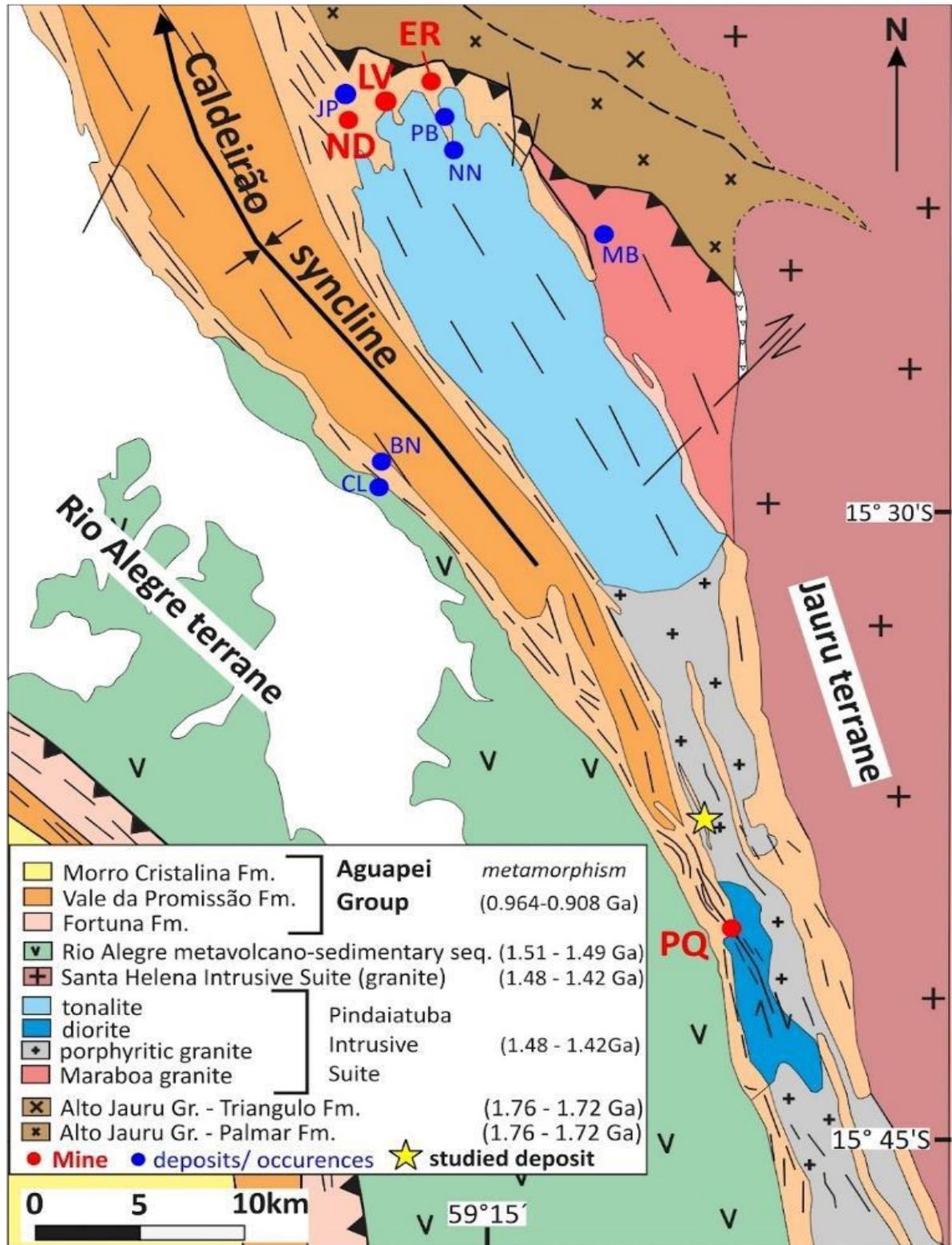


Figura 20.3 – Mapa geológico da porção central da Província Aurífera Aguafeí (AGGP), indicando a localização aproximada do depósito estudado (alvo ABP), assim como minas comerciais e ocorrências conhecidas de ouro. BN = Bananal; CL = Caldeirão; ER = Ernesto

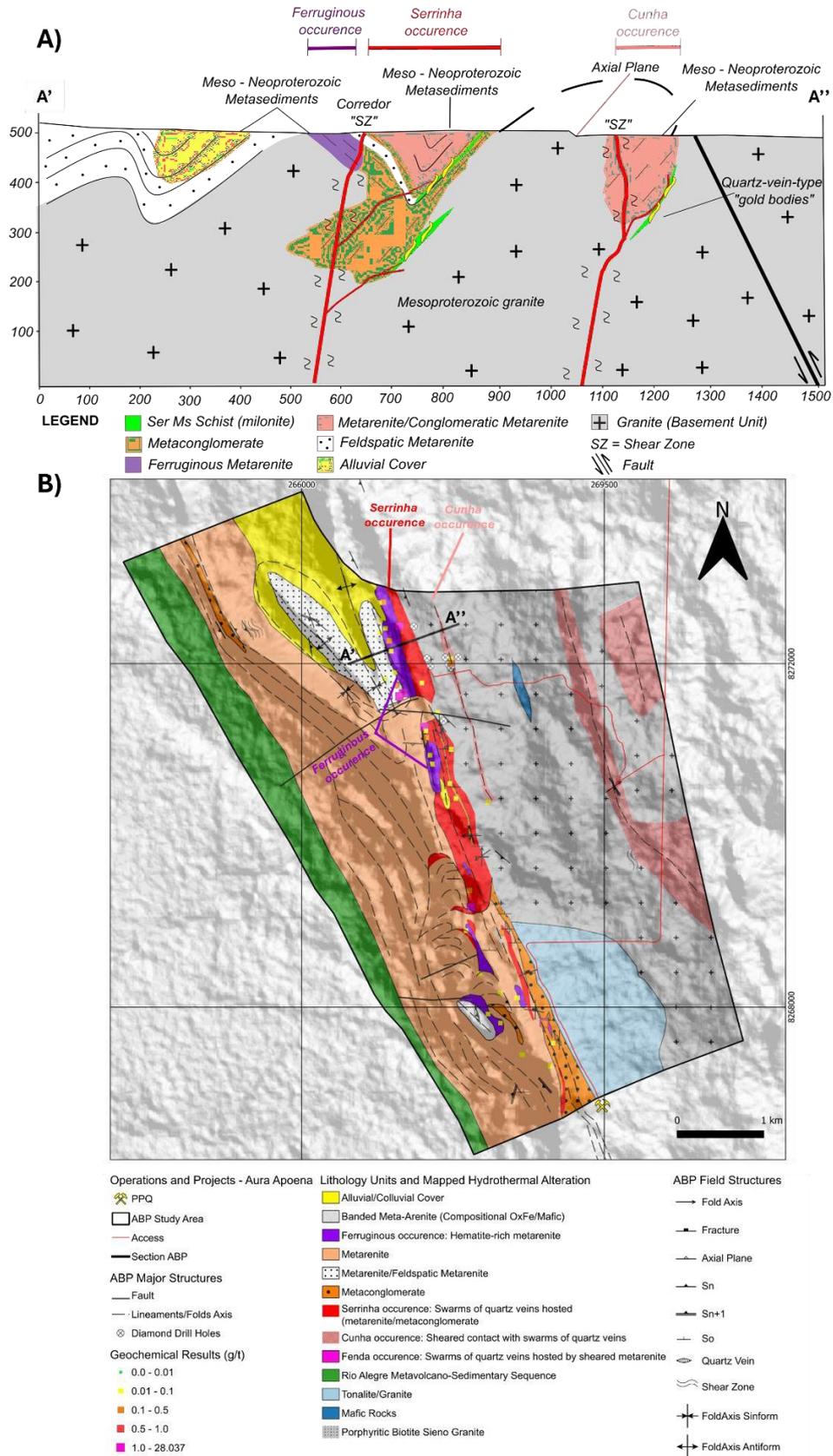


Figura 21.3 – Mapa geológico e seção de perfil do alvo ABP. (A) Seção geológica interpretada da área estudada. (B) Mapa geológico detalhado com a alteração hidrotermal mapeada das três ocorrências de ouro do alvo ABP. PPQ = Pau-a-Pique e ABP = Anomalia BP.

O alvo ABP compreende três ocorrências de ouro conhecidas como Cunha, Serrinha e Ferruginoso (Figura 21.3-B). A ocorrência Cunha, situada na parte oriental do alvo, está localizada no contato leste de uma camada em forma de cunha de metaconglomerado, tectonicamente posicionada dentro do granito do embasamento circundante. Esta cunha metassedimentar tem aproximadamente 100 m de espessura e se estende por mais de 400 m de comprimento (Figura 3B). Em seção transversal, apresenta uma forma triangular (Figura 21.3-A) e é interpretada como metassedimentos intercalados tectonicamente no embasamento granítico. Anomalias de ouro acima do fundo marcam uma anomalia de ouro na superfície, associada a uma zona rica em minerais de óxido de ferro (*e.g.*, hematita, especularita e magnetita em menor quantidade). Os fluidos hidrotermais que circulam pela zona de cisalhamento alteraram o milonito em camadas de muscovita e biotita hidrotermais, além de veios de quartzo (Melo, R.P.; et. al., 2022). A zona de cisalhamento é estimada em aproximadamente 200 m de espessura e mais de 3,5 km de comprimento (Figura 21.3-B).

A ocorrência Serrinha se assemelha à ocorrência Cunha, pois também está localizada ao longo do contato cisalhado entre o granito e os metassedimentos (*i.e.*, metarenitos e metarenitos líticos e conglomerados). A alteração hidrotermal observada em Serrinha é semelhante a da ocorrência Cunha, caracterizada por enxames de veios de quartzo em escala centimétrica associados a "xistos" de muscovita-biotita hidrotermais, óxido de ferro (magnetita) (Figura 22.3-iv, v), sulfetos disseminados (pirita) e silicificação pervasiva. A ocorrência Ferruginoso apresenta uma zona com forte presença de óxidos de Fe (hematita + magnetita) (Figura 22.3iii) e sulfetos (pirita cúbica a octaédrica), disseminados por rochas metassedimentares dobradas (metarenito e metaconglomerado) do Grupo Aguapeí. Esta zona, caracterizada por óxidos de Fe e sulfetos, está associada a teores de ouro superiores ao background, apresentando uma forma lenticular, com aproximadamente 50 m de espessura e mais de 3 km de comprimento, disposta em lentes ao longo da direção. Em ambas as ocorrências Serrinha e Cunha, os veios de quartzo são brancos e translúcidos, ocorrendo em escala centimétrica, às vezes com calcita (Figura 23.3-A) e albita (Figura 23.3-B), e cercados por muscovita e biotita hidrotermais (Figura 23.3). Outras fases hidrotermais presentes incluem magnetita (Figura 23.3-B), calcita (Figura 23.3-C) e sulfetos (pirita e menores quantidades de calcopirita) (Figura 23.3A, D–F).

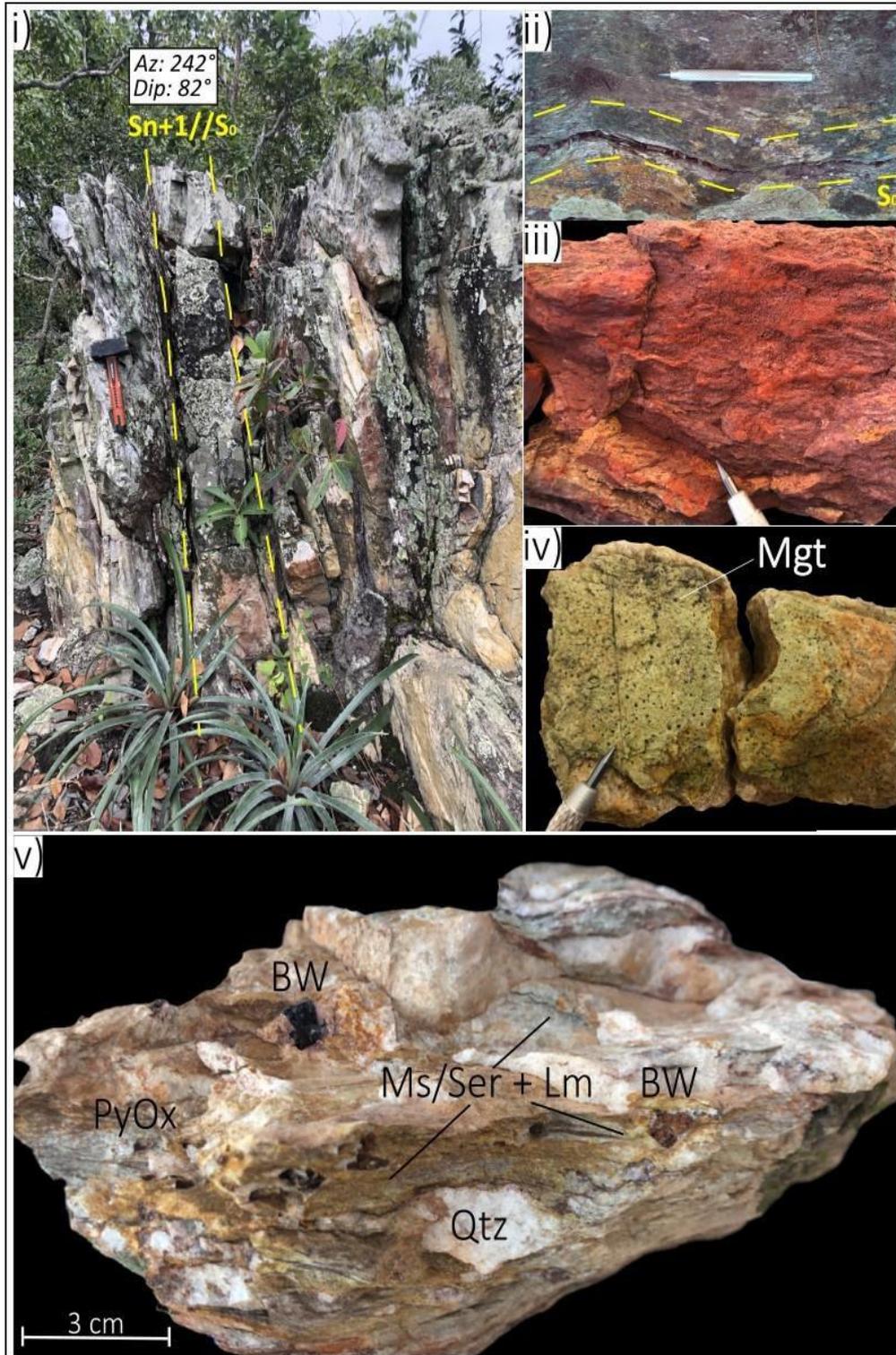


Figura 22.3 – Fotos mostrando aspectos das exposições de superfície intemperizadas da alteração hidrotermal do alvo ABP. (i) Rochas metassedimentares intensamente deformadas aflorando na parede superior da ocorrência Serrinha, mostrando deformação moderada e estratificação (S_0) paralela à foliação principal ($S_n + 1$); (iii) metarenito ferruginoso da ocorrência ferruginoso caracterizado por hematita/especularita hidrotermal limonitizada e pirita oxidada; (iv) amostra de metarenito silicificado com magnetita disseminada da ocorrência Serrinha; e (v) amostra intemperizada da alteração hidrotermal da ocorrência Serrinha caracterizada por veios de quartzo em forma sigmoidal associados a muscovita, pirita oxidada, limonita e textura “box work”. Az = Azimute; Mgt = magnetita; BW = caixa; PyOx = sulfeto oxidado; Ms = muscovita; Ser = sericita; Lm = limonita e Qtz = quartzo.

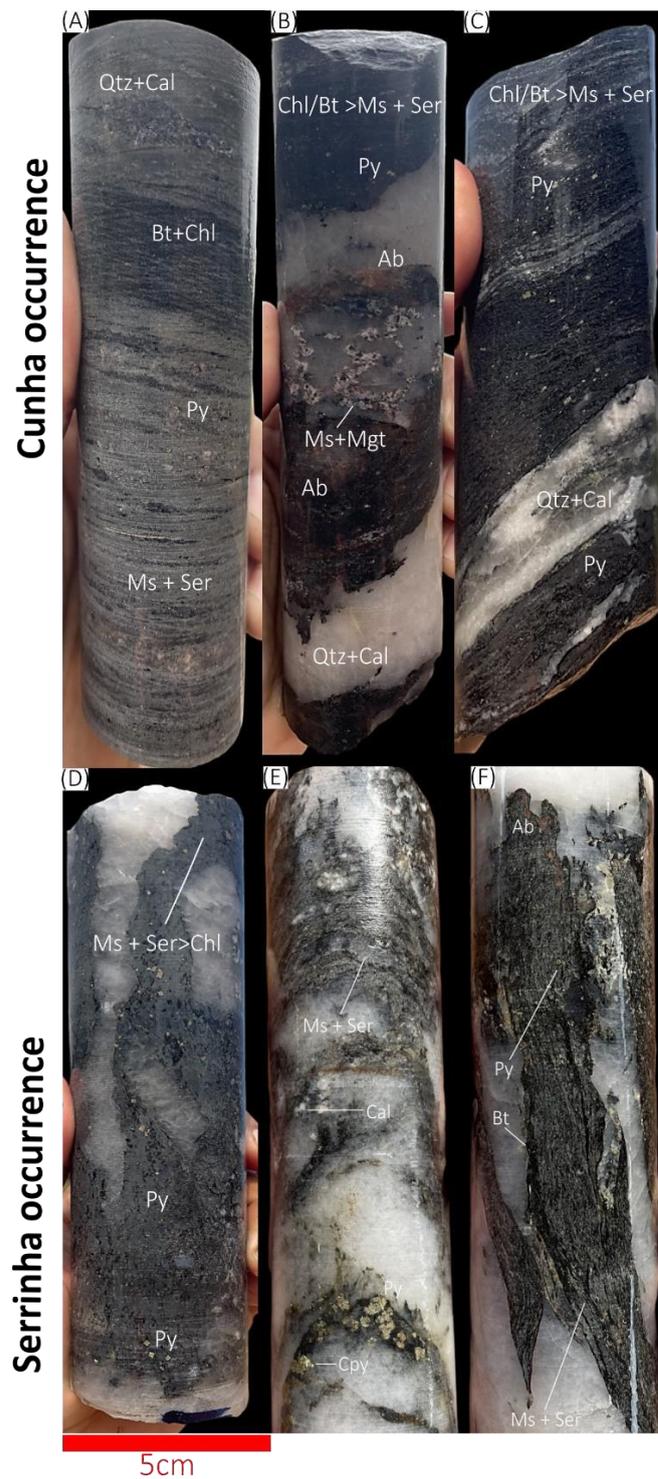


Figura 23.3 – Fotos de testemunhos de sondagem mostrando os aspectos da alteração hidrotermal das ocorrências Cunha e Serrinha no alvo ABP. As fotos mostram que a alteração hidrotermal de Cunha é caracterizada por veios de quartzo \pm calcita (C) em associação com "xistos" de muscovita-biotita hidrotermais formados no contato cisalhado (A) entre os metassedimentos do Grupo Aguapeí e o embasamento granítico. As outras fases hidrotermais incluem magnetita (B); albita (B, F); calcita (C, E); pirita (A, D–F) e calcopirita (E). As características da mineralização no contexto do sistema Serrinha, com graduação entre o embasamento granítico e zonas deformadas com veios (camadas de muscovita hidrotermal), têm paragênese definida por $Qtz + Cal + Al + Py > Cpy + Ms-Ser$ e Mgt e Bt em traços. Mgt = magnetita; Py = pirita; Cpy = calcopirita; Ms = muscovita; Ser = sericita; Cal = calcita; Bt = biotita e Qtz = quartzo.

Assim como no depósito Pau-a-Pique, as zonas mineralizadas de Serrinha e Cunha estão hospedadas em uma camada de muscovita hidrotermal associada a veios de quartzo e sulfetos

(Figura 23.3), desenvolvida no contato entre o granito no *footwall* e os metassedimentos na *hangwall*. Essas zonas mineralizadas, formadas ao longo de zonas de cisalhamento subverticais orientadas a NNW, possuem uma inclinação de aproximadamente 75° , com uma espessura média de 7m. A camada de muscovita hidrotermal exibe uma xistosidade bem desenvolvida e contém abundantes veios de quartzo laminados que mostram formas sigmoides e são paralelos à foliação. O *footwall* das zonas mineralizadas consiste em granitos biotíticos leucocráticos de grão médio a grosso com textura porfíricas frequente, associados à Suíte Intrusiva Pindaituba. Ocasionalmente, essas rochas exibem foliação penetrativa, às vezes acompanhada de deformação milonítica. O *hangwall* é composto por intercalações (*i.e.*, sequências finas e grosseiras) entre metaconglomerados oligomíticos com seixos de quartzo e feldspato de até 5cm de tamanho. Além disso, inclui metarenitos e metarenitos líticos, bem como conglomerados da Formação Fortuna, que possuem clastos de quartzo e feldspato alongados na direção da foliação. Essas camadas mostram estratificação (S0) paralela à foliação principal (Sn + 1).

A estrutura da área onde o alvo está localizado é caracterizada por uma complexa associação de estruturas em escala regional, resultante da confluência entre a zona de cisalhamento do corredor e a zona de dobramento da Sinclinal Caldeirão (Fernandes; et.al., 2005b; Fernandes; et.al., 2006c; Fernandes; et. al., 2006d; Matos; et. al., 2004; Melo; et. al., 2022; Pulz; et. al., 2003) (Figura 21.3). Essa é a razão pela qual o alvo foi selecionado como estudo de caso para este projeto de pesquisa. Na região do alvo ABP, foram identificadas estruturas associadas a duas fases de deformação compressional (D1 e D2) e uma fase de transpressão (D3) (Baia, 2007; Cezar, 2004; Fernandes; et. al., 1999; Fernandes; et. al., 2005a; Fernandes; et.al., 2005b; Pulz; et. al., 2003). De acordo com Melo; et. al. (2022), a zona de cisalhamento foi formada durante o evento de compressão D2, que levou ao desenvolvimento de foliações miloníticas. No entanto, acredita-se que a deposição de ouro ocorreu durante a fase D3, durante a transição de regimes compressionais para transpressionais com reativação de estruturas pré-existentes. O plano de deformação mais proeminente (Sn + 1) é consistentemente paralelo à camada (S0).

3. Métodos

Neste estudo foram utilizados dados de magnetometria e polarização induzida (IP) obtidos em levantamentos terrestres executados ao longo de linhas que cruzam as três anomalias de ouro do Alvo ABP.

3.1 Levantamento magnético terrestre

Os dados magnéticos de superfície foram adquiridos pelo autor com o apoio da equipe da Aura Minerals Inc. (Pontes e Lacerda - MT). A aquisição ocorreu ao longo de linhas de aproximadamente 1,5 km de comprimento, orientadas de NE a SW. Um total de 71 linhas foi levantado, cobrindo uma distância total de 107,37 km (Figura 24.3-A).

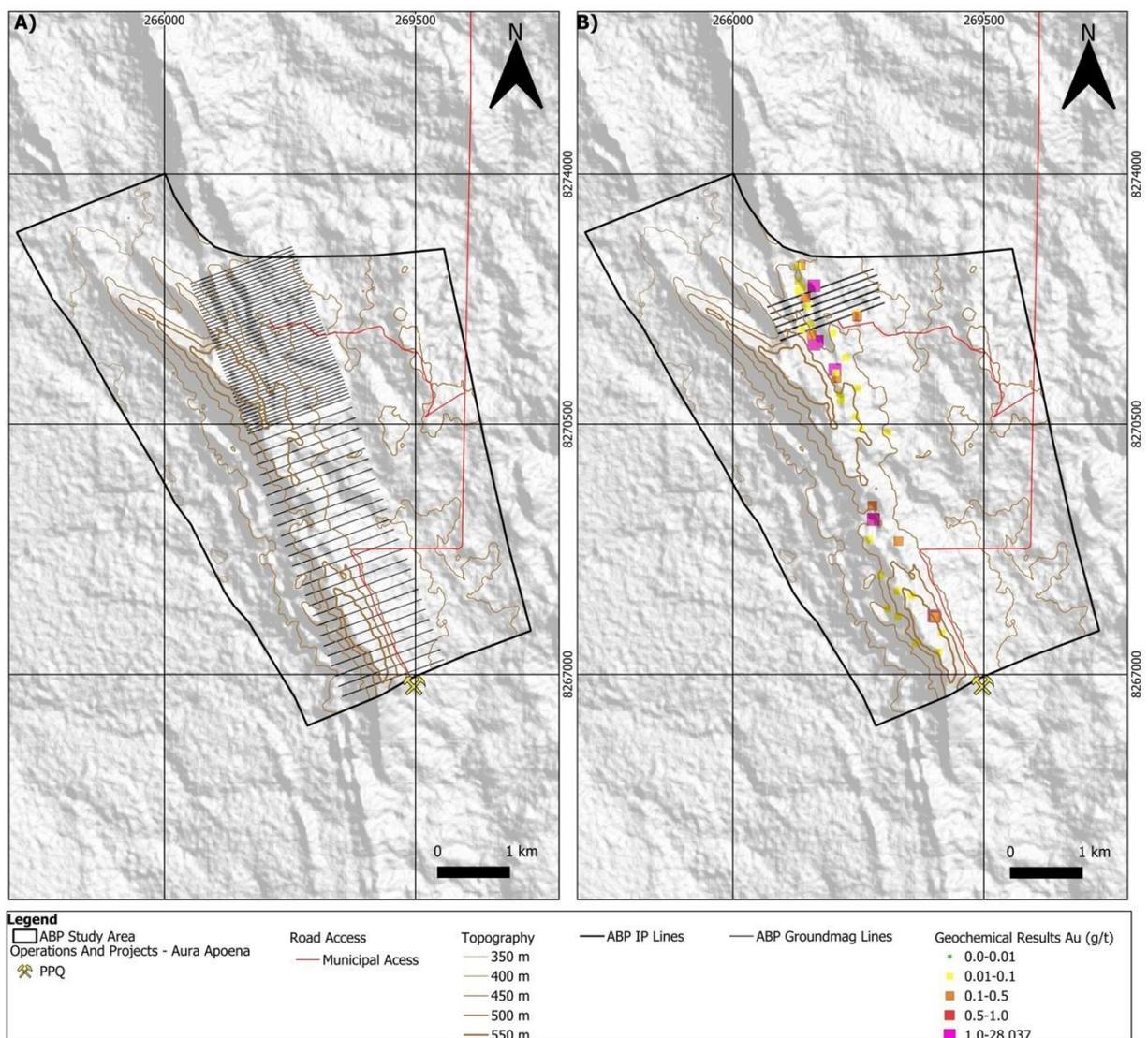


Figura 24.3 – Mapa de localização das condições topográficas: (A) linhas de aquisição de dados magnéticos, (B) linhas de aquisição de polarização induzida (IP) e anomalias geoquímicas da área. Modelo digital de elevação (DEM). Fonte: ALOS PALSAR — correção radiométrica de terreno. Os pontos de acesso municipal correspondem às

linhas vermelhas. PPQ = Pau-a-Pique e ABP = Anomalia BP.

O levantamento magnético de superfície foi realizado usando dois espaçamentos de linha diferentes (Figura 24.3-A). Na porção norte da área, onde estão localizadas as principais ocorrências de ouro do alvo ABP, a malha do levantamento tinha um espaçamento de linha de 50 m, com leituras feitas a cada 25 m ao longo das linhas de aquisição. Em contrapartida, na parte sul, o levantamento foi conduzido com um espaçamento de linha de 150 m entre as linhas, com leituras também feitas a cada 25 m.

A configuração do levantamento foi definida com base em estruturas previamente mapeadas em campo, utilizando mapeamento geológico na escala de 1:2500. Essa abordagem foi importante para localizar a estrutura principal (zona de cisalhamento do corredor), nas áreas de baixas anomalias magnéticas, especialmente na porção norte, onde foi aplicado um nível mais alto de detalhamento (50×25 m).

Os equipamentos utilizados incluíram dois magnetômetros, modelos GSM-19TW e GSM-19W, fabricados pela GEM Systems. Para monitorar a variação diurna do campo magnético, as leituras foram feitas em intervalos de 30 segundos em uma estação base localizada em uma área livre de interferências magnéticas. Durante a fase de pré-processamento dos dados, foram realizadas correções diurnas e a remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). Os dados foram processados usando o programa de computador *Oasis Montaj* (Versão Educacional 2022.1) (Baia, 2007). Além disso, foi realizada a modelagem dos dados para determinar a distribuição dos valores de suscetibilidade magnética e a direção do vetor de magnetização (MVI), que foram extraídos usando o programa computacional VOXI 2.1. O tamanho da célula utilizado foi de $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, e os parâmetros de inversão padrão do *Oasis Montaj* foram aplicados ao processo de inversão.

3.2 Levantamento de polarização induzida

Os dados de polarização induzida foram adquiridos ao longo de seis linhas na porção norte do alvo ABP. Essas linhas de levantamento IP tinham aproximadamente 1,5 km de comprimento (Figura 24.3-B) e estavam orientadas de NE a SW, perpendiculares à direção das ocorrências de ouro. A malha do levantamento tinha um espaçamento de linha de 100 m (Figura 24.3-B). Os eletrodos e os comprimentos de dipolo (MN e AB) foram instalados com um

espaçamento de 50 m, exceto na linha 6 (L6), onde a aquisição de dados envolveu dois espaçamentos de 25 m e 50 m, respectivamente. A linha 6 foi escolhida para a implantação de arranjos dipolo-dipolo (DD) e polo-dipolo (PD) com 10 níveis de profundidade de investigação, visando selecionar o mais adequado para a área de estudo. A linha 6 foi selecionada para testar diferentes espaçamentos de aquisição e arranjos, pois cobre todas as ocorrências mapeadas no alvo ABP e apresenta os maiores teores de ouro em amostras geoquímicas de rocha e os melhores intervalos em furos de sondagem (Figura 25.3).

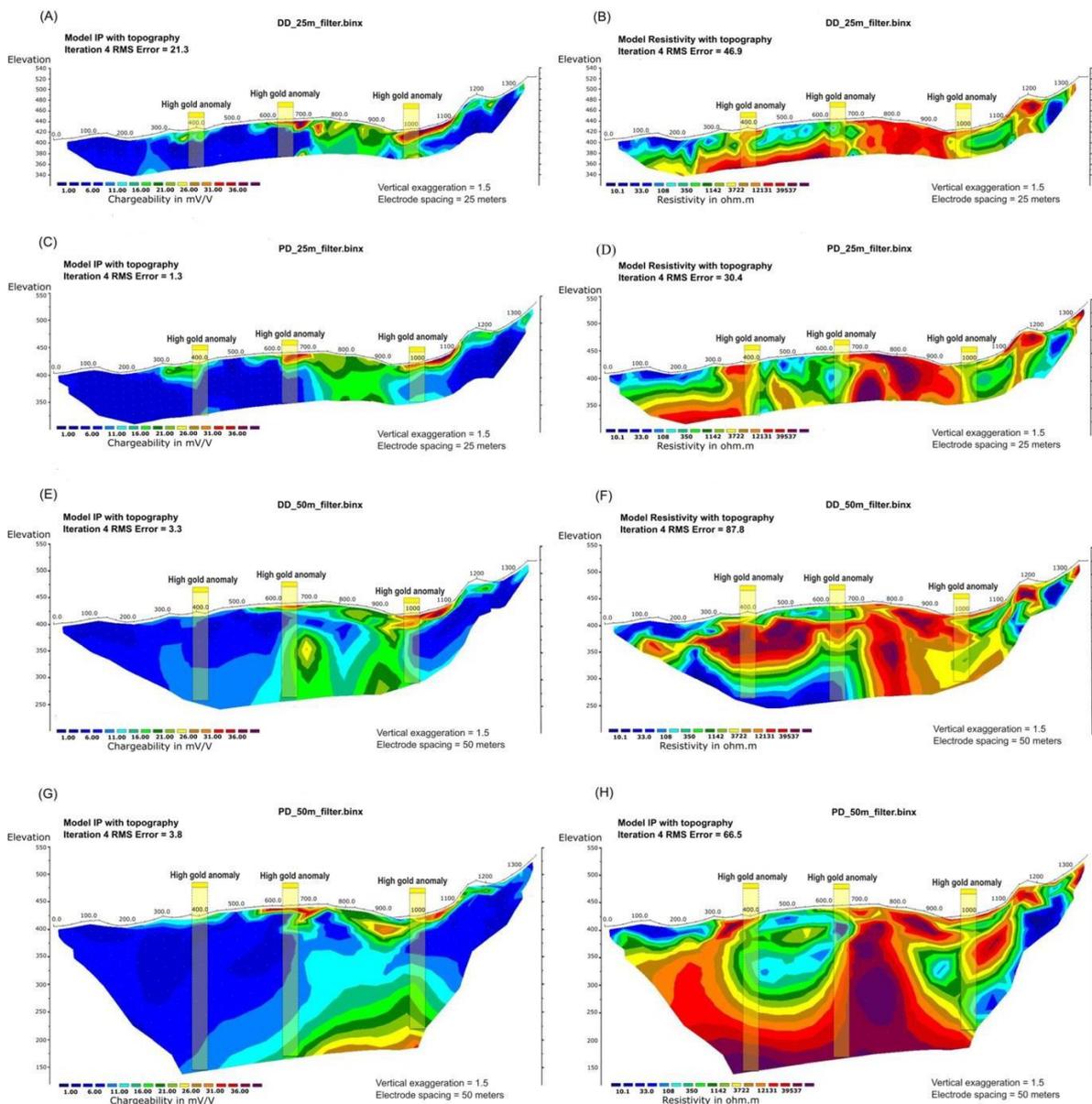


Figura 25.3 – Pseudo-seções invertidas cobrindo as duas configurações testadas na linha 6, dipolo-dipolo (DD) e pólo-dipolo (PD), com espaçamentos de 25 e 50 m entre os eletrodos. Nas seções (A–D) para a linha 6 com espaçamento de 25 m entre os eletrodos, estão apresentados tanto os arranjos dipolo-dipolo quanto pólo-dipolo. As seções (E–H) mostram os dois arranjos com espaçamento de 50 m.

Para facilitar a aquisição de dados de IP, foram utilizados os seguintes equipamentos: (i) um receptor *ELREC-PRO* de 10 canais e (ii) um transmissor VIP 4000, ambos fabricados pela *Iris Instruments*.

Os parâmetros de coleta de dados incluíram um ciclo de injeção de corrente e registro de 4000 ms (*e.g.*, 2 s ligado e 2 s desligado) e janelas de tempo (amostragem) da curva potencial de Cole–Cole. A corrente elétrica injetada pelo transmissor variou de 1 a 3 A, dependendo da resistência de contato elétrico entre o eletrodo de corrente e o solo (*e.g.*, correntes mais baixas em áreas com metassedimentos silicificados expostos).

A topografia ao longo das linhas de IP foi obtida usando um GPS Geodésico modelo *GNSS Topcon HiPer VR*, fabricado pela *Topcon Positioning Systems, Inc.* (Livermore, CA, EUA).

A filtragem dos dados foi realizada usando o programa computacional *Prosys III*, versão V2.11 (*Iris Instruments Inc.*, Orléans, França), com base nos seguintes princípios: extração de registros de resistividade e carga fora da distribuição log-normal e identificação de carga com curvas de decaimento que se desviam das funções exponenciais decrescentes.

A modelagem dos dados de IP foi feita utilizando o programa computacional *Res2dinv*, versão 2024.1.1 *Seequent (Bentley Systems)*. Na modelagem inversa, foi empregada a rotina de suavização restrita (Sasaki, Y., 1992) deste programa para alcançar transições mais suaves (*e.g.*, materiais geológicos) e um filtro vertical para realçar estruturas verticais (*e.g.*, zonas de cisalhamento). Em seguida, foram removidos pontos com maiores erros RMS (picos).

Os resultados obtidos do arranjo dipolo-dipolo (DD) foram limitados na área de estudo, em ambos os espaçamentos (25 e 50 m), devido à profundidade de investigação limitada e à baixa relação sinal-ruído em comparação com o arranjo polo-dipolo (PD). Por outro lado, o arranjo PD oferece o benefício de alcançar maior profundidade de investigação. Consequentemente, o arranjo polo-dipolo com espaçamento de 50 m foi considerado ideal para continuar o estudo nas linhas restantes, apesar das limitações mencionadas. Além disso, quando comparado ao espaçamento de 25 m, os ganhos em profundidade de investigação foram significativamente maiores, considerando as dimensões maiores das anomalias observadas com o espaçamento de 50 m.

4. Resultados

4.1 Dados magnéticos terrestres

Os resultados do processamento dos dados magnéticos de solo são apresentados em mapas do campo magnético residual (RMF) e do gradiente total (GT), Figura 26.3-A e 26.3-B, respectivamente, além de modelos de inversão 3D dos dados magnéticos, que incluem a recuperação do valor de amplitude da inversão do vetor magnético, realizada no *VOXI (Oasis Montaj)*.

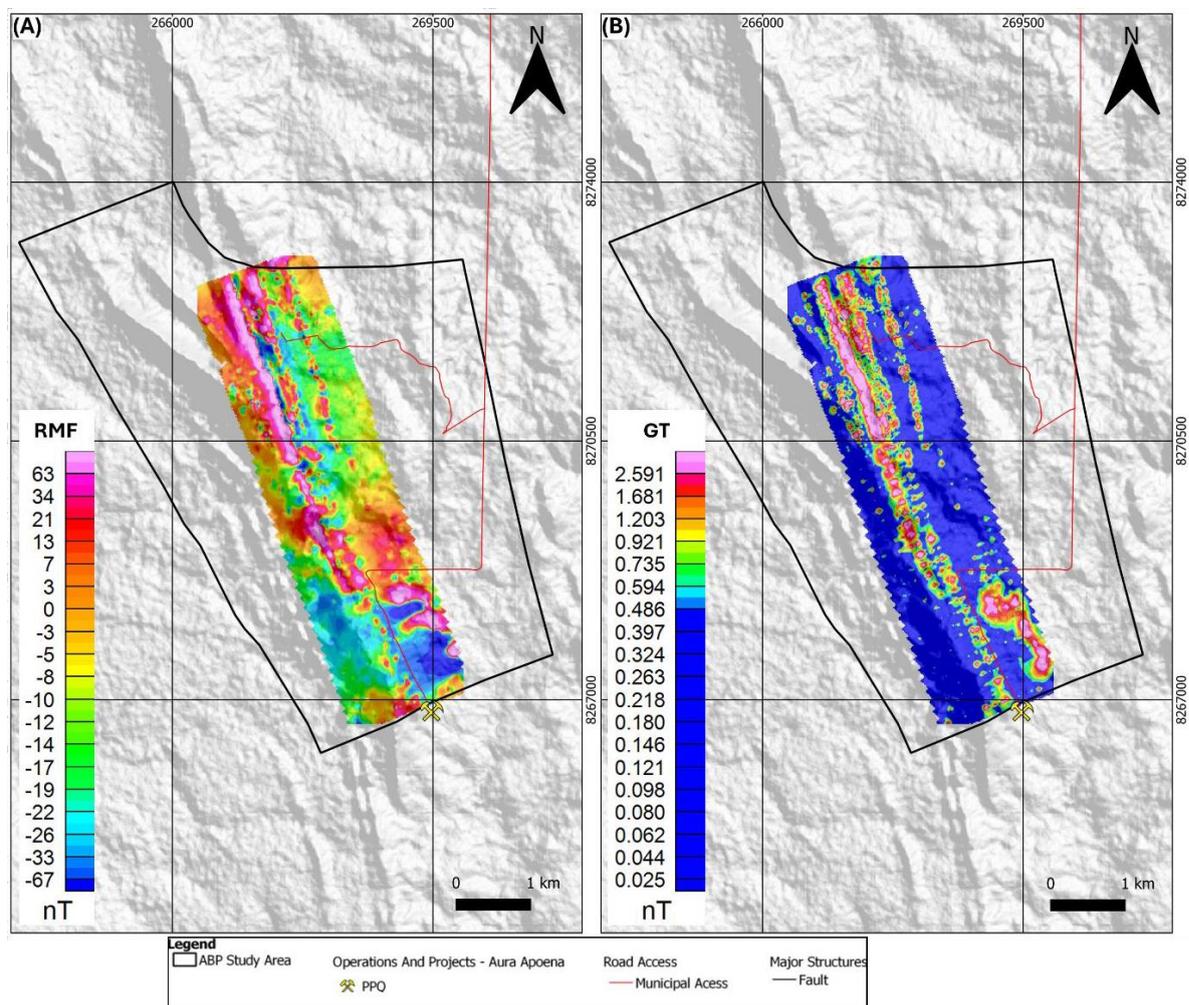


Figura 26.3 – Dados magnéticos terrestres: (A) campo magnético residual e (B) gradiente total. Linhas tracejadas em preto destacam a continuidade da zona de cisalhamento do corredor, demarcada por uma anomalia magnética baixa com orientação NW–SE. O modelo digital de elevação (DEM) é proveniente do ALOS PALSAR—correção radiométrica do terreno. PPQ = Pau-a-Pique e ABP = BP Anomalia.

A análise das anomalias magnéticas no mapa, especialmente no mapa do gradiente total (GT) (Figura 26.3-B), revela um padrão linear entrelaçado com anomalias magnéticas de alta

frequência (0,594–2,591 nT/m) orientadas ao longo de uma tendência NNW. Os valores mais altos, tanto no GT (Figura 26.3-B) quanto no campo magnético residual (RMF) (Figura 26.3-A), estão geralmente associados a exposições de rochas metassedimentares do Grupo Aguapeí (metarenitos e metaconglomerados) que contêm óxidos de ferro (magnetita, hematita e ilmenita), enquanto o granito porfirítico da Suíte Intrusiva Pindaituba exhibe baixa intensidade magnética, contrastando com as rochas metassedimentares em um cenário de variações de campo.

Os modelos de inversão tridimensional (malha de 50×50 m) dos corpos magnéticos recuperados (Figura 27.3) demonstram que as anomalias magnéticas de maior intensidade se manifestam como corpos lineares com tendência NNW, subverticais e com inclinação acentuada para o WSW (Figura 27.3-B, C). Esse padrão é mais proeminente em duas regiões da área de estudo: uma na porção NNW, onde as anomalias mais pronunciadas estão localizadas, e outra na porção sudeste, onde uma anomalia menor em área e volume é identificada (Figura 27.3-A, B).

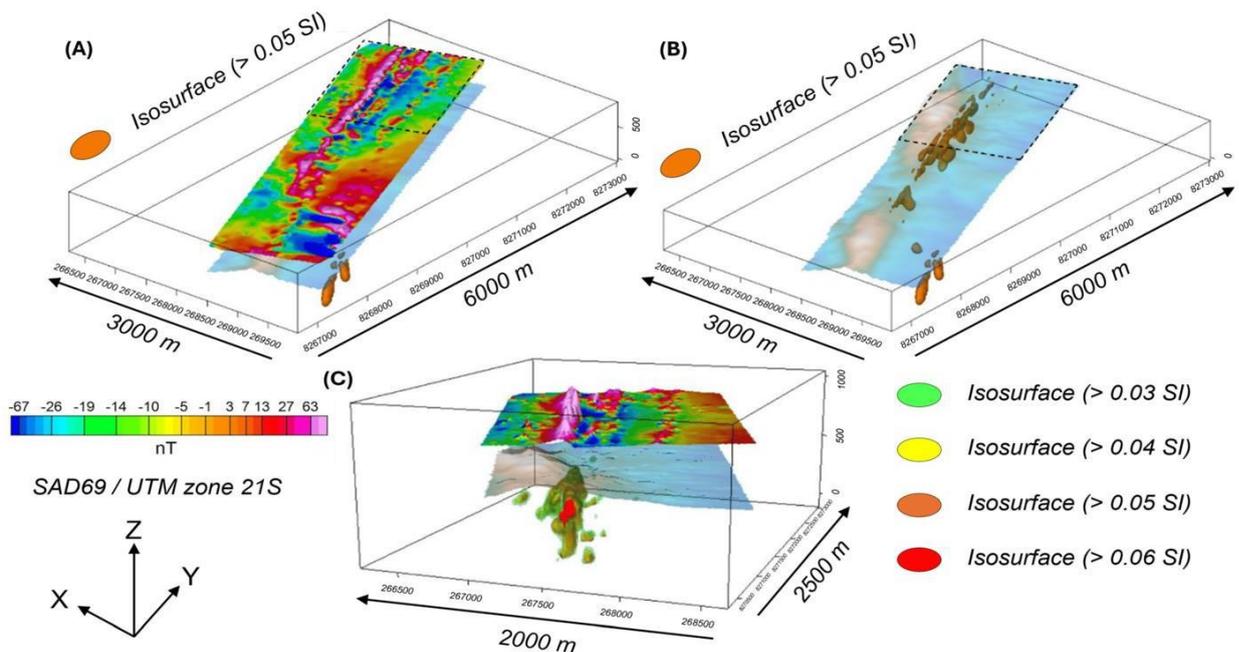


Figura 27.3 – Mosaico tridimensional com a forma dos corpos magnéticos em profundidade, recuperados pela inversão de anomalias dos dados magnéticos, com linhas tracejadas delimitando a área de maior detalhe (C) e o layout topográfico do DEM da área. (A) Relevô do campo magnético residual (RMF) (vista para NW). (B) Modelo magnético recuperado sobreposto ao modelo digital de elevação (DEM) (vista para NW), com resultados obtidos usando malhas de 50×50 e 150×150 m. (C) Representação da porção mais ao norte do detalhe com malha de 50×50 m, vista de um ângulo diferente (de N a S).

Na porção NNW da área de estudo, uma série de antififormes e sinformes abertos, com zonas de dobramento orientadas na direção NNW–SSE, foram mapeadas em rochas

metassedimentares do Grupo Aguapeí (Figura 22.3). Pesquisas aeromagnéticas regionais (Folha SD.21-Y-C-II-Sinal Analítico, 2008; Folha SD.21-Y-C-V-Sinal Analítico, 2008) estão consistentemente associadas a esse padrão de orientação e à intensidade das anomalias do gradiente total, relacionadas à presença de rochas metassedimentares dobradas do Grupo Aguapeí, especialmente no contato cisalhado entre metassedimentos e rochas do embasamento, tipicamente caracterizado por zonas de cisalhamento subverticais. Na parte central-sul do cinturão, essas zonas de cisalhamento subverticais hospedam alguns dos depósitos de ouro conhecidos, como a mina Pau-a-Pique, onde as zonas mineralizadas estão orientadas ao longo de tendências NNW com um mergulho para o SW.

É provável que os altos valores de RMF e GT também sejam observados em alguns dos depósitos de ouro ao longo do cinturão devido à presença de alguns minerais ferromagnéticos (magnetita, hematita, ilmenita e menor quantidade de pirrotita), particularmente aqueles situados no contato entre os metassedimentos e o granito ou entre os metassedimentos e o embasamento metavulcanossedimentar, que normalmente exibem valores de $GT < 0,594$ nT.

A anomalia magnética no canto sudeste do mapa ocorre em uma área onde rochas intrusivas da Suíte Pindaituba estão mapeadas (Figura 26.3). Essas rochas são tipicamente caracterizadas por baixos valores de GT e RMF. A anomalia é interpretada como uma unidade litológica orientada aproximadamente NW–SE, que não é identificada em exposições superficiais e tem uma assinatura magnética distinta daquela dos granitos porfiríticos que formam o embasamento da área.

Outra anomalia linear com direção NNW, claramente destacada no mapa (GT e RMF) (Figura 26.3-A, B), é observada na parte nordeste da área de estudo. Esta anomalia coincide com a presença de lentes de metassedimentos oxidadas, tectonicamente encaixada no granito porfirítico, cujo contato é marcado pela presença de alteração hidrotermal que hospeda zonas mineralizadas com teores de até 8,7 g/t Au (ocorrência Serrinha). Nesse caso, tanto o contexto geológico quanto o padrão de anomalias magnéticas (GT e RMF) são muito semelhantes aos observados na mina Pau-a-Pique, com a presença local de magnetita, ilmenita, hematita e pirrotita.

Algumas anomalias de dipolo de comprimento de onda mais curto são visíveis na porção sudoeste do mapa de RMF (Figura 26.3-A) e correspondem a exposições de sequências meta vulcanossedimentares do Terreno Rio Alegre. A ausência de inversão de polaridades na área indica que os efeitos residuais ou a desmagnetização tiveram uma influência menor.

A inversão de dados de amplitude magnética 3D com recuperação de corpos de suscetibilidade magnética demonstra zonas de contraste entre anomalias positivas e negativas, caracterizadas por protuberâncias e depressões em RMF (Figura 27.3-A), que marcam o contato entre metassedimentos e embasamento granítico. Essas zonas estão ligadas a zonas de cisalhamento magnético de baixa intensidade.

Pode-se observar também que os valores recuperados de suscetibilidade magnética de anomalias positivas frequentemente ocorrem nas bordas das zonas de cisalhamento relacionadas à alteração hidrotermal magnética no contexto e à correspondência das atitudes estruturais com um mergulho para o sudoeste, bem como a presença de dobras associadas ao empurrão SW-NE.

4.2 Levantamento geoeletrico

Os perfis de resistividade em seção transversal (Figura 28.3) e de cargaabilidade (Figura 29.3) foram gerados a partir do levantamento de polarização induzida (IP) realizado na parte norte da área, atingindo profundidades de aproximadamente 350 m.

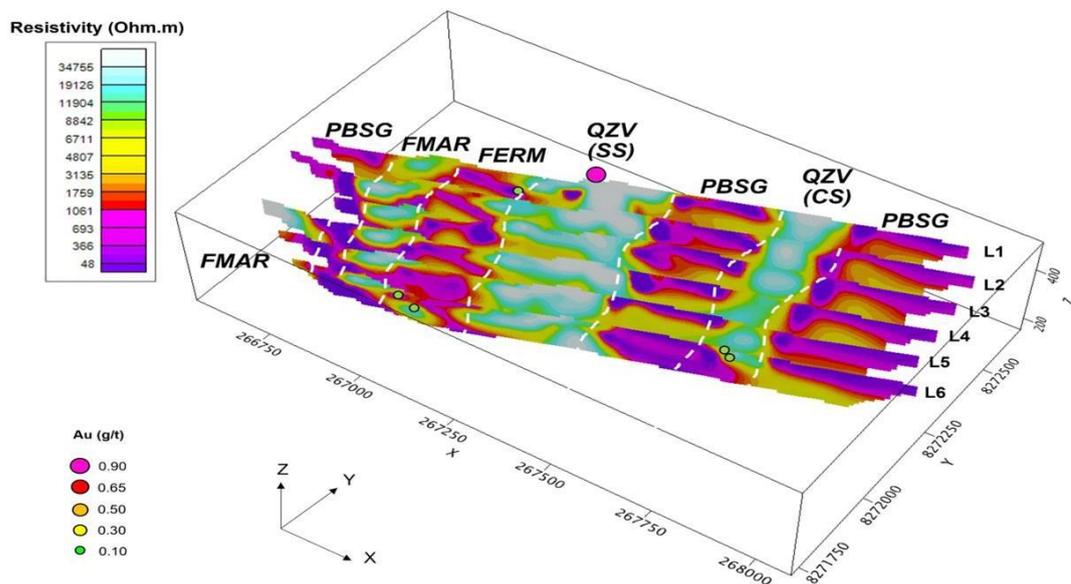


Figura 28.3 – Visão 3D dos perfis de resistividade geoeletrica, correlacionados com anomalias geoquímicas na superfície. Linhas tracejadas brancas destacam os contatos das unidades mapeadas em campo. FMAR = metarenito feldspático; PBSG = sieno-granito biotítico porfirítico; FERM = metarenito ferruginoso; QZV (SS) = veio de quartzo (Sistema Serrinha) e QZV (CS) = veio de quartzo (Sistema Cunha).

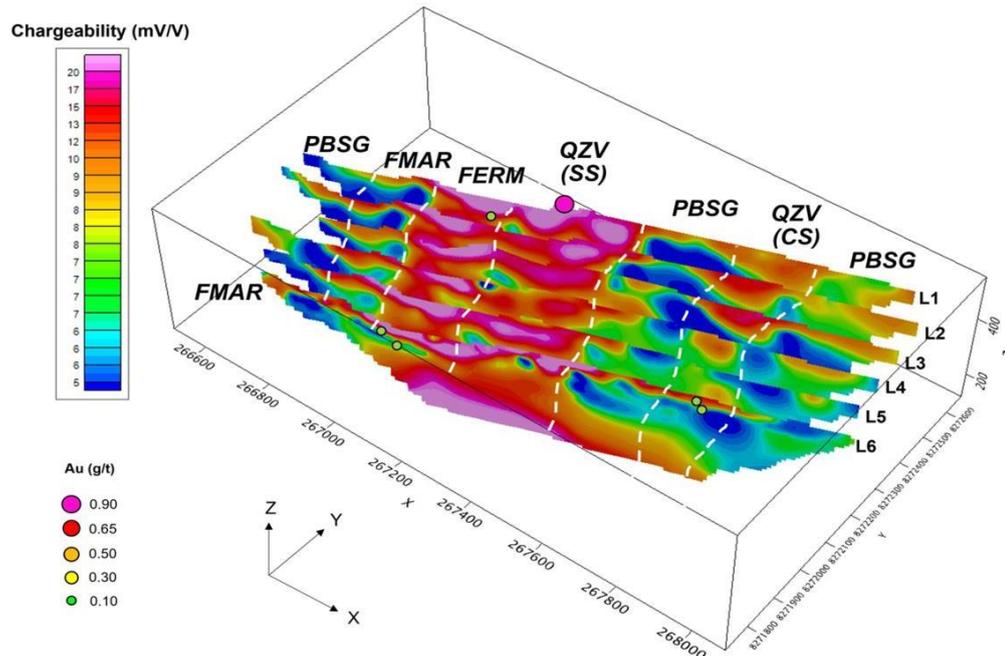


Figura 29.3 – Visualização 3D das linhas de aquisição de cargabilidade geolétrica, associadas a anomalias geoquímicas na superfície. Linhas tracejadas brancas destacam os contatos das unidades mapeadas em campo. FMAR = metarenito feldspático; PBSG = sieno-granito biotítico porfirítico; FERM = metarenito ferruginoso; QZV (SS) = veio de quartzo (sistema Serrinha) e QZV (CS) = veio de quartzo (sistema Cunha).

4.2.1 Resistividade

Como ilustrado na Figura 28.3, a resistividade apresenta uma faixa de valores entre 178 e 64.426 ohm.m, abrangendo regiões de alta e baixa resistividade elétrica. Os corpos entre essas regiões são abruptos e subverticais, com orientação NNW–SSE. Ao correlacionar as seções de resistividade com o mapa geológico (Figura 21.3), observa-se que as áreas com resistividade aparente mais baixa (<16.240 ohm.m) estão associadas principalmente ao granito porfirítico ou a metassedimentos hidrotermalmente alterados, onde a alteração é marcada pela presença frequente de óxidos de ferro (metarenito ferruginoso com magnetita e hematita). Já as zonas de maior resistividade elétrica (>16.240 ohm.m) estão ligadas a exposições de metasedimentos do Grupo Aguapeí, representados por metarenitos de quartzo-feldspato, que também apresentam forte alteração hidrotermal caracterizada por enxames de veios de quartzo. Essas regiões contêm as maiores concentrações de ouro na área.

Nas seções da Figura 28.3 e Figura 30.3-B, observa-se uma zona de alta resistividade com espessura de aproximadamente 100 m na porção oriental da área, com valores de resistividade variando de 16.240 a 24.271 ohm.m (Figura 30.3-B). Essa zona de alta

resistividade está associada à presença de metarenitos e milonitos (zona de contato com o embasamento), com veios de quartzo + sulfetos oxidados + especularita e disseminação de magnetita na matriz de sericita da ocorrência Cunha. A região entre 800 e 1100 m, com uma elevação média de 350 m, apresenta valores de resistividade elevados de até 64.426 ohm.m. Esses valores podem representar potenciais continuções e/ou influências em profundidade para a camada de metassedimentos do Sistema Cunha, bem como uma porção do embasamento granítico com alteração hidrotermal (*i.e.*, silicificação).

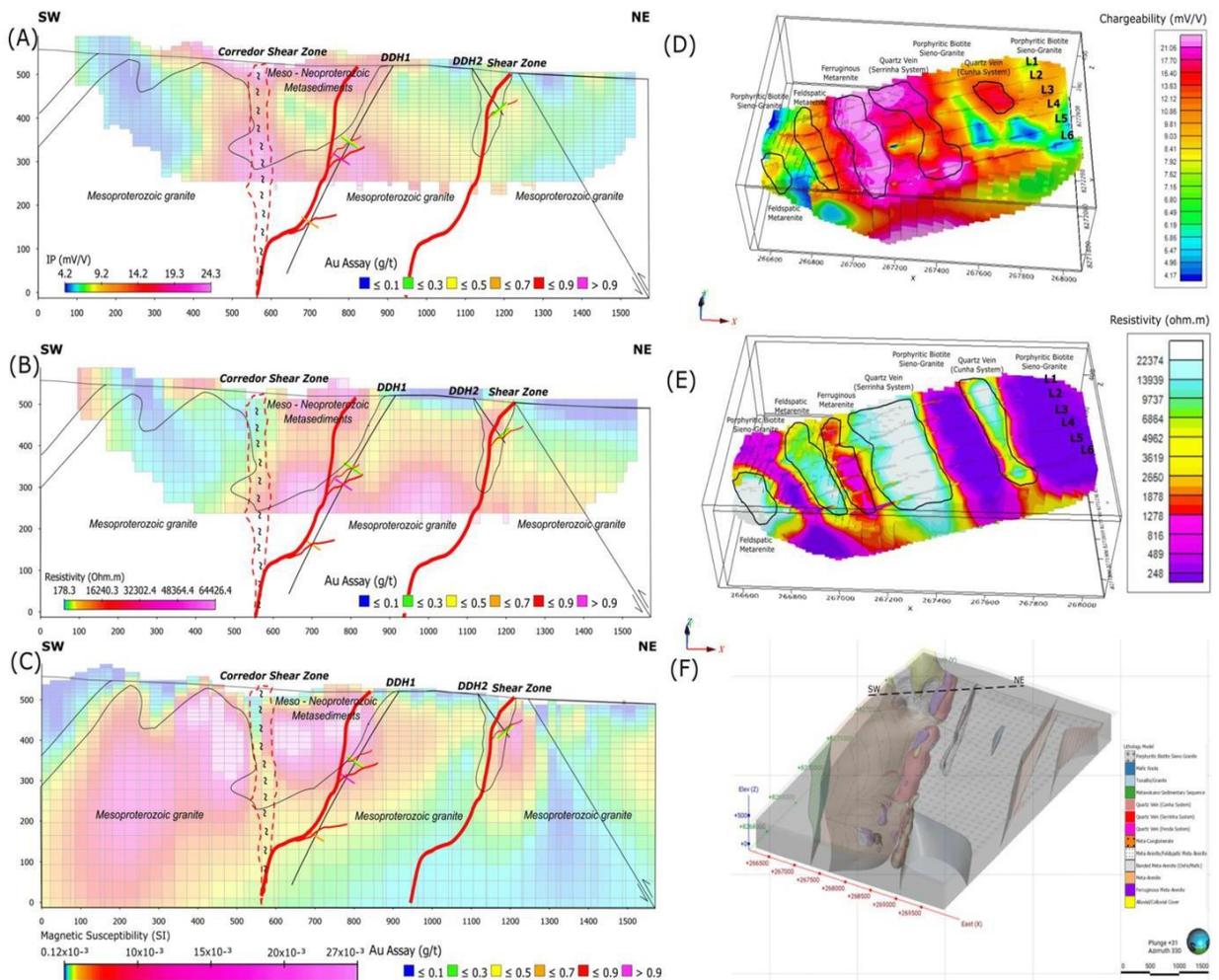


Figura 30.3 – Modelo interpretativo geofísico-geológico (geoeletrico-magnético) para depósitos de ouro na AGGP. (A) Seções invertidas de carga e (B) resistividade da linha 5. (C) Seção vertical no modelo 3D da MVI (inversão do vetor magnético) ao longo da linha 5 (IP). (D, E) Produtos *VOXEL* 3D dos dados IP (cargabilidade e resistividade, respectivamente). (F) Modelo geológico 3D. Nas linhas tracejadas mais finas (A–C), interpretação geológica das seções. DDH = furo de sondagem a diamante; L1 = linha 1; L2 = linha 2; L3 = linha 3; L4 = linha 4; L5 = linha 5 e L6 = linha 6.

Na região entre 550 e 800 m, com elevações médias de até 400 m, os valores variam entre 16.240 e 64.426 ohm.m, associados ao Sistema Serrinha, que é definido por metassedimentos (metarenitos/metaconglomerados), com sulfetos disseminados em veios de quartzo oxidado, às vezes como *boxworks* associados a especularita + magnetita. Observa-se que estruturas de falhas e zonas de cisalhamento estão presentes entre 500 e 600 m e 1250 m (Figura 30.3), respectivamente. Essas estruturas não são aparentes na superfície, mas podem ser correlacionadas com zonas de baixa resistividade próximas à resistividade intermediária (*i.e.*, granitos porfíricos) e alta resistividade (*i.e.*, metasedimentos).

4.2.2 Cargabilidade

Os altos valores de polarizabilidade (>18 mV/V) obtidos pelo método de polarização induzida foram restritos e localizados apenas em certos setores (Figura 29.3 e Figura 30.3-A). Isso é corroborado por anomalias geoquímicas em rochas com teores de Au na superfície (*e.g.*, ao longo das linhas) e em furos de sondagem.

Os valores máximos não excederam 24 mV/V, sendo a maioria concentrada em duas áreas ao longo das seções: perto da ocorrência de Serrinha (metassedimento adjacente ao contato com o embasamento) e ao longo do “conduto” da possível extensão da zona de cisalhamento do corredor. A resposta situa-se entre 350 e 900 m, iniciando sua anomalia da superfície até 480 m (Figura 30.3-A). Além disso, entre 400 e 250 m (eixo Z), a anomalia apresenta um aspecto afunilado, aparentemente seguindo a morfologia das estruturas subverticais. No eixo X, a aproximadamente 1200 m, foi observada uma polarizabilidade de cerca de 10 mV/V, com uma profundidade estimada de 100 m. Essa observação corrobora a área mapeada, onde respostas polarizáveis de metasedimentos com pirita associada, dispostas na ocorrência de Cunha, são registradas.

Além disso, na região leste adjacente à ocorrência de Cunha, aproximadamente 1250 m (eixo X), observa-se uma característica estrutural de uma falha mapeada dentro do contexto do embasamento granítico. Todas as linhas executadas, assim como a L5 em questão, foram adquiridas de forma ortogonal em relação aos sistemas-alvo (Figura 28.3 e Figura 29.3), e as anomalias polarizáveis estavam restritas a sistemas de veios de quartzo com sulfetos disseminados. Anomalias também foram identificadas na possível extensão do contexto da zona de cisalhamento. Embora a rocha hospedeira também contenha mineralização traço de Au ($<0,2$

g/t) e indícios de alterações hidrotermais, incluindo sulfetação, não foram detectadas assinaturas anômalas nesses setores.

5. Discussão

As características metalogenéticas associadas aos depósitos do alvo ABP e parte da Província Aurífera do Alto Guaporé indicam que esses depósitos ocorrem predominantemente em zonas de falha que se desenvolvem ao longo dos contatos entre rochas metamórficas e granitos (conforme ilustrado nas Figuras 26.3, 27.3 e 30.3-C). As regiões mais propensas a depósitos de ouro abrangem a extensão da zona de cisalhamento do corredor, especificamente durante a fase D3 (transpressional) em planos de falha NE e nas interseções de falhas com diferentes orientações.

A partir da inversão dos dados magnéticos 3D com recuperação do vetor de magnetização, podem ser observadas zonas contrastantes entre anomalias positivas e negativas, caracterizadas por saliências e depressões que marcam o contato entre metassedimentos e embasamento granítico, associadas a zonas magnéticas baixas. Essas áreas são altamente favoráveis para a identificação de estruturas de cisalhamento profundas que possivelmente favoreceram a percolação de fluidos mineralizantes na região (veja a Figura 30.3-C). O granito da Suíte Intrusiva de Pindaituba apresenta baixa intensidade magnética, enquanto as rochas metamórficas (metassedimentos) mostram anomalias magnéticas altas (presença de óxidos de ferro como magnetita e hematita) em meio a um campo de intensidade variável. Além disso, é importante notar que os valores de suscetibilidade magnética recuperados de anomalias positivas frequentemente ocorrem nas bordas das zonas de cisalhamento relacionadas à alteração hidrotermal magnética (hematitização e sericitização), correspondendo a atitudes estruturais inclinadas para o sudoeste, bem como à presença de dobras associadas ao empurrão SW–NE.

5.1. Modelo Prospectivo Geológico-Geofísico para Depósitos de Ouro da Província Aurífera Alto Guaporé

O modelo proposto para os depósitos de ouro orogênicos dentro do contexto da AGGP refere-se às configurações tectono-estruturais sugeridas por Groves, D.I.; Santosh, M.; Zhang,

L. (2020), onde a mineralização está alojada em corredores estruturais crustais de grande escala e/ou zonas de falha/cisalhamento cortadas por falhas de acomodação; anticlinais relacionadas a empurrões; contatos irregulares nas margens de granitos falhados; e arquiteturas de pontos triplos-quádruplos em intrusões graníticas. Em termos de geofísica, as características litológicas-estruturais e de minério foram utilizadas como informações a priori para melhorar a correlação com as características estruturais do contexto. Além disso, a interação entre os métodos magnéticos e geoeletricos serviu como um mecanismo para prever as posições e/ou regiões mineralizadas.

Subsequentemente, um modelo interpretativo de prospecção de ouro foi construído com base nas assinaturas geofísicas e geoquímicas da área, visando identificar os corpos mineralizados. Considerando os atributos geológicos e geofísicos da linha de exploração “5” do alvo ABP, que serve como um caso representativo dentro do contexto em discussão, os parâmetros geológico-geofísicos prospectivos estão resumidos nas Figuras 30.3 e 31.3.

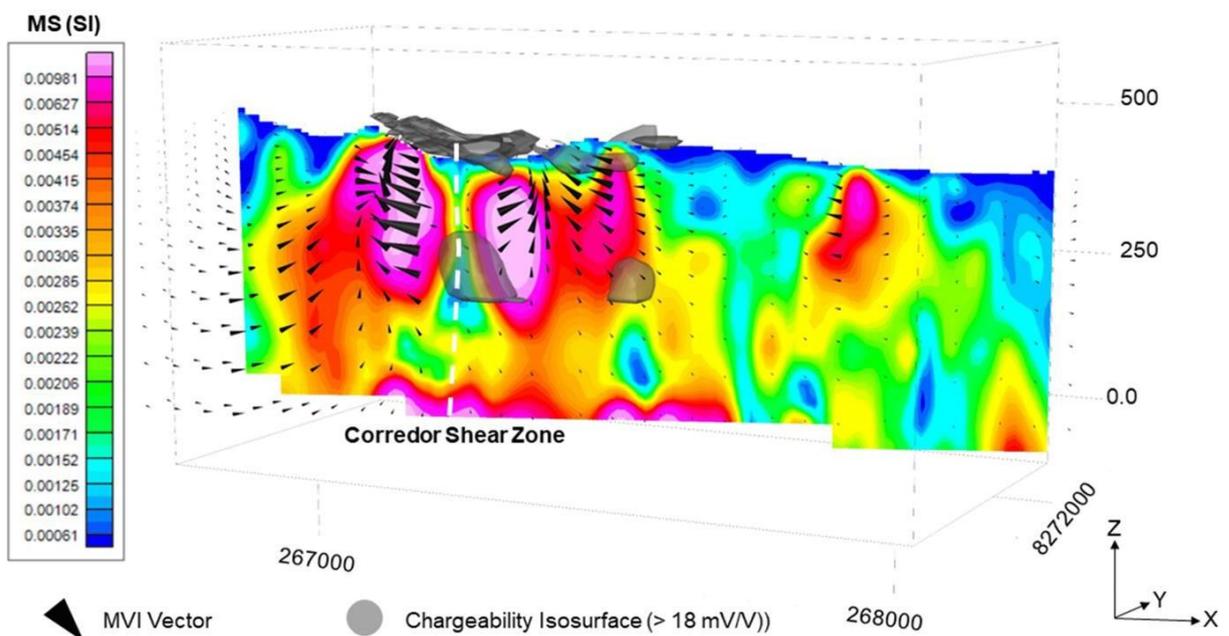


Figura 31.3 – Correlação dos resultados magnéticos e geoeletricos na linha 5, com a inversão do vetor magnético da isosuperfície, sobreposta pela isosuperfície de cargabilidade (>18 mV/V). MS = Susceptibilidade Magnética e MVI = Inversão do Vetor Magnético.

Os resultados da inversão do vetor de magnetização (MVI) na região (Figuras 30.3-C e 31.3) indicam alto grau de relevância. Por meio da correlação com os dados elétricos (resistividade e polarizabilidade) e geológicos, determinou-se que é um importante indicador

prospectivo na AGGP. Primeiramente, observa-se que a baixa assinatura magnética da zona de hidrotermal silicificada (*i.e.*, entre 500 a 600 m na seção 2D) corresponde à zona de cisalhamento do corredor e se comporta de maneira semelhante a vetores em uma barra magnética, com vetores de indução magnética em direções opostas emanando da zona de baixa intensidade magnética, conforme detectado por Mendes, T.L.; et. al., (2024). Em segundo lugar, os valores de resistividade elétrica delineiam os corpos de metassedimento contidos no granito com notável precisão, facilitando a identificação de potenciais zonas de contato milonítico. Além disso, a superfície de isovalor de cargabilidade gerada (Figura 31.3) indica que o sistema mineralizador é contínuo, estendendo-se tanto ao longo da zona de cisalhamento quanto nas bordas dos corpos magnéticos associados ao contato de metassedimentos (*i.e.*, oxidado) com o granito do embasamento. Isso é corroborado pelas concentrações de Au evidenciadas nas Figuras 30.3A–C.

Em resumo, os resultados da inversão magnetométrica e geolétrica sugerem uma boa correlação entre valores polarizáveis, resistivos e magnéticos baixos com o potencial de mineralização das rochas na AGGP.

5.2 Características Geológicas 3D

Na visualização 3D (Figura 30.3-F) observam-se os 3 sistemas mineralizantes previamente descritos no item 2.2, bem como a disposição dos sistemas de falhas entre os contatos do metassedimento com o embasamento granítico, onde as falhas que controlam o minério denotam características de superfícies subverticais ao longo de seu strike NNW-SSE. Enquanto, na porção noroeste exibem-se um sistema de dobras nos metassedimentos, em formato de “pé de galinha”, associado ao fechamento da Sinclinal do Caldeirão em convergência com a zona de cisalhamento corredor (*i.e.* alimentador principal das mineralizações de todo o contexto). O modelo foi gerado utilizando dados estruturais de superfície, bem como, os dados do mapeamento geológico-hidrotermal do contexto, dentro da rotina do *Leapfrog Geo*, versão 2023.1.1, da *Seequent (Bentley Systems)*.

6. Conclusões

Os avanços observados neste estudo em escala distrital na Província de Ouro do Alto Guaporé (AGGP) resultaram de uma convergência entre desenvolvimentos técnicos e científicos e estudos anteriores. Nesse contexto, é possível selecionar perspectivas potenciais com base na experiência prática de longo prazo e em escalas mais regionais, apoiando a aplicação de ferramentas exploratórias. Dada a arquitetura estrutural dos depósitos e minas conhecidos na província, foi escolhido um alvo para aplicação geofísica detalhada, com o objetivo de investigar possíveis continuidades (por exemplo, direção e profundidade) da mineralização em zonas de cisalhamento próximas aos contatos entre o granito da Suíte Intrusiva Pindaituba e os metassedimentos do Grupo Aguapeí. O estabelecimento e a aplicação de um modelo geológico–geofísico prospectivo pode contribuir como um guia para futuras pesquisas em exploração na Província de Ouro do Alto Guaporé. As seguintes conclusões foram extraídas deste estudo:

Os métodos e ideais prospectivos desenvolvidos fazem parte de métodos tradicionais de prospecção superficial e relativamente profunda. Em contraste com a prospecção de ouro na AGGP, que utiliza principalmente técnicas para identificar anomalias magnéticas e mapear estruturas mineralizadas, o escopo em escala distrital deste estudo permitiu delinear os *footprints* das anomalias polarizáveis e resistivas, bem como suas distinções nas propriedades magnéticas. Essas diferenças são determinadas por anomalias magnéticas baixas (*e.g.*, zonas silicificadas), em comparação com zonas mineralizadas de ouro com a presença de magnetita hidrotermal, como é o caso de outros alvos e/ou depósitos na região da AGGP. Além disso, essa abordagem possibilitou o mapeamento de potenciais continuidades em sistemas de zonas de falha controladoras de minério em áreas profundas e próximas à superfície.

Os depósitos de ouro na AGGP são controlados por falhas regionais de grande escala e zonas de cisalhamento associadas ao contato entre rochas metassedimentares e um granito de fundo. As zonas de minério na área do alvo ABP são atribuídas principalmente a zonas deformadas associadas a milonitos e/ou xistos em estruturas secundárias ao alimentador principal. As falhas que hospedam o minério se desenvolveram ao longo das interfaces de contato entre rochas metassedimentares Mesoproterozoicas e granitos Mesoproterozoicos. Essas apresentam um modelo metalogenético subvertical que é paralelo à estrutura regional, com uma direção preferencial de N20-50W. Este modelo oferece uma premissa técnica promissora, especialmente para alvos na região sul da província.

Os *footprints* indicados no modelo integrado de prospecção geológica–geofísica incluem um modelo metalogenético subvertical, zonas magnéticas baixas (condutores principais), baixa resistividade e alta cargabilidade em metassedimentos e zonas de contato.

A exploração geofísica de depósitos de ouro na área-alvo demonstrou a viabilidade de caracterizar e identificar *footprints* metalogenéticos e zonas mineralizadas a diferentes profundidades entre 100 e 350 m, um achado que foi posteriormente validado por meio de perfurações.

Referências Bibliográficas

ADETUNJI, A.Q.; LAUNAY, G.; FERGUSON, I.J.; SIMMONS, J.M.; MA, C.; AYER, J.; LAFRANCE, B. Crustal conductivity footprint of the orogenic gold district in the Red Lake greenstone belt, western Superior craton, Canada. **Geology**, v. 51, p. 377–382, 2023.

AISENGART, T.; BARBOSA, D.; PITHAWALA, T.; PEREIRA, J.; PORTO, C.; ANDO, J.L.; RECHAND, M.; JOHNSON, A. High resolution inversion of the magnetization vector in the Pontes e Lacerda area of southwestern Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysics**, v. 38, p. 159–164, 2017.

BAIA, F.H. **Caracterização Litológica e Estrutural da Área “Cava Principal”, Alvo Aurífero Pau-a-Pique, na Faixa Aguapeí, Pontes e Lacerda-MT**. Undergraduate Report, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007. Disponível em: <https://my.seequent.com/products/oasis-montaj/oasis-montaj-2022-1>. Acesso em: 17 set. 2022.

BETTENCOURT, J. S.; LEITE, W. B.; RUIZ, A. S.; MATOS, R.; PAYOLLA, B. L.; TOSDAL, R. M. The Rondonian-San Ignacio Province in the SW Amazonian craton: An overview. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 28–46, 2010.

CEZAR, P.A. **Caracterização Deformacional e Metamórfica do Cinturão Móvel Aguapeí nas Serras do Caramujo e Salto do Aguapeí-SW de Mato Grosso**. Undergraduate Report, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

COLE, K.S.; COLE, R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. I. alternating current characteristics. **J. Chem. Phys.**, v. 9, p. 341–351, 1941.

CORDANI, U.G.; TEIXEIRA, W. Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. In: HATCHER, R.D., Jr.; CARLSON, M.P.; MCBRIDE, J.H.; MARTÍNEZ CATALÁN, J.R. (Eds.). **4-D Framework of Continental Crust: Geological Society of America Memoir 200**. p. 297–320, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236016478_Proterozoic_accretionary_belts_in_the_Amazonian_Craton. Acesso em: 21 jan. 2024.

COSTA NETO, M.C. **Estudo da interação fluido-rocha nos depósitos da Lavrinha, Distrito Aurífero de Pontes e Lacerda-MT.** 1998. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

D'AGRELLA-FILHO, M. S.; TOHVER, E.; SANTOS, J. O. S.; ELMING, S. A.; TRINDADE, R. I. F.; PACCA, I. I. G.; GERALDES, M. C. Direct dating of paleomagnetic results from Precambrian sediments in the Amazon craton: Evidence for Grenvillian emplacement of exotic crust in SE Appalachians of North America. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 267, p. 188–199, 2008.

DON Mario Reserves/Resources. 2020. Disponível em: <https://www.orvana.com/English/operations/don-mario-district/reserves-resources/default.aspx>. Acesso em: 7 jun. 2023.

DOYLE, H.A. Geophysical exploration for gold - A review. **Geophysics**, v. 55, p. 134–146, 1990.

FERNANDES, C.J.; PULZ, G.M.; KUYUMJIAN, R.M.; PINHO, F.E.C. Diferenças entre os depósitos auríferos do Grupo Aguapeí (estado de Mato Grosso) e os clássicos exemplos de ouro em conglomerados. **Pesquisa em Geociências—UFRGS**, v. 32, p. 10, 2005a.

FERNANDES, C.J.; RUIZ, A.S.; KUYUMJIAN, R.M.; PINHO, F.E. Geologia e controle estrutural dos depósitos de ouro do Grupo Aguapeí—Região da Lavrinha, sudoeste do Cráton Amazônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, p. 13–22, 2005b.

FERNANDES, C.J.; KUYUMJIAN, R.M.; PULZ, G.M.; GERALDES, M.C.; PINHO, F.E.C. Geologia estrutural e idade $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ do depósito Pau a Pique, Faixa Móvel Aguapeí, sudoeste do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, Suplemento S1, p. 13, 2006c.

FERNANDES, C.J.; KUYUMJIAN, R.M.; MOURA, M.A.; BARBOZA, E.d.S.; PULZ, M.G. Tipologia dos veios de quartzo e estudo de inclusões fluidas nos depósitos de ouro da Faixa Móvel Aguapeí—Cráton Amazônico—Mina de São Vicente, Região da Lavrinha e Pau-a-Pique. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, Suplemento S1, p. 59–70, 2006d.

FERNANDES, C.J.; PULZ, G.M.; OLIVEIRA, A.S.; CUNHA, M.C.L.; BARBOSA, E.S.; PINHO, F.E.; QUADROS, A.P. Diferenças químicas e texturais entre os veios de quartzo férteis e estéreis no depósito Pau-a-Pique. **Pesquisa. Em Geociências**, v. 26, p. 91–101, 1999.

FOLHA SD.21-Y-C-II-SINAL ANALÍTICO. Projeto Aerogeofísico Mato Grosso—Área 2. Programa Geologia do Brasil (PGB) Consórcio Lasa Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. Serviço Geológico do Brasil, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10497>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FOLHA SD.21-Y-C-V-SINAL ANALÍTICO. Projeto Aerogeofísico Mato Grosso—Área 2. Programa Geologia do Brasil (PGB) Consórcio Lasa Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. Serviço Geológico do Brasil, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10497>. Acesso em: 12 nov. 2023.

GERALDES, M.C.; NOGUEIRA, C.; VARGAS-MATTOS, G.; MATOS, R.; TEIXEIRA, W.; VALENCIA, V.; RUIZ, J. U–Pb detrital zircon ages from the Aguapeí Group (Brazil): Implications for the geological evolution of the SW border of the Amazonian Craton. **Precambrian Research**, 2014, v. 244, p. 306–316.

GERALDES, M.C.; VAN SCHMUS, W.R.; CONDIE, K.C.; BELL, S.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian craton in Mato Grosso state, Brazil. **Precambrian Res.**, v. 111, p. 91–128, 2001.

GROVES, D.I.; SANTOSH, M. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: Implications for mineral exploration. **Geoscience Frontiers**, n. 6, p. 389–399, 2015.

HALLOFF, P.G.; YAMASHITA, M. The use of the IP method to locate gold-bearing sulfide mineralization. In: FINK, J.B.; STERNBERG, B.K.; MCALISTAR, E.O.; WEIDUWILT, W.G.; WARD, S.H. (Eds.). **Induced polarization: applications and case histories**, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa: SEG or Society of Exploration Geophysicists, p. 227–279, 1990.

LEITE, J.A.D.; SAES, G.S. Geology of the southern Amazon craton in southwestern Mato Grosso, Brazil: A review. **Revista Brasileira de Geociências**, 2000, v. 30, p. 91–94.

LI, Y.; OLDENBURG, D.W. 3D inversion of magnetic data. **Geophysics**, v. 61, p. 32–35, 1996.

LITHERLAND, M.; ANNELLS, R.N.; DARBYSHIRE, D.P.F.; FLETCHER, C.J.N.; HAWKINS, M.P.; KLINCK, B.A.; MITCHELL, W.I.; OCONNOR, E.A.; PITFIELD, P.E.J.; POWER, G. et al. The proterozoic of eastern Bolivia and its relationship to the Andean mobile belt. **Precambrian Research**, v. 43, p. 157–174, 1989.

LITHERLAND, M.; BLOOMFIELD, K. The proterozoic history of eastern Bolivia. **Precambrian Research**, v. 15, p. 157–179, 1981.

LITHERLAND, M. **Mapa Geológico del Área del Proyecto Precámbrico (1976–1983), 1:1,000,000 Map Sheet**. Br. Geol. Surv., 1984. Disponível em: <https://colecoes.igc.usp.br/colecao/mapoteca/bolivia-mapa-geologico-del-area-del-proyecto-precambrico-1976-83>. Acesso em: 12 nov. 2023.

MACKENZIE, D.; CRAW, D. Geophysical signals and exploration for orogenic gold on the low-grade margins of the Otago Schist. In: Proceedings of the **Gold'17 Conference**, Rotorua, New Zealand, 17 August 2017. Extended Abstracts: 62–65. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314113204>.

MATOS, J.B.D.; SCHORSCHER, J.H.D.; GERALDES, M.C.; SOUZA, M.Z.A.D.; RUIZ, A.S. Petrografia, geoquímica e geocronologia das rochas do Orógeno Rio Alegre, Mato Grosso: Um registro de crosta oceânica Mesoproterozoica no SW do Cráton Amazônico. **Rev. Inst. Geociências-USP**, v. 4, p. 75–90, 2004.

MENDES, T. L.; LEÃO-SANTOS, M. H.; TABOSA, L. F. C.; BORGES, W. R.; DOS SANTOS ALVES, C.; DE FREITAS SUITA, M. T. Airborne geophysics, petrophysics, geochemistry and geology of Ni-Cu (Co-Au-PGE) footprints to define exploration targets in mafic-ultramafic rocks. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, p. 104716, 2024.

MENEZES, R.G.; SILVA, L.C.; TAKAHASHI, A.T.; LOPES, L., Jr.; BEZERRA, J.R.L. **Folha Pontes e Lacerda, SD.21-Y-C-II**. CPRM: Brasília, 1993.

MELO, R.P. **Caracterização do metamorfismo da Faixa Móvel Aguapeí e sua relação com a gênese dos depósitos de ouro da região de Pontes e Lacerda-MT**. 2016. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

MELO, R.P.; OLIVEIRA, M.A.F.; GOLDFARB, R.J.; JOHNSON, C.A.; MARSH, E.E.; XAVIER, R.P.; DE OLIVEIRA, L.R.; MORGAN, L.E. Early Neoproterozoic gold deposits of the Alto Guaporé Province, southwestern Amazon Craton, western Brazil. **Economic Geology**, v. 117, p. 127–163, 2022.

MITCHINSON, D.E. **Targeting Archean orogenic gold mineralization using physical properties and integrated geophysical methods**. 2009. Tese (Doutorado em Geociências), University of British Columbia, Vancouver, BC, 2009.

MORAIS, D.S.F. **Estudo da crosta no sudoeste do Cráton Amazônico utilizando técnicas sísmológicas**. 2018. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

NIIRANEN, T.; NYKÄNEN, V.; LAHTI, I. Scalability of the mineral prospectivity modelling—An orogenic gold case study from northern Finland. **Ore Geology Reviews**, v. 109, p. 11–25, 2019.

PINHO, F.E.C.; FYFE, W.S. Isotopic studies of the carbonate veins of the Cabaçal mine, Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 327–330, 1999.

PINHO, F.E.C. **The origin of the Cabacal Cu-Au deposit, Alto Jauru Greenstone Belt, Brazil**. 1996. Tese (Doutorado em Geociências)—The University of Western Ontario, London, ON, 1996.

PINHO, F.E.C.; FYFE, W.S. Isotopic studies of the carbonate veins of the Cabaçal mine, Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 327–330, 1999.

PULZ, G.M.; BARBOSA, E.S.; PINHO, F.E.C.; RONCHI, L.H.; JELINEK, A.R.; DUARTE, L.D.C. Inclusiones fluidas en venas auríferas del yacimiento Pau-a-Pique, suroeste del craton Amazónico, Brasil. **Boletín De La Soc. Española De Mineral.**, v. 26, p. 79–92, 2003.

RIBEIRO, V.B.; MANTOVANI, M.S.M.; LOURO, V.H.A. Geophysical study of the Sertãozinho, Rio Aguapeí and Nova anomalies (SW of Mato Grosso, Brasil). In: **Proceedings of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGf)**, Rio de Janeiro, 26–29 August 2013.

RIZZOTTO, G.J.; HARTMANN, L.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N. Tectonic evolution of the southern margin of the Amazonian craton in the late Mesoproterozoic based on field relationships and zircon U-Pb geochronology. **Ann. Braz. Acad. Sci.**, v. 86, p. 57–84, 2014.

RIZZOTTO, G.J.; SANTOS, J.O.S.; HARTMANN, L.A.; TOHVER, E.; PIMENTEL, M.M.; MCNAUGHTON, N.J. The Mesoproterozoic Guaporé suture in the SW Amazonian Craton: Geotectonic implications based on field geology, zircon geochronology and Nd–Sr isotope geochemistry. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 271–295, 2013.

RIZZOTTO, G.J. **Petrologia e Geotectônica do Grupo Nova Brasilândia, Rondônia**. Master's Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

ROSHANRAVAN, B.; KREUZER, O.P.; BUCKINGHAM, A.; KEYKHAY-HOSSEINPOOR, M.; KEYS, E. Mineral potential modelling of orogenic gold systems in the granites-tanami Orogen, Northern Territory, Australia: A multi-technique approach. **Ore Geology Reviews**, v. 152, p. 105-224, 2023.

RUIZ, A.S. **Evolução geológica do sudoeste do Cráton Amazônico Região Limítrofe Brasil Bolívia-Mato Grosso**. 2005. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

RUIZ, A.S.; SIMÕES, L.S.A.; ARAUJO, L.M.B.d.; MATOS, J.B.d.; SOUZA, M.Z.A. Cinturão orogênico Aguapeí (1025-900Ma): Um exemplo de Faixa Móvel Intracontinental no SW do Cráton Amazônico. **Anais do XI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos**, p. 116–118, 2007.

SAES, G.S. **Evolução tectônica e paleogeográfica do aulacógeno Aguapeí (1.2–1.0 GA) e dos terrenos do seu embasamento na porção sul do Cráton Amazônico**. 1999. Tese (Doutorado em Geociências)—Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SAES, G.S.; LEITE, J.A.D. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Aguapeí, Proterozoico médio na porção meridional do Cráton Amazônico: Mato Grosso e oriente boliviano. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23, p. 31–37, 1993.

SASAKI, Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. **Geophys. Prospect.**, v. 40, p. 453–464, 1992.

SEIGEL, H.O.; JOHNSON, I.; HENNESSEY, J. Different methodology: geophysical aids to gold exploration. **Lead. Edge**, v. 3, p. 32–35, 1984.

SCABORA, J.A.; DUARTE, C.L. A jazida de ouro de São Vicente—município de Nova Lacerda—MT. **A Terra em Revista**, v. 4, p. 32–42, 1998.

SCHOBENHAUS, C.; BELLIZZIA, G. **Geologic map of South America**. 2001. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2542>. Acesso em: 12 nov. 2023.

SONG, M.; XUE, G.; LIU, H.; LI, Y.; HE, C.; WANG, H.; WANG, B.; SONG, Y.; LI, S. A geological geophysical prospecting model for deep-seated gold deposits in the Jiaodong Peninsula, China. **Minerals**, v. 11, p. 1393, 2021.

SOUZA, E.P.; HILDRED, P.R. Contribuição ao estudo da geologia do Grupo Aguapeí, oeste de Mato Grosso. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, Camboriú, Soc. Bras. De Geol. v. 2, p. 813–825, 1980.

TASSINARI, C.G.; MACAMBIRA, M.J.B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, p. 174–182, 1999.

TEIXEIRA, W.; GERALDES, M.C.; MATOS, R.; RUIZ, A.S.; SAES, G.; VARGAS-MATTOS, G. A review of the tectonic evolution of the Sunsás belt, SW Amazonian Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 47–60, 2010.

CAPÍTULO IV

Artigo “Caracterização da Alteração Hidrotermal e Assinatura Petrofísica em Depósitos de Ouro Orogênico: Estudo do alvo Anomalia BP, Província Aurífera Alto Guaporé.”

Resumo:

A alteração hidrotermal em sistemas auríferos orogênicos frequentemente apresenta desafios devido aos contrastes petrofísicos sutis e à baixa concentração de minerais condutores, como pirrotita, tornando essencial a integração de dados geofísicos, geoquímicos e petrofísicos. Este estudo investigou o alvo Serrinha, parte da Anomalia BP, localizado na Província Aurífera Alto Guaporé, sudoeste do Cráton Amazônico, Brasil. A área de estudo é caracterizada pela interação entre um embasamento granítico mesoproterozoico e um pacote metassedimentar siliciclástico meso-neoproterozoico, atravessados por uma falha inversa regional de alto ângulo associada a intensa alteração hidrotermal. As análises incluíram petrografia, geoquímica e propriedades petrofísicas (densidade, susceptibilidade magnética e gamaespectrometria de furos de sondagem) para caracterizar os halos de alteração hidrotermal e vincular a assinatura geofísica às condições de formação da mineralização. O halo distal é dominado pelo processo de epidotização, apresentando uma assembleia mineral composta por plagioclásio (Pl), biotita (Bt), feldspato potássico (Kfs), epídoto (Ep), quartzo (Qtz) e carbonato (Carb). O halo intermediário destaca a alteração de clorita (Chl), muscovita (Ms), quartzo e epídoto, caracterizado pelo aparecimento de mica branca, alteração dos plagioclásios em epídoto e mica branca, além do surgimento de carbonato e óxidos de ferro (Ilm ± Mt). O halo proximal é definido pela alteração fílica, com muscovita, quartzo, epídoto, clorita e ilmenita ± magnetita, onde a relevância do processo de sericitização é evidente, contribuindo para a concentração de ouro (Au) em veios de quartzo e inclusões em porfiroblastos de pirita (Py). Geoquimicamente, os halos apresentam aumento em K₂O, CaO e SiO₂, com correlações positivas de CaO, Rb e Ba com a mineralização aurífera. As propriedades físicas das rochas revelaram densidade entre 2,6 e 2,8 g/cm³, além de baixa susceptibilidade magnética nas zonas de silicificação, fatores que corroboram a interpretação dos dados geofísicos. Os resultados destacam a importância da integração de dados para aprimorar a interpretação de anomalias geofísicas em depósitos auríferos orogênicos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de exploração mineral aplicáveis em contextos tectonicamente similares em escala global.

Palavras-chave: Zoneamento Hidrotermal; Petrofísica; Geoquímica; Footprints;

Abstract

Hydrothermal alteration in orogenic gold systems often presents challenges due to subtle petrophysical contrasts and the low concentration of conductive minerals, such as pyrrhotite, emphasizing the need for the integration of geophysical, geochemical, and petrophysical data. This study investigated the Serrinha target, part of the BP Anomaly, located in the Alto Guaporé Gold Province, southwestern Amazon Craton, Brazil. The study area is characterized by the interaction between a Mesoproterozoic granitic basement and a Meso-Neoproterozoic siliciclastic metasedimentary package, traversed by a high-angle regional reverse fault associated with intense hydrothermal alteration. The analyses included petrography, geochemistry, and petrophysical properties (density, magnetic susceptibility, and downhole gamma spectrometry) to characterize hydrothermal alteration halos and link the geophysical signature to the mineralization conditions. The distal halo is dominated by epidotization, with a mineral assemblage consisting of plagioclase (Pl), biotite (Bt), potassium feldspar (Kfs), epidote (Ep), quartz (Qtz), and carbonate (Carb). The intermediate halo is characterized by

chlorite (Chl), muscovite (Ms), quartz (Qtz), and epidote (Ep), marked by the presence of white mica (Ms), the alteration of plagioclase to epidote and white mica, as well as the appearance of carbonate (Carb) and iron oxides (Ilm ± Mt). The proximal halo is defined by phyllic alteration, with muscovite (Ms), quartz (Qtz), epidote (Ep), chlorite (Chl), and ilmenite (Ilm) ± magnetite (Mt), where sericitization plays a crucial role, contributing to gold (Au) concentration in quartz veins (Qtz) and inclusions in pyrite (Py) porphyroblasts. Geochemically, the halos exhibit increases in K₂O, CaO, and SiO₂, with positive correlations of Ca, Rb, Tl, and Ba with orogenic gold mineralization. The petrophysical properties of the rocks revealed densities ranging from 2.6 to 2.8 g/cm³, along with low magnetic susceptibility in silicified zones, supporting the interpretation of geophysical data. These results highlight the importance of data integration to enhance the interpretation of geophysical anomalies in orogenic gold deposits, contributing to the development of exploration strategies applicable to tectonically similar contexts on a global scale.

Keywords: Orogenic Gold; Alto Guapore Gold Province; Hydrothermal Alteration; Footprints; Petrophysics.

1 Introdução

A grande maioria dos depósitos de ouro orogênico é tipicamente caracterizada por sulfetos disseminados associados a sistemas de veios de quartzo. As estruturas que hospedam os corpos minerais são de segunda a terceira ordem, subsidiárias a estruturas principais de escala crustal, responsáveis por canalizar fluidos metamórficos de fontes crustais profundas para as porções mais rasas onde os depósitos se formam (Goldfarb et al., 2015). Os sistemas de veios minerais geralmente apresentam um halo de alteração hidrotermal resultante de mudanças na composição da rocha hospedeira devido à interação com fluidos aquo-carbônicos de baixa salinidade (Ridley & Diamond, 2000). Halos de alteração bem desenvolvidos são pouco comuns em concentrações do tipo ouro orogênico, em comparação com outras classes de depósitos, pois os fluidos que formam os depósitos estão tipicamente em amplo equilíbrio térmico com os terrenos circundantes, levando à mineralização sob condições de pressão e temperatura próximas às do ambiente metamórfico (Boyle 1961; Goldfarb et al., 1986; Clark et al., 1989; Goldfarb et al., 2005).

Devido ao fato de que esses depósitos se formam em uma ampla gama de profundidades crustais, o estilo dos veios pode variar significativamente, de brechas, veios pequenos e veios tabulares em condições mais rasas e frágeis, até veios dobrados, laminados ou boudinados em zonas dúcteis mais profundas (*e.g.*, Eillu et al., 1999). A assembleia hidrotermal reflete a interação da rocha hospedeira com fluidos aquosos-carbônicos de baixa salinidade (compostos de H₂O, CO₂, H₂S, CH₄ e N₂) (*e.g.*, Böhlke, 1989; Ridley e Diamond, 2000; Goldfarb et al., 2005). Nos depósitos, a extensão do halo hidrotermal e as fases minerais dependem amplamente da natureza da rocha hospedeira (*e.g.*, Böhlke, 1989), bem como das condições metamórficas nas quais o depósito se formou (*e.g.*, Eillu et al., 1999). Segundo a literatura, em depósitos formados sob condições de fácies xisto verde, a alteração hidrotermal é caracterizada

principalmente por de carbonatos e sulfetos, como pirita, pirrotita ou arsenopirita, juntamente com metasomatismo alcalino, que leva à formação de sericita, albita, biotita e/ou clorita como minerais de ganga (*e.g.*, Eillu et al., 1999; Goldfarb et al., 2005). De uma perspectiva geoquímica, as zonas de alteração hidrotermal são caracterizadas pela adição de sílica, que alguns autores argumentam resultar da remobilização (*e.g.*, Goldfarb et al., 2005), e um enriquecimento em K₂O, Na₂O, Rb, S, Sr, Li, Cs, Tl, Ba, Ag, Au, B, Bi, Sb, Te e W (*e.g.*, Kerrich, 1989; Goldfarb et al., 2005; Goldfarb & Groves, 2015), embora isso seja consistente apenas para K₂O, Ag, Au, As, B, Bi, Sb, Te e W (*e.g.*, Goldfarb et al., 2005; Goldfarb & Groves, 2015).

O alvo Anomalia BP (ABP) compreende três alvos de exploração localizados a aproximadamente 6 km ao norte da Mina de Pau-a-Pique, nomeados Cunha, Serrinha e Ferruginoso. É considerado estratégico para a extensão de recursos na região mineradora de Pau-a-Pique.

A estrutura que hospeda o corpo mineral principal da Mina de Pau-a-Pique é uma zona de falha de alto ângulo, com tendência NNW, conhecida como zona de cisalhamento Corredor (*e.g.*, Fernandes et al., 2006a; Melo, 2016; Melo et al., 2022). O corpo mineral está localizado dentro de uma zona milonítica rica em mica, que representa um contato cisalhado e hidrotermalmente alterado entre os metassedimentos arcoseanos da Formação Fortuna (*e.g.*, Saes & Leite, 1993) no *footwall*, e o embasamento ígneo Mesoproterozoico composto de diorito, tonalito e granodiorito no *hangwall* (Melo et al., 2022). O minério é composto por pirita grosseira disseminada ao longo das camadas de mica (*i.e.*, principalmente muscovita, secundariamente biotita) associada a enxames de veios de quartzo laminados (*e.g.*, Pulz et al., 2003; Fernandes et al., 2006a; Melo et al., 2022). Todos esses são cortados por veios de quartzo-albita de formas irregulares contendo carbonato e clorita (Melo et al., 2022). Os minerais de ganga hidrotermal incluem biotita, muscovita, magnetita, albita, clorita, ilmenita, apatita, calcita e rutilo (Melo et al., 2022), e o ouro ocorre principalmente como microinclusões em cristais de pirita, mas também é encontrado como eletrum nos veios de quartzo ou em associação com minerais de ganga.

Semelhante ao depósito Pau-a-Pique, os dois alvos perfurados da anomalia ABP (Cunha e Serrinha) apresentam alteração hidrotermal caracterizada por enxames de veios de quartzo em associação com camadas de mica hidrotermal (muscovita, biotita), onde cristais grossos de pirita, eventualmente contendo ouro, estão disseminados ao longo da zona mineralizada. As outras fases de ganga incluem feldspato alcalino (microclínio e albita), ilmenita, clorita, apatita, rutilo, epídoto e calcita. A forte alteração hidrotermal em ambos os alvos está localizada ao longo do contato cisalhado entre os metassedimentos arcoseanos da Formação Fortuna e o embasamento ígneo, caracterizado localmente por biotita granito da Suíte Pindaituba (*e.g.*,

Geraldes et al., 2001; Ruiz et al., 2005). Zonas hidrotermais também são encontradas em falhas subsidiárias menores à zona cisalhamento principal. O contexto estrutural onde a anomalia ABP está localizada é dado por uma complexa convergência entre a zona de charneira do Sinclinal Caldeirão e a Zona de Cisalhamento Corredor (*e.g.*, Echague et al., 2024).

Embora ainda sejam incomuns, os estudos geofísicos estão sendo cada vez mais reconhecidos como uma ciência valiosa na exploração de depósitos de ouro orogênico (*e.g.*, Groves et al., 2020; Muller et al., 2021). Em escala provincial, a combinação de dados sísmicos, magnetotelúricos (MT) e gravimétricos permite o mapeamento 2D a 3D da complexa geometria estrutural tipicamente de margens de crátons fragmentados, além da identificação de zonas de falha permeáveis onde fluidos portadores de ouro migram para cima através da crosta (Groves et al., 2020). Perfis de MT profundos podem detectar condutores que representam a assinatura de condutividade de rochas alteradas hidrotermalmente e estruturas associadas a sistemas de ouro orogênico, revelando a conexão entre mineralização de ouro superficial e sua fonte crustal mais profunda (*e.g.*, Adetunji et al., 2023). Em escala de distrito a depósito,

anomalias condutivas de MT rasas podem ajudar no mapeamento da arquitetura geológica, auxiliando na estimativa da extensão vertical de corpos de minério de ouro conhecidos abaixo das porções sondadas (*e.g.*, Qingyun Di et al., 2021). Além disso, a combinação de levantamentos Helicopter Transient Electromagnetic (HTEM) e magnéticos tem se mostrado útil na exploração de depósitos de ouro orogênico ocultos (*e.g.*, Muller et al., 2021).

Ainda que avanços significativos tenham sido feitos nos últimos anos, a aplicação de métodos geofísicos na exploração em escala de distrito e depósito ainda apresenta desafios. A maioria dos sistemas de ouro orogênico conhecidos tipicamente exhibe contrastes petrofísicos sutis entre os veios mineralizados e suas rochas hospedeiras (*e.g.*, Muller et al., 2021). Além disso, muitas vezes carecem de condutores fortes, uma vez que a alteração hidrotermal geralmente contém baixas quantidades de sulfetos disseminados (como arsenopirita e pirita), que são maus condutores, e raramente apresentam quantidades significativas de minerais altamente condutores, como pirrotita (Muller et al., 2021). Isso pode ser inicialmente decepcionante para as equipes de exploração que analisam os dados obtidos das pesquisas. No entanto, quando os levantamentos geofísicos são integrados com estudos petrográficos, geoquímicos e petrofísicos, a interpretação dos dados geofísicos pode ser significativamente aprimorada. Os resultados obtidos podem ser melhor compreendidos em termos de composição mineralógica e química ao vincular a assinatura geofísica com as características da alteração hidrotermal.

Neste estudo apresentamos os resultados de investigações realizadas sobre a alteração hidrotermal de um dos alvos da Anomalia ABP, denominado Serrinha. Essas investigações incluíram petrografia, geoquímica e análises das características petrofísicas - como densidade, susceptibilidade magnética e gamaespectrometria de furos de sondagem de rochas com forte alteração hidrotermal. Os resultados podem ser aplicados para melhorar a interpretação dos dados geofísicos obtidos em levantamentos de superfície e ressaltam a importância da integração de dados geoquímicos e petrofísicos para a adequada caracterização e interpretação de anomalias geofísicas, aumentando o sucesso dos métodos geofísicos aplicados à exploração de depósitos de ouro orogênico em escala de distrito a depósito.

2 Configurações Geológicas e Geofísicas

2.1 *Província Aurífera Alto Guaporé (AGGP)*

A província faz parte da porção SW do Estado do Mato Grosso, próximo à fronteira Brasil-Bolívia. A AGGP corresponde à porção fértil no extremo sudeste do Cinturão Aguapeí, posicionado ao longo da margem sudoeste do Cráton Amazônico, no contexto geotectônico da orogenia/província Sunsás-Aguapeí (1,25–1,00 Ga).

O Cinturão Aguapeí é um dos três cinturões de dobramento-empurrão formados durante a Orogenia Sunsás-Aguapeí (Litherland and Bloomfield, 1981; Litherland et al., 1989; Teixeira et al., 2010). A orogenia/província Sunsás-Aguapeí (1100-950 Ma) é a fase mais jovem de deformação do tipo cordilheira ao longo das margens do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira, 1999; Teixeira et al., 2010). Ela representa a última fase de deformação ao longo da margem do cráton durante a transição do supercontinente Colúmbia para o supercontinente Rodínia (Rizzotto et al., 2014) (Figura 32.4). Este cinturão está confinado entre a margem leste do Bloco Paraguá e a margem oeste do Terreno Jauru, pertencente à Província Rondoniana-San Ignacio (Leite e Saes, 2000; Teixeira et al., 2010).

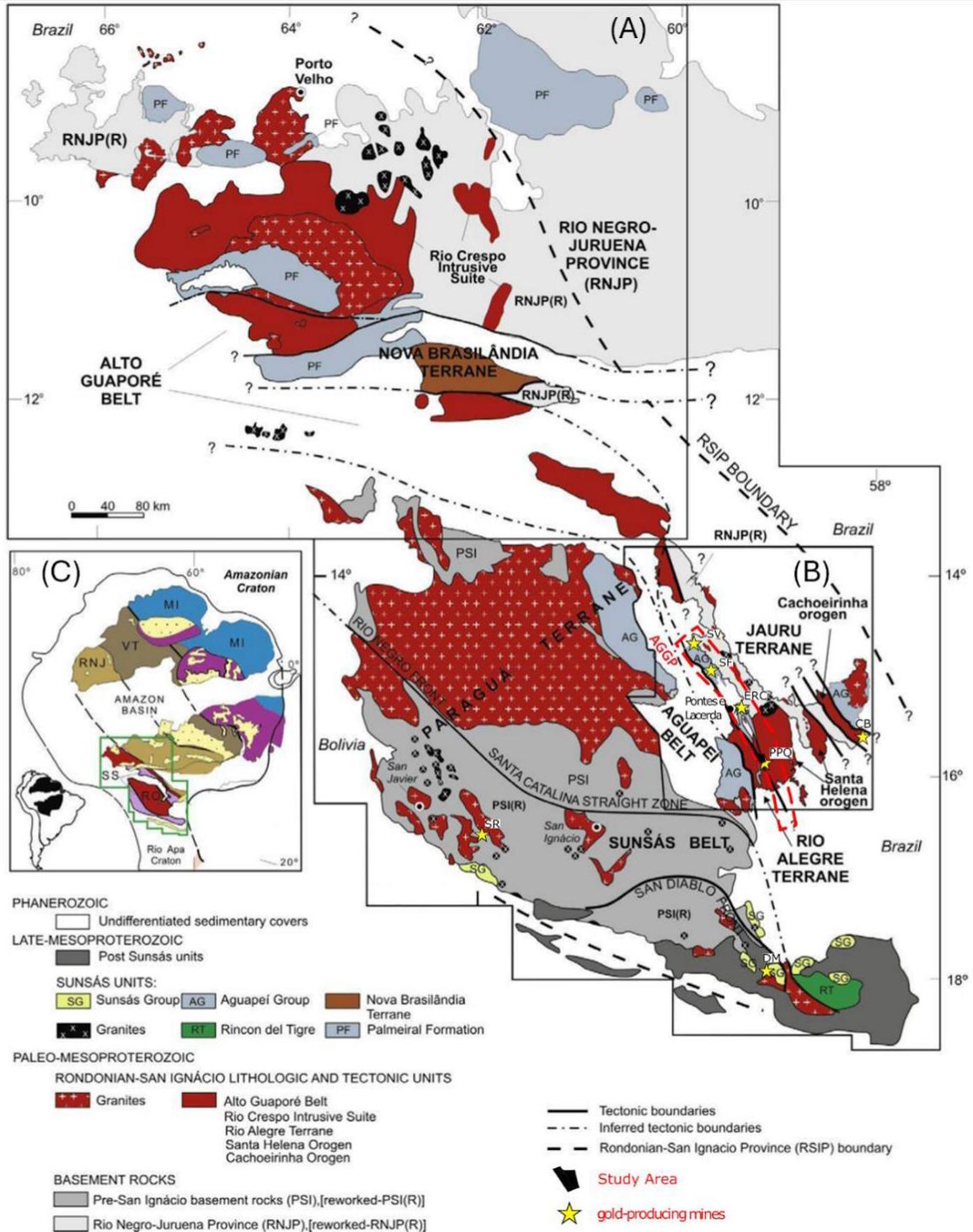


Figura 32.4 – (A) e (B) Mapa simplificado do SW Cráton Amazônico mostrando os limites aproximados das principais províncias, orógenos, terrenos e cinturões, elementos tectônicos e unidades litológicas. (C) Principais províncias geocronológicas do Cráton Amazônico. MI, Província Maroni-Itacaiunas; VT, Província Ventuari-Tapajós; RNJ, Província Rio Negro-Juruena; RO, Província Rondoniana-San Ignácio; SS, Província Sunsás-Aguapeí. (Extraído e modificado de Bettencourt et al., 2010). O polígono vermelho tracejado delimita os limites aproximados do cinturão aurífero do Alto Guaporé no Brasil. SV = mina São Vicente; SF = mina São Francisco; ERC = Complexo Ernesto; PPQ = mina Pau-a-Pique; CB = mina Cabaçal; DM = mina Dom Mario e SR = Província aurífera San Ramón.

O Cinturão Aguapeí (Figura 33.4) é formado por uma zona estreita (~35km) e longa (~500 km) de rochas metassedimentares dobradas e metamorfizadas em baixo grau (Grupo Aguapeí), dispostas segundo a direção NNW-SSE (Saes, 1999). As idades da deformação das rochas do Grupo Aguapeí são definidas entre 960 e 910 Ma, baseadas em idades K/Ar e Ar/Ar em micas recristalizadas nos milonitos da região (Geraldés et al., 1997; Fernandes et al., 2006). O evento metamórfico responsável pela formação do Cinturão Aguapeí tem sido considerado como o último pulso da orogenia Sunsás, responsável pela deformação e metamorfismo em baixo grau dos sedimentos e rochas do embasamento. (Litherland et al., 1986; Geraldés et al., 2001; Teixeira et al., 2010).

O embasamento das rochas do Grupo Aguapeí é constituído pelas rochas do Terreno Rio Alegre (*e.g.* porção oeste), cinturão Mesoproterozoico (1510–1400 Ma) relativamente estreito de rochas vulcânicas máficas e ultramáficas, rochas sedimentares químicas, além de rochas intrusivas máficas a félsicas. A Formação Santa Isabel (zona intermediária), é composta por rochas piroclásticas intermediárias e ácidas geradas em ambiente de arco de ilhas e a Formação São Fabiano (topo), é constituída por rochas metassedimentares, cujas composições químicas, sugerem derivação a partir das rochas vulcânicas subjacentes (Matos et al., 2004). À leste, são expostas as rochas do Terreno Jauru (1780 Ma -1420 Ma), associação de rochas ígneas e metamórficas que incluem: (a) rochas paleoproterozoicas, representadas por sequências metavulcanossedimentares (Grupo Alto Jauru), complexos metamórficos de alto grau (Complexo Metamórfico Alto Guaporé), suítes máficas e ultramáficas (Suíte Intrusiva Figueira Branca) e rochas intrusivas félsicas (Tonalito Cabaçal) e; (b) rochas ígneas félsicas mesoproterozoicas representadas por granitos a granodioritos peraluminosos, subalcalinos a cálcio-alcalinos agrupadas em suítes intrusivas (Rio Branco, Pindaituba, Santa Helena e Água Clara, interpretadas como orógeno Santa Helena e Alvorada e Santa Cruz interpretadas como orógeno Cachoeirinha) (Bettencourt et al., 2010).

O Grupo Aguapeí é formado por uma espessa sequência de rochas metaasedimentares siliciclásticas, que variam de não metamorfizadas a metamorfizadas em baixo grau (Souza & Hildred, 1980; Saes & Leite, 1993; Menezes et al., 1993). O grupo é composto pelas formações Fortuna, Vale da Promissão e Morro Cristalina, distribuídas nessa ordem da base para o topo. A Formação Fortuna, apresenta um espesso pacote de conglomerados oligomíticos e quartzo-arenitos, intercalados com metasiltitos/metapelitos, depositados em um ambiente continental à marinho raso (fase transgressiva inicial). A Formação Vale da Promissão exibe um contato gradacional com a Formação Fortuna, é formada predominantemente por metapsamitos, metapelitos e raros metarenitos, depositadas em ambiente marinho profundo, na fase de progradação marinha. A Formação Morro Cristalina é composta por arenitos e siltitos

predominantemente fluviais, formados na fase de regressão marinha final (Saes & Leite, 1993; Geraldés et al., 1997; Tohver et al., 2004; Teixeira et al., 2010). A idade de deposição das rochas do Grupo Aguapeí é estimada entre 1265 Ma (Geraldés et al., 2014; zircão detrítico) e 1149 ± 7 Ma (D'Agrella-Filho et al., 2008; datação em xenotímio diagenético).

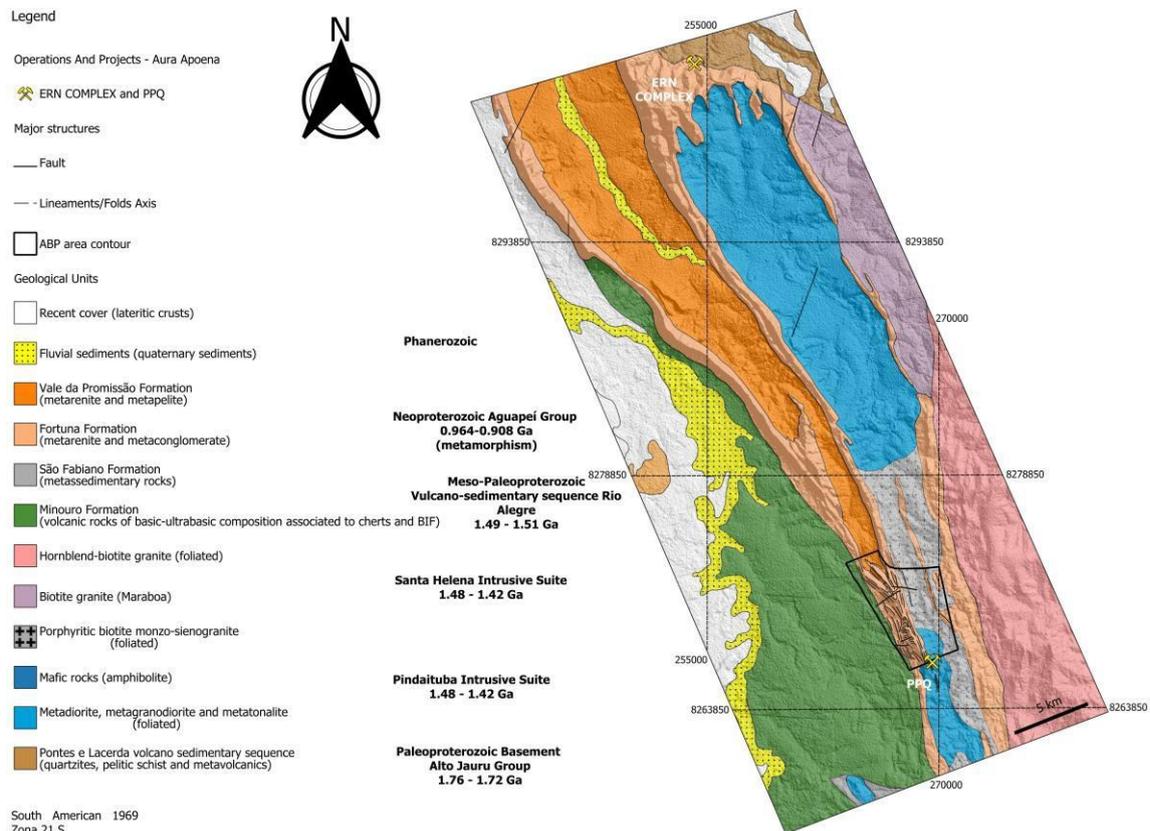


Figura 33.4 – Mapa geológico da porção central da Província Aurífera Aguapeí (AGGP). Destaque para o contorno da área alvo ABP ao SW. ERN = Ernesto; PPQ = Pau-a-Pique e ABP = Anomalia BP. (Extraído e Modificado de CPRM, 1993).

Na área de estudo, o embasamento do Grupo Aguapeí é dado por granitos e granitoides da Suíte Intrusiva Pindaituba, uma das suítes intrusivas relacionadas ao orógeno Santa Helena (*e.g.*, Bettencourt et al., 2010). Faz parte da Suíte Intrusiva Pindaituba os granitos Maraboa, Guaporé, Santa Elina e o Tonalito Lavrinha (Ruiz, 2005; Bettencourt et al., 2010). Essas rochas são interpretadas como granitóides de arco magmático continental que composicionalmente variam de tonalitos a sienogranitos leucocráticos a mesocráticos (*e.g.*, Bettencourt et al., 2010).

A idade de cristalização (U/Pb) dessas rochas é estimada entre 1465 ± 4 Ma (Gerald et al., 2001) e 1461.6 ± 4 Ma (Melo et al., 2022).

2.2 Assinatura Geofísica Regional

Este reconhecimento regional foi realizado utilizando dados magnéticos e radiométricos aéreos, Projeto Aerogeofísico Mato Grosso-Área 2, fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2008). As linhas de voo foram orientadas segundo N-S, a uma altura nominal de 100m, com espaçamento de 500m. Os dados foram interpolados com o algoritmo “bidirecional” com tamanho de célula de 100m para os dados magnéticos e 69m para os radiométricos.

Configurações Radiométricas

Os mapas ternários representando as composições K, eTh, eU, no formato RGB (vermelho, verde, azul) foram contrastados com a topografia, extraída a partir de um modelo digital de terreno (ALOS PALSAR) com uma resolução espacial de 12,5m x 12,5m.

Para distinguir entre os diferentes domínios, foram examinadas principalmente as variações sutis dentro do espectro total de cores (RGB) (Figura 34.4-F), seguidas da comparação das assinaturas de cada canal individualmente (K, eTh e eU), visando a possível identificação de padrões nas assinaturas (Figuras 34.4C-E) e conforme os intervalos de valores baixos, médios e altos (Tabela 3.4).

Em relação ao hidrotermalismo associado aos domínios, foi analisado o produto do FATOR F foi analisado, ou seja, o enriquecimento de K e eU em relação ao eTh (Ostrovskiy, 1973), com o objetivo de delinear zonas com maior potencial mineralizante dentro desse contexto (Figura 34.4-G).

Tabela 3.4 – Resumo das características do depósito Pau-a-Pique de acordo com autores anteriores e a área da Anomalia ABP.

Variável	Baixo	Médio	Alto
K (%)	0.0 – 0.23	0.24 – 0.67	0.68 – 2.40
eTh (ppm)	0.0 – 6.24	6.25 – 10.20	10.21 – 19.00
eU (ppm)	0.0 – 1.01	1.02 – 2.05	2.06 – 4.10

DOMÍNIO O (Sedimentos Quaternários/Unidades Indiferenciadas/Depósitos Pantanosos e Coberturas Detrito-Lateríticas)

A deposição de sedimentos ricos em K (Figura 34.4-C) e eU (Figura 34.4-D) justifica os teores altos desses elementos observadas ao longo das zonas de aluvião dos córregos, mesmo em regiões distantes dos corpos graníticos. Assim como nas regiões leste e oeste, a diferença pode ser explicada pela deposição de radioelementos erodidos do batólito em áreas externas ao limite do corpo (Ribeiro et al., 2014). Comparativamente, nas porções a sudoeste, próximas aos limites com a Serra de Santa Bárbara (Fm. Morro Cristalina) (*i.e.*, região de relevo escarpado), observam-se altos teores de tório e urânio (Figura 34.4D-E). Esse fato está possivelmente relacionado à ocorrência de depósitos pantanosos ricos em matéria orgânica e coberturas detrito-lateríticas.

DOMÍNIO I (Metassedimentos - Grupo Aguapé)

Na porção oeste do batólito (Domínio I), porção associada a Zona de Cisalhamento Corredor, é possível observar uma região com médias a baixas contagens de eTh e eU (Figura 34.4D-E) e médias a altas contagens de K (Figura 34.4-C), a qual apresenta faixas mais estreitas com direção aproximadamente NW. Essa zona de cisalhamento condicionou a deposição dos radioelementos ao longo da unidade litológica sobre a qual ela se localiza (Formação Fortuna) dando assim o aspecto estriado. Essa litologia faz fronteira ao sul com o Complexo metavulcanossedimentar Rio Alegre, o qual é caracterizado por apresentar baixas contagens de K (Figura 34.4-C) e média a baixa de eTh e eU (Figura 34.4D-E) e à nordeste com o Complexo metavulcanossedimentar Pontes e Lacerda.

DOMÍNIO II (Granitos – Suíte Pindaituba e Batólito Santa Helena – Terreno Jauru)

A avaliação do mapa ternário revela uma dispersão variada dos radioelementos, em contraste com as unidades litológicas adjacentes ao Batólito Santa Helena. Especificamente, destacam-se a presença de contagens significativas de potássio, alinhadas com a elevada abundância de K-feldspatos conforme observado por Geraldtes et al. (2001). O mapa ternário (Figura 34.4-F) revela uma notável disparidade na distribuição dos radioelementos na porção ocidental da intrusão. Nessa área, há um aumento substancial nas contagens de tório e urânio em comparação com o restante do Batólito. Essa diferenciação é evidente não apenas nos mapas individuais de contagem dos radioelementos, mas também no mapa ternário (Ribeiro et al., 2014). Diferentemente da região sul, a porção norte deste corpo exhibe uma faixa com altas

contagens dos três elementos radioativos ao longo de sua borda, estendendo-se em uma área maior no limite sudeste e na lateral oeste do corpo. Na zona norte (*e.g. trend NW*), intrínseca a este corpo e representada por uma coloração vermelho escuro no mapa ternário, são observadas contagens medianas de potássio e baixas contagens de tório e urânio, padrões diferentes dos encontrados nos mapas de contagens individuais dos elementos eTh e eU (Figura 34.4D-E), possivelmente associada ao Complexo metavulcanossedimentar Pontes e Lacerda.

DOMÍNIO III (Metavulcanossedimentares – Grupo Pontes e Lacerda e Terreno Rio Alegre

Nas porções SE da área, exhibe-se um dos complexos metavulcanossedimentares (*e.g., Rio Alegre*), definido previamente por apresentar baixas contagens de K e média a baixa de eTh e eU (Figura 34.4D-E), fronteiro a Serra de Santa Bárbara à oeste.

Já na zona NE, limitada pelo rio Guaporé e adjacente à Formação Fortuna, tem-se o Complexo Metavulcanossedimentar Pontes e Lacerda, com contagens baixas a médias de potássio e altas contagens de tório e urânio.

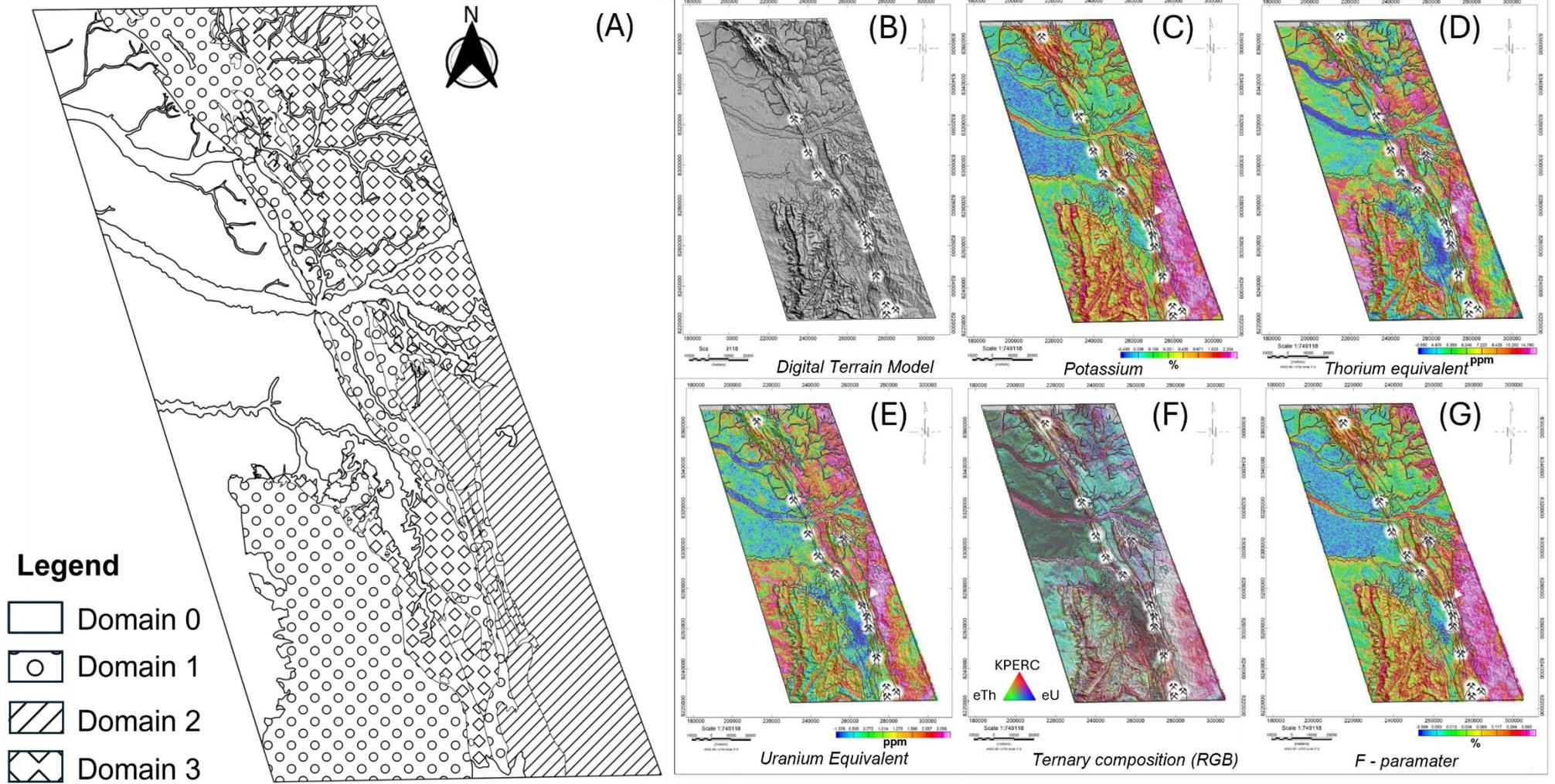


Figura 34.4 – Mapas aerogeofísicos e de relevo digital da porção central da Província de Ouro Agualei (AGGP). Os ícones de martelo representam ocorrências e minas no contexto, destacados pela seta que representa a região de estudo. (Extraído e Modificado de CPRM, 2008).

Configurações Magnéticas

A porção leste-nordeste do mapa do campo magnético anômalo (CMA) (Figura 35.4-A) é caracterizada por zonas de anomalias negativas profundas com comprimento de onda longo, associadas ao limite com a Bacia do Parecis e positivas na porção central, também definida por anomalias de comprimento de onda longo, provavelmente correspondendo às rochas metavulcanossedimentares do Grupo Pontes e Lacerda. Ainda na porção oriental do mapa, mais precisamente no campo centro-sul, algumas anomalias são dipolares (*e.g.*, na região da mina Pau-a-Pique) associadas aos granitos da Suíte Pindaituba, e, por fim, nas zonas mais a sudeste, as anomalias são de moderado comprimento de onda e moderadamente positivas vinculadas ao Batólito Santa Helena. No centro do mapa, exibem-se algumas anomalias lineares isoladas de comprimento de onda curto com tendência norte e noroeste, e alguns dos depósitos de ouro conhecidos situam-se ao longo dessas tendências associadas aos metassedimentos do Grupo Aguapeí, com geometrias características visualizadas no mapa de gradiente total (Figura 35.4-B). Uma série de anomalias dipolares de comprimento de onda mais curto podem ser vistas na parte centro-sul do mapa, a oeste do Grupo Aguapeí (*i.e.*, tendências

lineares N-NW), correspondendo ao Terreno Rio Alegre. No canto sudoeste do mapa, a área do Bloco Paraguá é caracterizada por um padrão linear incipiente de anomalias mais distintas, com tendências leste-oeste e noroeste-sudeste (Aisengart et al., 2017).

Além disso, na porção vinculada ao Domínio 0 (*i.e.*, radiométrico), mais precisamente nas regiões centro- oeste, são evidenciadas anomalias magnetométricas negativas relevantes, possivelmente associadas a corpos profundos e, por vezes, com dipolos invertidos (*i.e.*, magnetização remanente). Regionalmente, não foram mapeados corpos graníticos e/ou outras unidades na região que possam justificar tal assinatura.

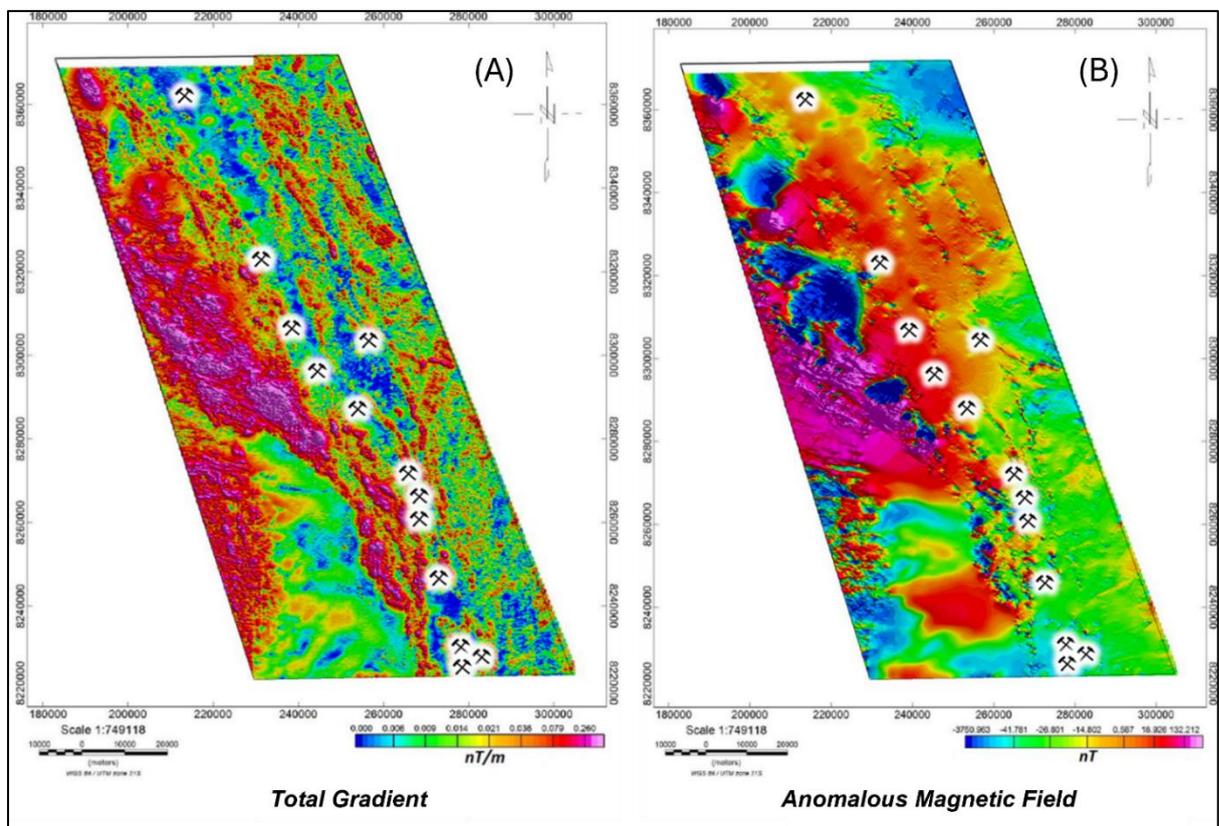


Figura 35.4 - Mapas aerogeofísicos magnetométricos da central da Província de Ouro Aguapeí (AGGP). Em (A) mapa da amplitude do gradiente total e (B) mapa do campo magnético anômalo. (Extraído e Modificado de CPRM, 2008).

2.3 Alvo Anomalia BP

O Alvo Anomalia BP está localizado a 45 km à SE da cidade de Pontes e Lacerda, 70 km a NW da cidade de Porto Esperidião e 6 km ao norte da mina Pau- a-Pique (Figura 36.4-A). À área está posicionada no contato entre embasamentos máficos/ultramáficos (*i.e.*, Terreno Rio Alegre) com rochas intermediárias (*i.e.*, Suíte Pindaiatuba) a ácidas/álcalis (*i.e.*, Suíte Santa Helena), com metassedimentos (*i.e.*, Gr. Aguapeí) recobrimdo (Figura 36.4-B).

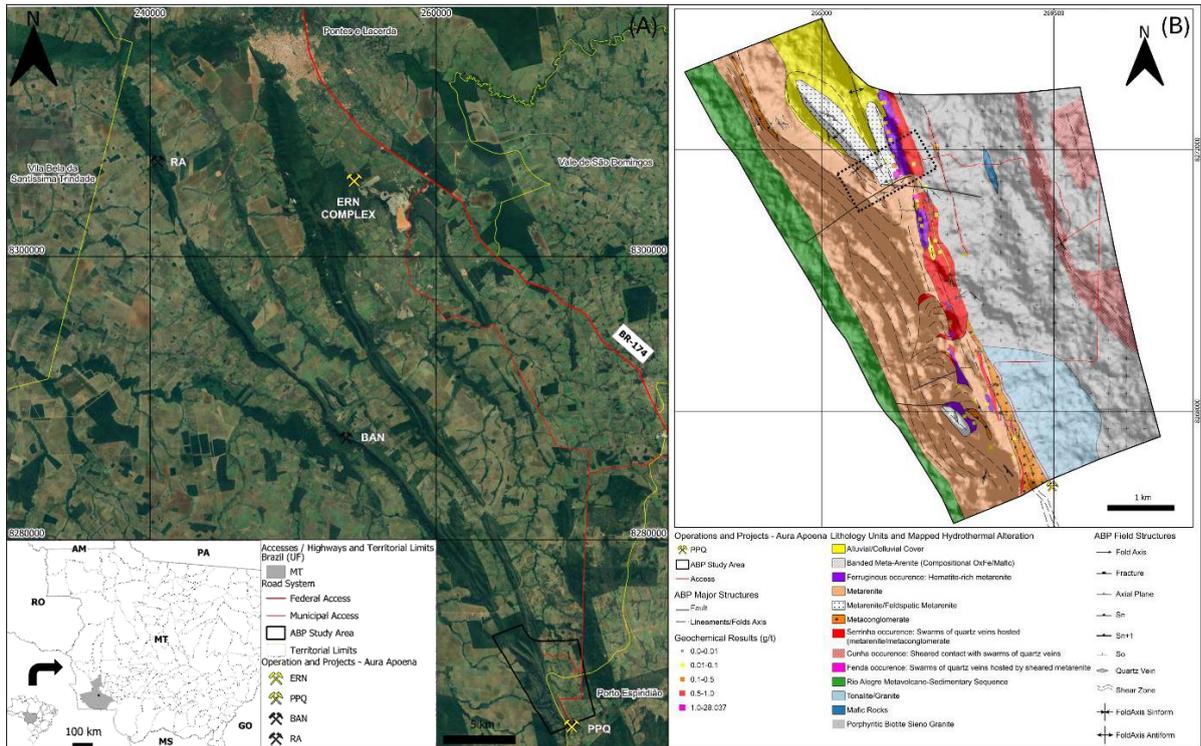


Figura 36.4 – (A) Mapa de localização e (B) mapa geológico hidrotermal detalhado da área ABP, destacando a zona de confluência estrutural dentro do retângulo ao NW (adaptado e modificado de Echague et al., 2024). ERN = Ernesto; PPQ = Pau-a-Pique; BAN = Bana BAN = Bananal; ABP = Anomalia BP; RA = Rio Alegre.

Trabalhos anteriores investigaram o depósito Pau-a-Pique (*i.e.*, análogo ao contexto da área de estudo), tanto em referência ao sistema, quanto suas conclusões estão resumidas na Tabela 4.4, adicionadas a estas informações estão as especificidades do depósito ABP. Assim como em outros locais da AGGP (*e.g.*, Ernesto, São Vicente, São Francisco etc.), os depósitos têm zonas de minério caracterizadas por sistemas de veios de quartzo e sulfetos disseminados, hospedados em zonas de cisalhamento de forte mergulho no contato entre rochas metassedimentares do Grupo Aguapé e rochas do embasamento.

Tabela 4.4 – Resumo das características do depósito Pau-a-Pique de acordo com autores anteriores e a área da Anomalia ABP.

<i>Depósito</i>	<i>Rocha Hospedeira</i>	<i>Geometria dos Veios</i>	<i>Configuração Estrutural</i>	<i>Assembleia Mineral do Veio</i>
<i>Pau-a-Pique</i>	Contato entre o metaconglomerado da Formação Fortuna e o Tonalito (embasamento) ¹	Sistemas de veios de impacto NNW- SSE com mergulho acentuado na zona de cisalhamento ³⁴	Zona de falha de mergulho acentuado NW-SE ²	(Py, Ser, Hem, Mag) ³ ; (Py) ^{5,6} (Ser, Hem, Mag) ^{3,6} (Carb) ⁶
<i>Anomalia BP</i>	Ocorrências Cunha, Serrinha e Ferruginoso. Cunha: Contato entre metaconglomerado da Fm. Fortuna e tonalito (embasamento) ¹ ; Serrinha: contato entre granito e metassedimentos (i.e. metarenitos a metarenitos conglomeráticos líticos cisalhados) e Ferruginoso: forte presença de óxidos de ferro disseminados em metassedimentos dispostos em lentes ao longo do strike N-NW.	Ocorrências de Cunha e Serrinha associadas a sistemas de veios com mergulho acentuados NNW-SSE na zona de cisalhamento	Confluência entre a Zona de Cisalhamento do Corredor (NW- SE) e a zona de charneira da Sinclinal do Caldeirão	Ocorrência Cunha e Serrinha: (Py, Ms, Ser, Hem, Mag, Carb, Chl, Ab, Cpy and Tur) ⁷ Ocorrência Ferruginoso: (Hem, Mag and Py) ⁷

Abbreviations: Ab = albita, Carb = carbonato, Chl = clorita, Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mag = magnetita, Ms = muscovita, Py = Pirita, Ser = sericita, Tur = turmalina. ¹Fernandes et al. (2006b), ²Fernandes et al. (2005a), ³Fernandes et al. (2006^a), ⁴Cezar (2004), ⁵Geraldes et al. (1997), ⁶Melo (2016) and ⁷Echague et al. (2024).

3. Materiais e Métodos

Foram selecionadas 36 amostras de furos de sondagem (Figura 37.4) para análises gamaespectrométricas, abrangendo diversos tipos litológicos, incluindo xistos, granitos e veios de quartzo, tanto mineralizados quanto não mineralizados do alvo (*e.g.*, ocorrência Serrinha em profundidade), cujos dados, foram confrontados com três furos históricos da mina Pau-a-Pique. Além disso, nas análises de susceptibilidade magnética, foram obtidas um total de 1176 amostras correspondentes aos 1.174,32 metros dos dois furos do alvo Anomalia BP (*i.e.*, ABP0004 e ABP0009). Para as análises petrográficas, foram confeccionadas 21 lâminas delgadas polidas, das quais 19 coincidem com os intervalos definidos no estudo petrofísico de gamaespectrometria (*i.e.*, ABP0011 e amostra de superfície). Cada amostra foi subdividida em alíquotas, sendo metade destinada à análise geoquímica e a outra metade para a coleta de dados petrográficos e petrofísicos.

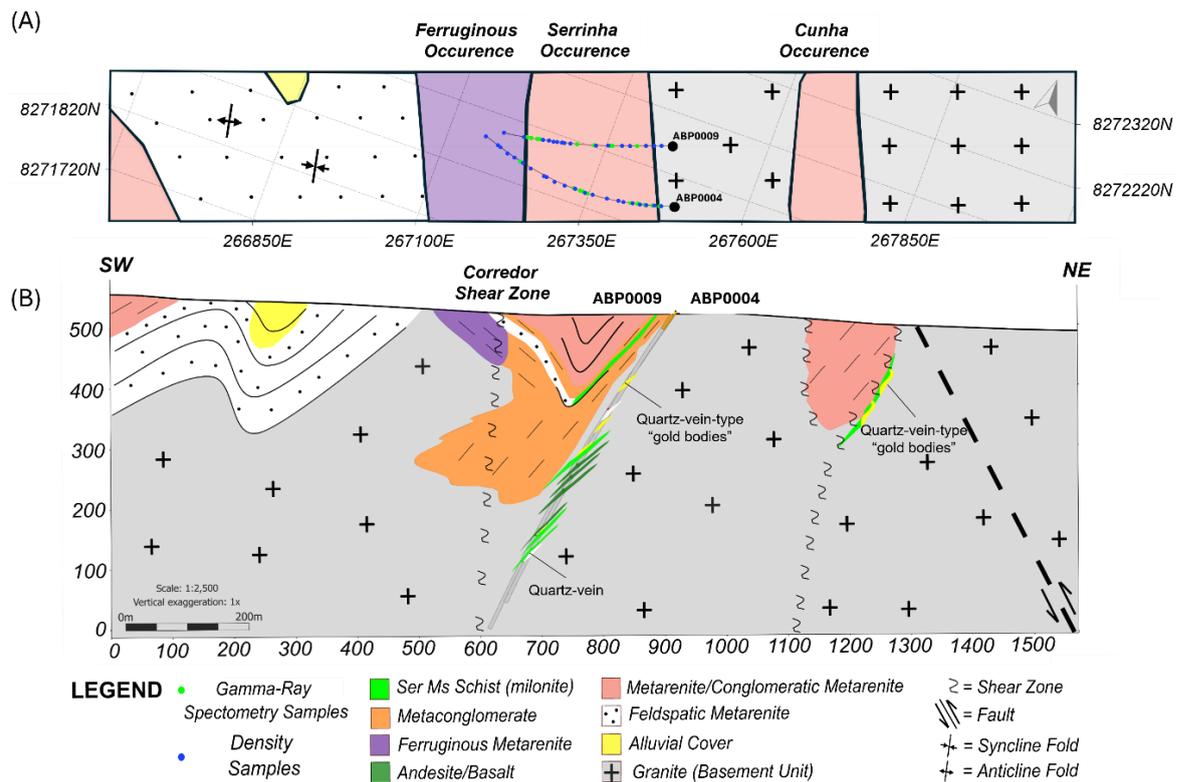


Figura 37.4 – (A) Vista em planta mostrando a localização dos furos e a disposição das amostras petrofísicas na área de estudo, juntamente com as ocorrências Ferruginoso, Serrinha e Cunha em superfície. (B) Seção geológica da área alvo Anomalia BP, com informações litológicas dos furos de sondagem da pesquisa (Adaptado de Echague et al., 2024).

3.1 Petrofísica

Os dados de densidade, susceptibilidade e gamaespectrometria foram adquiridos na unidade da Aura Apoena, Pontes e Lacerda – MT e no Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília respectivamente, utilizando as amostras de testemunhos de sondagem e de superfície do alvo.

Os equipamentos utilizados foram i) Susceptibilidade Magnética: MPP PROBE, Model MPP3wifi (figura 38.4-A), medidor de suscetibilidade magnética e condutividade, da *Instrumentation GDD Inc*, vinculado ao programa computacional instalado em tablet Samsung Galaxy A; ii) Densidade: balança industrial digital, Advanced (MC) – Balmak e depois imersa em uma proveta de plástico graduada, Nalgon (1000 ml) (figura 38.4C-D) e iii) Gamaespectrômetro portátil *RS-230 BGO Super-SPEC*, fabricado pela *Radiation Solutions*, Canadá (figura 38.4E- 6F).

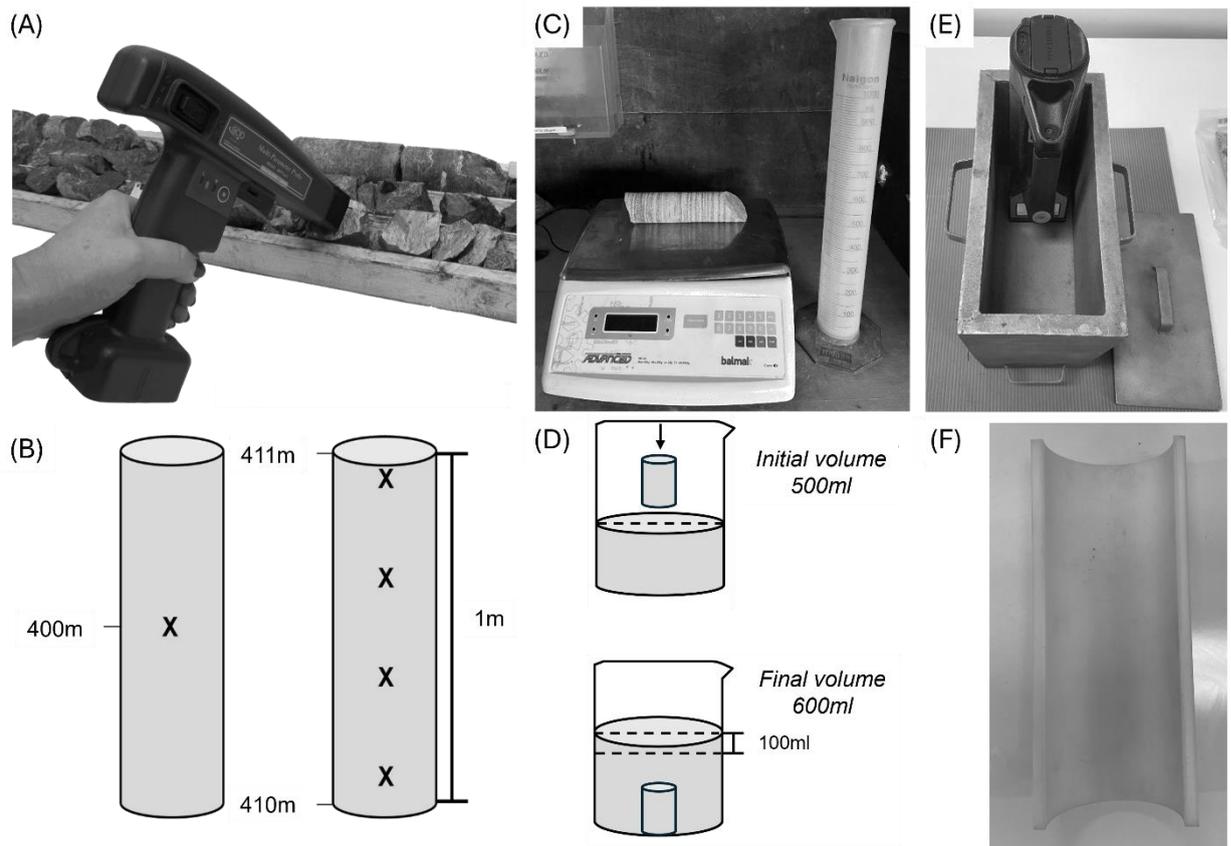


Figura 38.4 – Materiais e metodologias para aquisição de dados petrofísicos. Em (A) Medidor de suscetibilidade MPP PROBE; GDD (2018); (B) metodologia de coleta de dados de suscetibilidade, onde X representa as pontos de medida dentro de 1 metro de testemunho; (C) balança industrial digital; (D) metodologia para inserção de um becker de amostra com 500 ml de água e becker com o núcleo completamente imerso; (E) caixa de chumbo e (F) moldes de teflon.

Amostragem de Suscetibilidade Magnética

Em zonas de cisalhamento e alterações hidrotermais em contexto de ouro orogênico, é comum encontrar rochas e minerais apresentando quantidades excepcionais de magnetita e configurações estruturais associadas a níveis diamagnéticos e/ou baixos magnéticos (*e.g.* estruturas canalizadoras de fluidos com presença de quartzo e silicificação) (Leão-Santos et al. 2022; Mendes et al. 2023).

Definir as configurações de análise é crucial para as medições, abrangendo tanto o fluxo quanto os parâmetros envolvidos. Quando optamos pelo modo *punctual* (registro de leituras individuais), especificamos o espaçamento entre cada leitura, conforme o intervalo selecionado, ou adotamos o modo *continuous*, onde inserimos um intervalo de tempo entre cada leitura dentro do espaçamento determinado.

Neste estudo, para amostras de furos cilíndricos, inicialmente realizamos a aquisição em pontos completos dos furos de sondagem, visando uma contabilização abrangente. Em seguida,

detalhamos as zonas com os valores magnéticos mais elevados e/ou quaisquer alterações registradas durante a descrição geológica, com medições a cada 25 cm dentro de amostras espaçadas em 1 metro, conforme ilustrado na Figura 37.4-B. O valor atribuído a cada intervalo medido foi calculado a partir da média aritmética das quatro medidas.

Amostragem Gamaespectrométrica

O ensaio gamaespectrométrico, diferentemente do método de estudo de susceptibilidade magnética, foi realizado com 45 medições em 35 amostras de testemunho de rocha (referentes à trechos dos dois furos de sondagem do alvo) e uma amostra de rocha (superfície), dispostas em trechos de forte alteração hidrotermal, rochas mineralizadas historicamente associadas ao depósito Pau-a-Pique, além das rochas encaixantes de 8 furos de sondagem, tanto do depósito ABP quanto da mina subterrânea de Pau-a-Pique.

As amostras foram colocadas nos moldes de teflon, conforme o diâmetro do testemunho, e depois inseridas em uma caixa de chumbo. A amostra foi exposta ao equipamento de forma perpendicular, através de uma janela na porção inferior, de proporção equivalente ao detector do equipamento RS-230, no Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília. Tal procedimento foi feito para minimizar os efeitos de variações locais e a distribuição de radioelementos.

O tempo de medição necessário depende da radioatividade da fonte e da precisão requerida para a medição. Enquanto Lovborg e Mose (1987) forneceram estimativas usando o equipamento GR-320, este estudo seguiu com tempo de integração de 5 minutos para cada amostra, independentemente de sua afinidade radioativa.

Seguindo a abordagem de Jácomo (2010), optamos por trabalhar com um número de contagens, N , registradas nas janelas de energia para K, eU e eTh, e um tempo de contagem, $t = 5$ minutos. Essas medidas foram automaticamente convertidas em taxa de contagem, $n = N/t$ (cpmin), e então foram estimadas as concentrações de K, U e Th nas rochas. Embora a expressão dos dados em cpm (ou cps, cintilações por segundo) não seja recomendada devido à dependência das taxas de contagem das concentrações dos radioelementos e das características do detector, como tamanho e eficiência, assim como da altitude do voo em caso de deslocamento aéreo (Minty, 1997), consideramos essas medidas confiáveis, pois não houve variações na altura entre o sensor e o alvo durante a aquisição, além dos valores de R^2 verificados no momento de calibração entre os resultados em concentrações e cpm apresentaram-se próximos a 1 (Figura 39.4A-C). Após o processo de medição, os

dados foram exportados para o programa computacional *Geoview, Version, 1.6*, da empresa *GEORADIS s.r.o*, onde foram submetidos às análises estatísticas necessárias para o estudo.

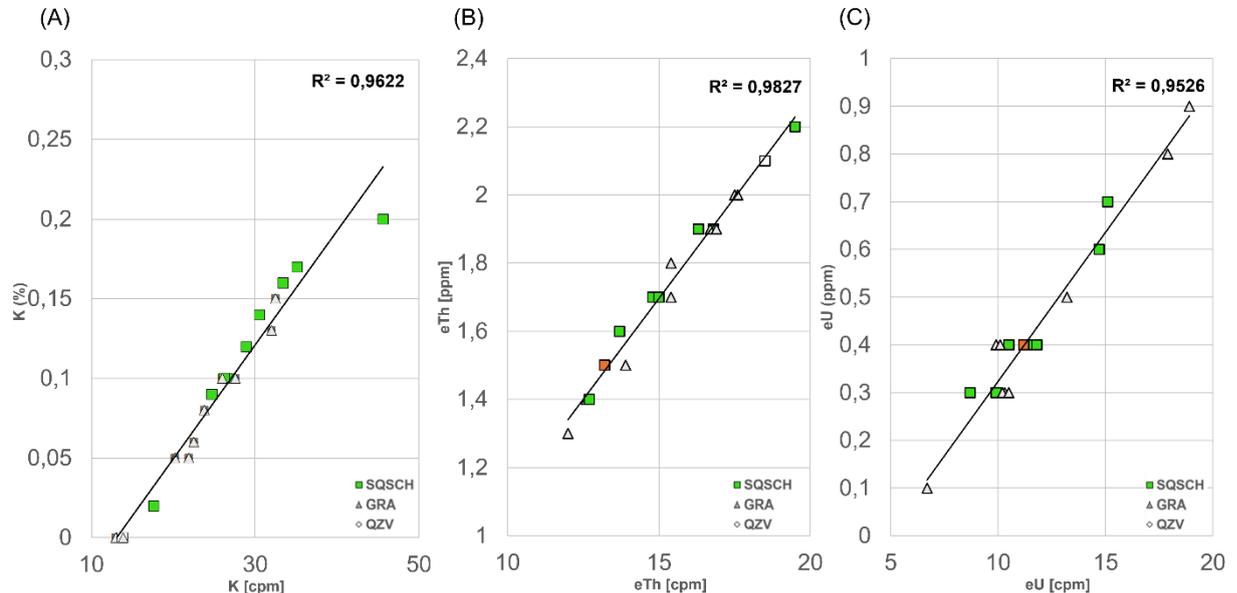


Figura 39.4 – Correlações de calibração do gamaespectrômetro RS-320. Correlação entre K (%) e K (cpm) em (A), entre eTh (ppm) e eTh (cpm) em (B) e entre eU (ppm) e eU (cpm) em (C).

Amostragem de Densidade (aparente)

A determinação da densidade aparente em campanhas de sondagem, historicamente vinculada à estimativa de tonelagem de recursos minerais (Rossi e Deutsch, 2014), também revela importantes características petrofísicas relevantes para correlações indiretas em depósitos minerais, como mineralização e rochas encaixantes ou hospedeiras.

Para determinar a densidade de cada unidade litológica no contexto, foi empregado o método de amostragem em 55 amostras com base no princípio de Arquimedes, que faz parte da rotina de descrição da equipe de exploração da Aura Aipoena. As amostras são selecionadas preferencialmente a cada 20 metros ou, quando necessário, em intervalos litológicos específicos. Esses intervalos selecionados devem ter entre 10 e 20 centímetros de comprimento, dos quais são retiradas amostras para a determinação da densidade. Cada amostra é pesada no ar (m_{ar}) utilizando uma balança industrial e, em seguida, imersa em uma proveta de plástico graduada (1000 ml) contendo um volume de água conhecido ($v_{inicial} = 500ml$). O novo volume é medido na água (v_{final}). Uma ilustração deste método para melhor compreensão é apresentada nas figuras 37.4C-D), juntamente com a equação 1.

$$\rho = \frac{m_{ar}}{v_{final} - v_{inicial}} \quad (1)$$

3.2 Petrografia Microscópica

Com base na descrição geológica de dois furos de sondagem selecionados e em uma amostra de rocha de superfície (*i.e.*, mapeamento geológico), foram coletadas 21 amostras (ver Tabela 4.5), representativas das rochas hospedeiras, posicionadas nas mesmas zonas de análise gamaespectrométrica e magnética, para a confecção de seções delgadas polidas.

Tabela 4.5 – Lista de furos de sondagem e amostras de superfície utilizadas para análises.

Lâminas Petrográficas		
Furo	Amostra	Litologia
ABP0004	ABP0004-44.70	Granito sulfetado
	ABP0004-61.91	Granito albitizado
	ABP0004-86.95	Granito albitizado
	ABP0004-108.73	Granito
	ABP0004-110.31	Veio sulfetado
	ABP0004-257.72	Xisto
	ABP0004-261.01	Xisto sulfetado
	ABP0004-285.74	Xisto sulfetado
	ABP0004-491.24	Clorita xisto
ABP0011	ABP0011-396.90	Xisto sulfetado
ABP0009	ABP0009-101.18	Xisto sulfetado
	ABP0009-182.50	Granito
	ABP0009-184.89	Granito sulfetado
	ABP0009-189.37	Xisto sulfetado
	ABP0009-238.69	Granito sulfetado
	ABP0009-293.58	Dique básico
	ABP0009-425.38	Xisto sulfetado
	ABP0009-447.67	Granito cisalhado
	ABP0009-460.47	Xisto sulfetado
	ABP0009-473.40	Granito sulfetado
Campo ABP	RE-RS-1374	Anfibolito magnético

Essas amostras foram primeiramente enviadas ao Laboratório de Laminação M3GL em Mariana, MG, onde foram preparadas e analisadas 21 seções delgadas-polidas representativas das rochas encaixantes, zonas de alteração hidrotermal e veios mineralizados. O estudo petrográfico foi conduzido no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UNESP, onde 21 amostras foram analisadas.

A análise visou caracterizar as rochas encaixantes, a alteração hidrotermal e o minério, utilizando microscópios petrográficos *ZEISS* (modelo *AXIOSKOP 40*) e *Olympus - BX40*, auxiliados por um dispositivo de obtenção de imagens *Canon EOS 5D Mark II*.

3.3 Análises litogeoquímicas

A análise das correlações entre a mineralização de ouro, elementos maiores, menores e traços foi conduzida em dois furos de sondagem distintos (ABP0004 e ABP0009), com profundidades respectivas de 622,26 e 552,06 metros. Todos os furos foram amostrados em intervalos de 1 metro, cobrindo metade do diâmetro, embora algumas metodologias de análise distintas tenham sido aplicadas em certas zonas, em coincidência com as lâminas petrográficas e zonas de detalhamento petrofísico.

Quatro pacotes metodológicos distintos foram utilizados para as análises: CVA02B – Determinação de Hg por geração de Vapor Frio – Absorção Atômico; FAA505 – Determinação de Au por *Fire Assay*; ICP95A/IMS95A/ICP40B – Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio/Digestão Multiácido – ICPOES/ICPMS. Esses procedimentos são executados e mais bem detalhados pelo laboratório de análise da empresa *SGS Geosol Laboratórios LTDA*, localizado em Goiânia, Goiás.

4 Resultados

Os distintos tipos litológicos correspondente às amostras foram identificados com base nos dados geoquímicos gerais das rochas. Por outro lado, a assembleia mineral caracterizada por indicativos de alteração hidrotermal, especialmente micas e carbonatos, permitiu classificar as amostras em categorias quanto à alteração hidrotermal, além dos níveis de deformação vinculados à proximidade da Zona de Cisalhamento Corredor. Essa categorização foi viabilizada pela utilização de dados de análise petrográfica e petrofísica (*i.e.*, susceptibilidade magnética e gamaespectrometria), que contribuiu para diferenciar as alterações hidrotermais e texturas minerais (*e.g.*, sulfetos e óxidos), como a forma de disseminação ou em veios, e minerais não sulfetados. Dentro deste contexto, também se optou por discernir a gradação entre as zonas com maiores deformação, em conjunto com a classificação dos minerais magnéticos associados. A seguir, serão apresentados os dados de petrofísica, geoquímica e mineralogia das amostras utilizadas.

4.1 Susceptibilidade Magnética

A média pontual dos dados de susceptibilidade magnética das 1176 amostras (*i.e.*, ABP0004 e ABP0009) do alvo Anomalia BP, apresentou valor de 0.002523×10^{-3} SI. Com os resultados estatísticos, aliados a petrografia microscópica, as litologias foram caracterizadas em função da maior influência magnética de rocha (brecha, xisto e diabásio).

A distribuição e a variabilidade dos dados são demonstradas na figura 40.4, na qual, os valores inferiores são 0 e os superiores são $0,00771 \times 10^{-3}$ SI (*i.e.*, xisto). Os primeiros quartis, variam entre $0,150 \times 10^{-3}$ (*i.e.*, veio de quartzo) a $2,76 \times 10^{-3}$ SI (*i.e.*, brecha). Os valores das medianas variam entre $0,380 \times 10^{-3}$ (*i.e.*, veio de quartzo) a $3,50 \times 10^{-3}$ SI (*i.e.*, brecha). Os terceiros quartis, com valores entre $0,635 \times 10^{-3}$ (*i.e.*, veio de quartzo) a $5,47 \times 10^{-3}$ SI (*i.e.*, xisto). Já os valores extremos, ou seja, outliers são evidenciados na figura 7B, com valores de até $72,8 \times 10^{-3}$ SI (*i.e.*, granito).

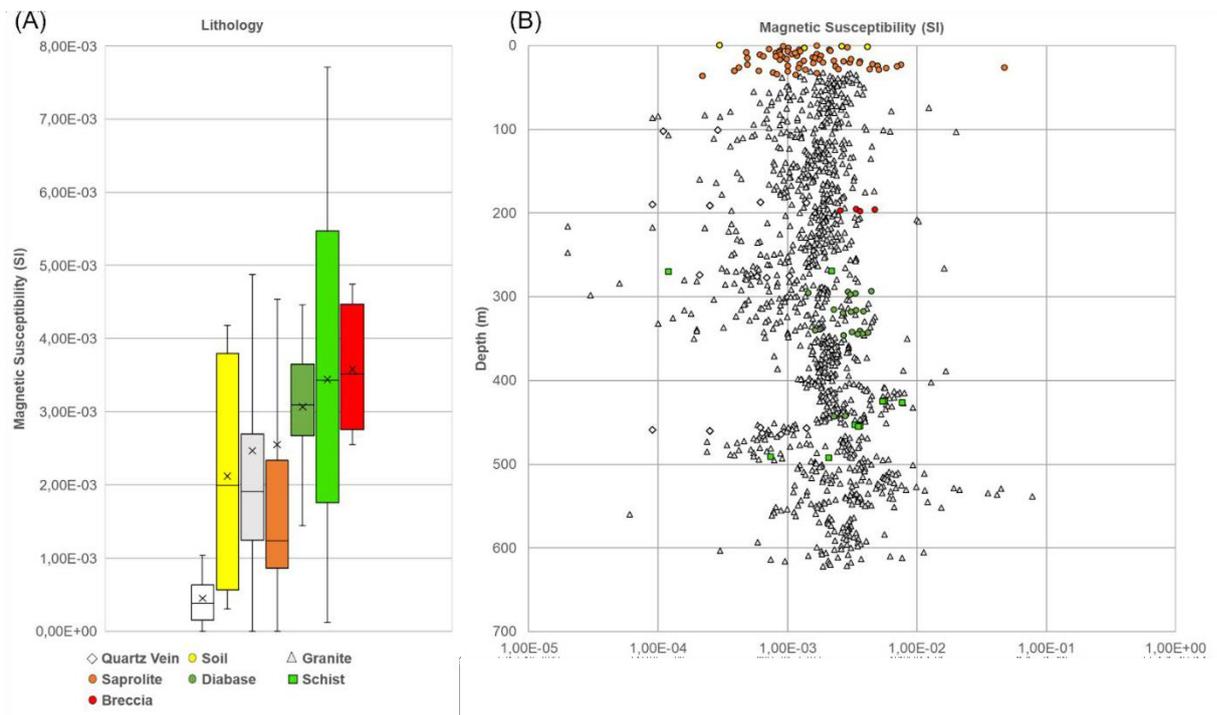


Figura 40.4 – Boxplot (A) e gráfico de dispersão (B) das análises de suscetibilidade magnética de amostras “punctual” da área alvo Anomalia BP.

Para as análises das zonas detalhadas de cisalhamento e gradação hidrotermal (*i.e.*, sulfetação, sericitização, carbonatação e venulações de quartzo), foram adquiridas 3 amostras pontuais, correspondentes às porções definidas para as lâminas petrográficas. As amostras de granito (figura 41.4-A) e granito deformado e alterado apresentaram valores máximos de suscetibilidade de $2,69 \times 10^{-3}$ e $4,40 \times 10^{-3}$ SI, enquanto as amostras de xisto (figura 41.4-B), valores de $2,14 \times 10^{-3}$ e $6,84 \times 10^{-3}$ SI. Já, a amostra de veio de quartzo com pirrotita apresentou valor máximo de suscetibilidade magnética de $55,9 \times 10^{-3}$ SI (Figura 41.4-C).

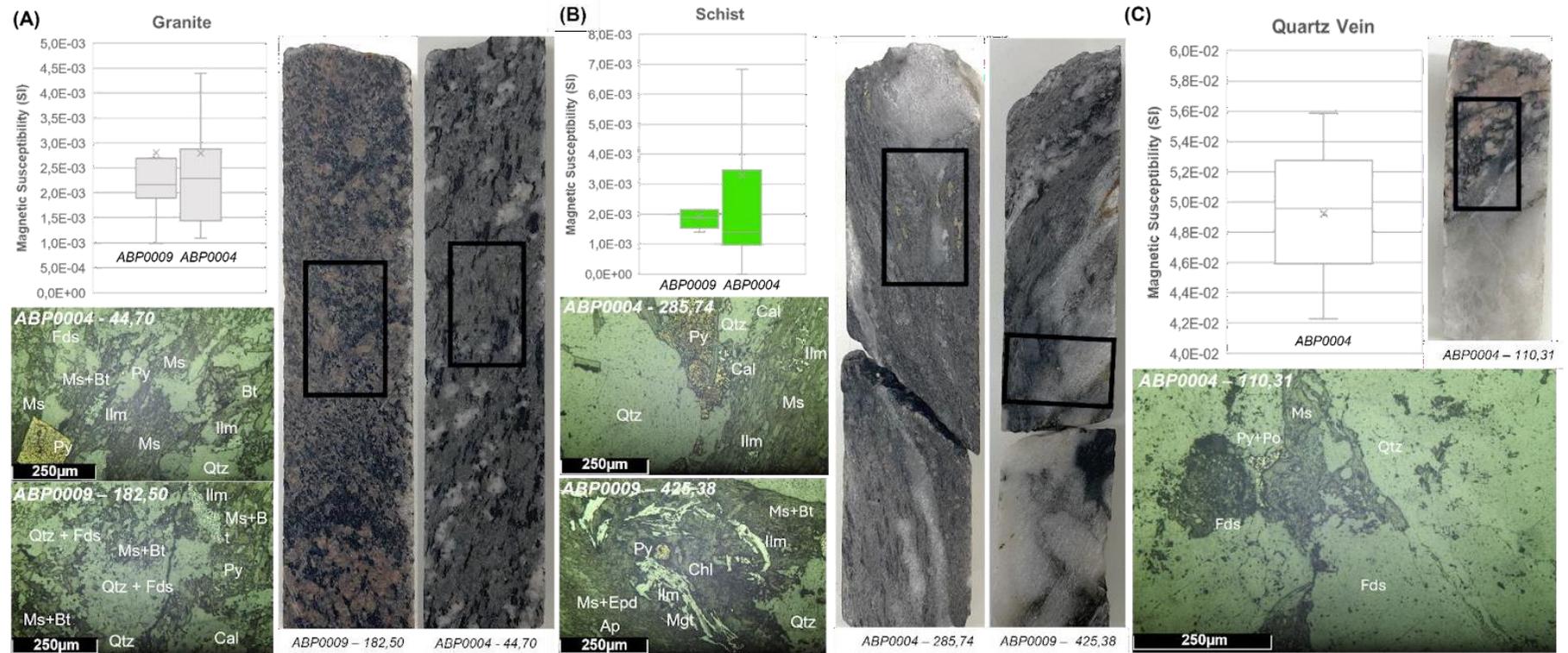


Figura 41.4 – Distribuição estatística dos dados das litologias Granito (A), Xisto (B) e Veio de Quartzo (C), associadas a amostras petrográficas macroscópicas e microscópicas (e.g., luz transmitida) de alguns furos em estudo. Abreviações: Ap = apatita, Bt = biotita, Cal = calcita, Chl = clorita, Ilm = ilmenita, Fds = feldspato, Qtz = quartzo, Ms = moscovita, Po = pirrotita e Py = pirita.

A aquisição em campo, especificamente com as unidades do embasamento granítico, xisto, metassedimento, veio de quartzo e corpo máfico, denota assinaturas da susceptibilidade magnética com valores máximos de $0,930 \times 10^{-3}$ SI para Sienogranito não deformado (Figura 42.4-A); Qtz-Ms-Turm-Xisto oxidado (Figura 42.4-B) com $0,320 \times 10^{-3}$ SI; $0,09 \times 10^{-3}$ SI para Sienogranito Porfírico (Figura 42.4-C); $0,06 \times 10^{-3}$ SI para Metarenito Conglomerático silicificado (Figura 42.4-D); $0,250 \times 10^{-3}$ SI em Granito milonitizado (sericitizado) (Figura 42.4-E); $0,250 \times 10^{-3}$ SI para Veio de Quartzo (*i.e.*, sistema cunha) oxidado (figura 42.4-F); $0,130 \times 10^{-3}$ SI e $2,03 \times 10^{-3}$ SI em Xistos (*i.e.*, zona de cisalhamento) (Figura 42.4G-H) e de $31,5 \times 10^{-2}$ SI para corpo de anfibolito (Figura 42.4-I).

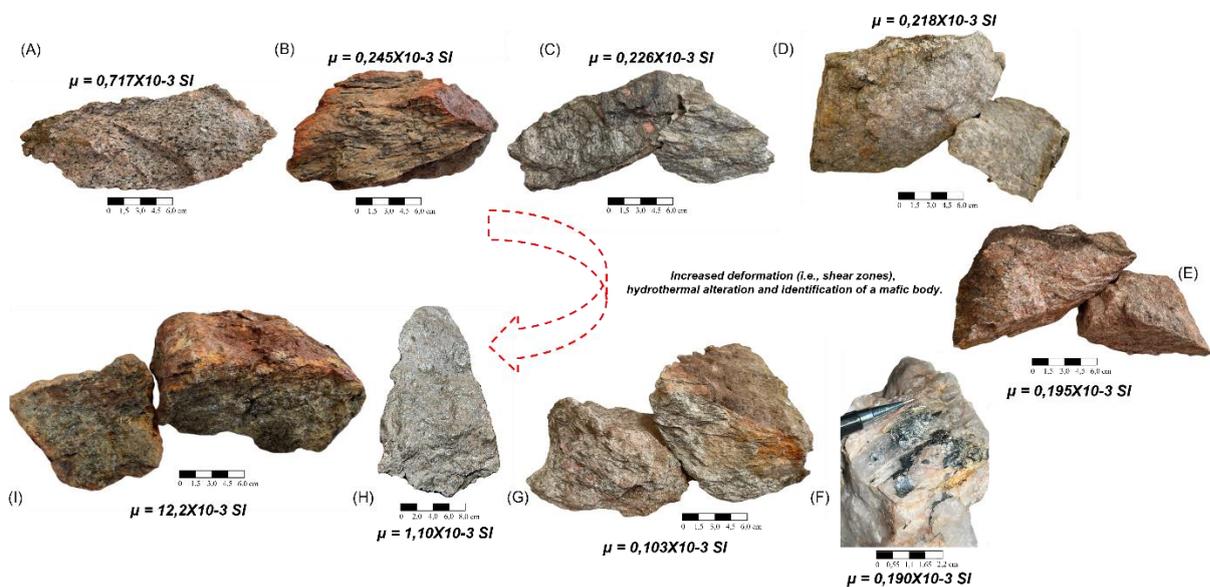


Figura 42.4 – Distribuição dos resultados de susceptibilidade magnética média das unidades no campo da área alvo Anomalia BP e sua associação com as respectivas características macroscópicas.

De modo geral, o aumento significativo nas susceptibilidades magnéticas médias dos granitos e xistos proximais a zona cisalhamento em relação aos protólitos (*i.e.*, metassedimentos e granito) não deformados e/ou alterados são possivelmente provenientes do incremento (*e.g.*, fugacidade de oxigênio) de óxidos de ferro presentes (*i.e.*, ilmenita > magnetita >> hematita) (figura 41.4 e 42.4), além dos valores representados pela unidade ultramáfica (*i.e.*, anfibolito).

A correlação entre a susceptibilidade magnética e os teores de ouro nos furos de sondagem apresenta um valor de $R^2=0,005$, indicando uma correlação muito baixa e extremamente fraca entre essas variáveis (Figura 43.4). Esse resultado pode ser explicado pela presença de zonas mineralizadas com silicificação intensa e venulações de quartzo, tanto no

micaxisto quanto no granito deformado. Esses fatores geológicos podem contribuir para a falta de uma relação clara e significativa entre a susceptibilidade magnética e os teores de ouro. Mesmo na presença de quantidades significativas de óxidos de ferro, como ilmenita, e de magnetita em menor proporção, nas zonas proximais, a correlação continua a ser muito baixa.

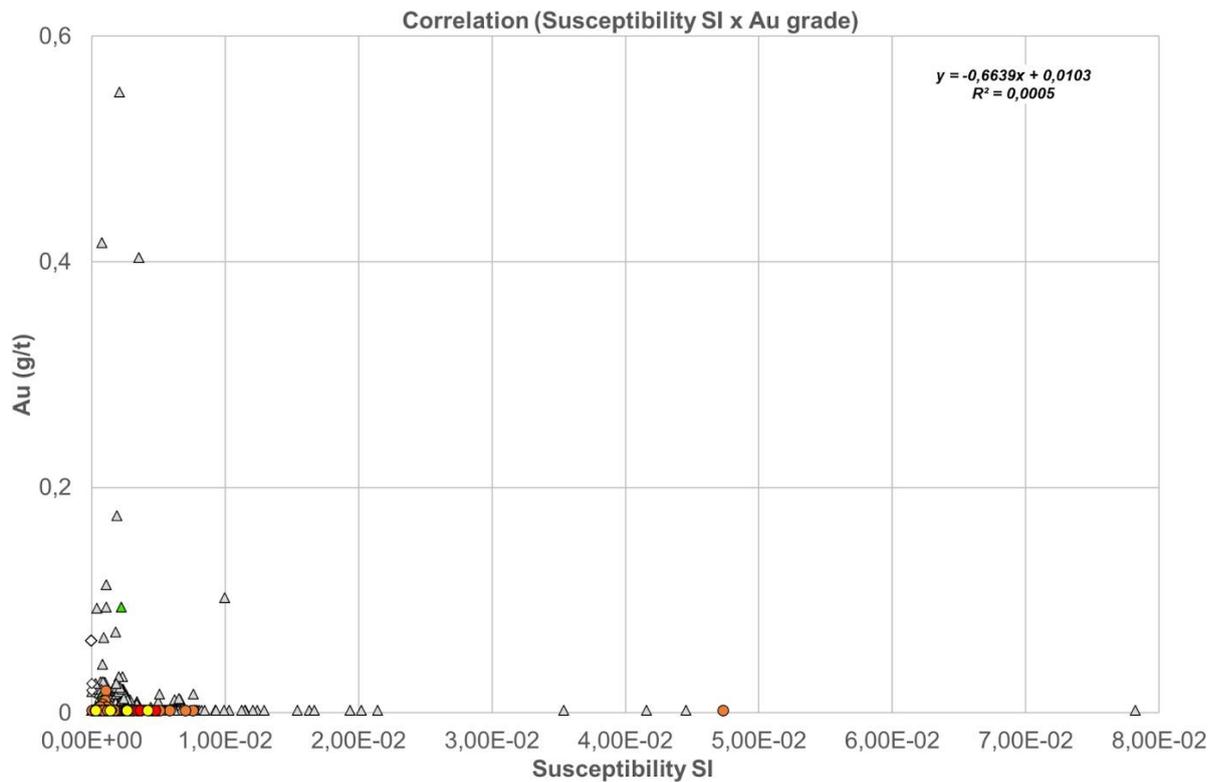


Figura 43.4 – Gráfico de correlação entre a susceptibilidade magnética (SI) e o teor de ouro (g/t), destacando o baixo coeficiente de determinação (R^2) entre os parâmetros. Um conteúdo anômalo de ouro (3,4 g/t), não magnético, foi removido para melhor visualizar os dados.

4.2. Gamaespectrometria

O ensaio gamaespectrométrico, diferentemente do método de estudo da susceptibilidade magnética, foi realizado com 45 medições em 35 amostras de testemunho de rocha e 1 amostra de superfície, dispostas em trechos de forte alteração hidrotermal, rochas mineralizadas (históricas) e nas encaixantes de 8 furos de sondagem. As medições foram feitas tanto no depósito ABP quanto na mina subterrânea de Pau-a-Pique e no complexo ERN.

De forma geral, assim como demonstrado por Milési et al. (1991), os depósitos Birimianos associados à alteração sericítica frequentemente exibem elevados valores de potássio, característica também observada no depósito ABP, onde o enriquecimento em

potássio se deve à alteração sericítica, presente no halo de alteração proximal em torno da mineralização de ouro. Além disso, as rochas graníticas (GRA) do embasamento, frequentemente deformadas e alteradas hidrotermalmente, apresentam altos teores de potássio, assim como o xisto (SQSCH) principal hospedeiro da mineralização.

Do mesmo modo, as amostras mineralizadas históricas da mina Pau-a-Pique também apresentam valores dentro do mesmo intervalo evidenciado no ABP. A Figura 44.4 mostra, de forma geral, a estatística das litologias do alvo (Figuras 44.4A-D) e das amostras da mina Pau-a-Pique (Figuras 44.4E-G), além da distribuição das assinaturas gamaespectrométricas de potássio, urânio e tório em relação à profundidade (Figuras 44.4D-H).

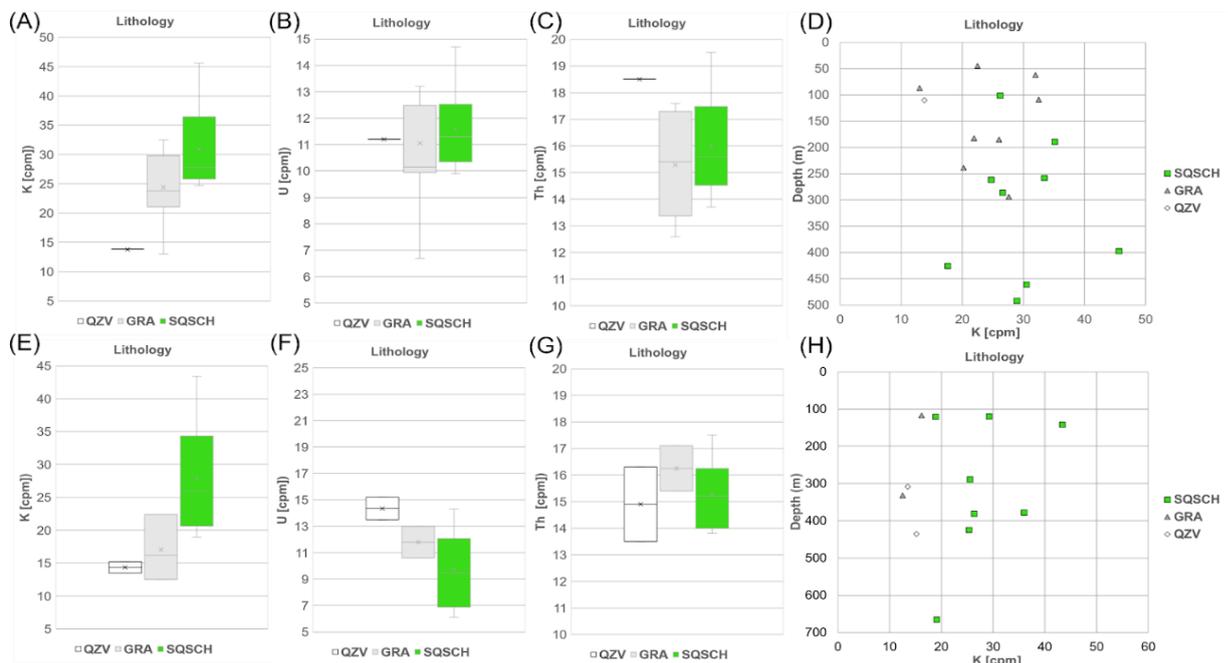


Figura 44.4 – Distribuição estatística dos dados de gamaespectrometria das litologias granito, xisto, anfibólio e veio de quartzo, associadas a todos os furos da Anomalia BP (A-D) e da mina Pau-a-Pique (E-H). GRA = Granito, QZV = Veio de Quartzos e SQSCH = Sericitized-Quartzite-Xistite.

A correlação entre os radioelementos K e eU e o teor de ouro nos furos de sondagem apresenta valores de $R^2= 0,0775$ e $R^2=0,1007$, indicando uma fraca correlação entre essas variáveis (Figura 45.4A e 45.4C). Em contraste, a correlação entre eTh e Au é também baixa $R^2=0,0759$ e exibe um comportamento inverso (vide Figura 45.4B) em relação aos outros radioelementos, evidenciado pela tendência de que, quanto menor a presença de eTh, maior o teor de Au. Esses resultados podem ser explicados pela presença de zonas mineralizadas com intensa sericitização (por exemplo, o incremento de K no sistema), além da possível contribuição dos radioelementos eU e, em menor proporção, eTh, possivelmente provenientes dos granitos e/ou micaxistos presentes.

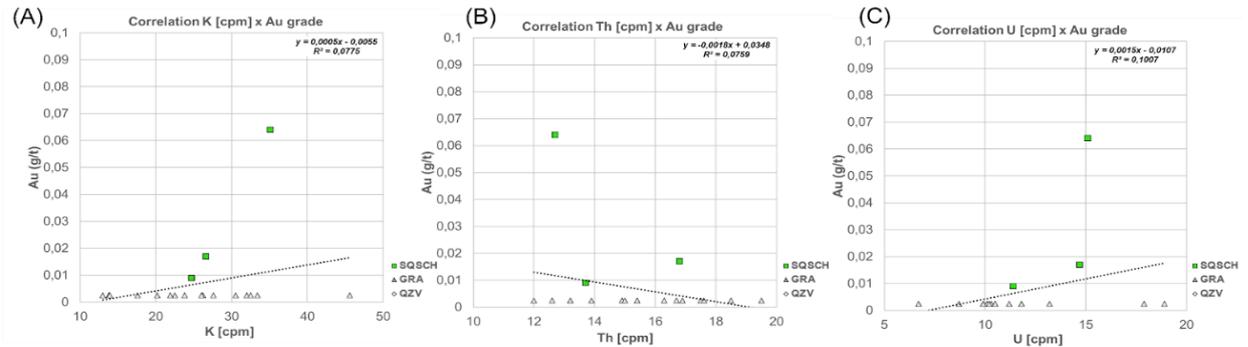


Figura 45.4 – Gráfico de correlação entre os dados de espectrometria de raios gama e o teor de ouro (g/t). Destaque para o comportamento da linha de tendência entre os radioelementos. GRA = Granito, QZV = Veio de Quartzo e SQSCH = Sericita-Quartzo-Xisto.

4.3 Densidade

Os resultados indicaram que as rochas dos furos ABP0004 e ABP0009 de maneira geral apresentam densidades entre 2,321 e 3,512 g/cm³ (Figura 46.4). A unidade básica, pouco expressiva nos testemunhos de sondagem, é representada pelo Diabásio (DBS) e com densidade média entre 2,843 g/cm³ e apresenta um intervalo de variação relativamente pequeno, ocorrendo entre 2,82 e 2,87 g/cm³.

As rochas intrusivas, correspondentes ao Granito (GRA) possui densidade média de 2,731 g/cm³. O granito apresenta densidade variando entre 2,321 e 3,512 g/cm³. Valor anômalo menores identificado no granito, que apresenta densidade inferior à média geral, corresponde à amostra possivelmente depletadas em óxidos de ferro e sulfetos. Por outro lado, valores anômalos com densidades superiores à média geral correspondem a amostras possivelmente com abundância em óxidos de ferro e sulfetos (*i.e.*, magnetita e pirita).

O nível xistoso representado pelo Sericita-Muscovita-Quartzo-Xisto (SQSCH), evidencia uma diminuição levemente significativa nos valores de densidade. Esta resposta se dá devida à substituição da assembleia mineralógica dos metassedimentos e/ou granitos por minerais menos densos como micas, carbonato, quartzo e plagioclásio.

O SQSCH possui densidade média de 2,673 g/cm³, variando entre 2,670 e 2,680 g/cm³. O maior valor de densidade para esta unidade corresponde às amostras referentes ao incremento de Fe no sistema, identificado pelos dados químicos, pela maior proporção de magnetita, ilmenita e hematita na assembleia mineralógica.

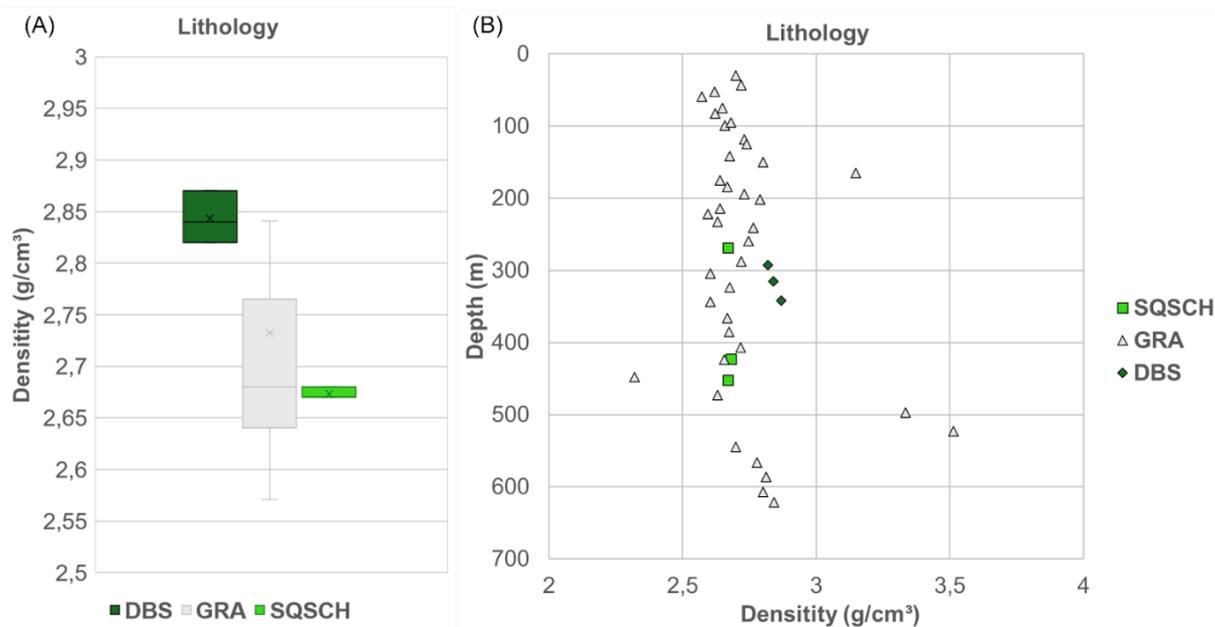


Figura 46.4 – Representação estatística das variações de densidade das rochas em (A) e dispersão na área alvo Anomalia BP (B). GRA = Granito, DBS = Diabásio e SQSCH = Sericita-Quartzo-Xisto.

O comportamento associado à correlação entre densidade e teor de ouro mostra um coeficiente de determinação $R^2=0,0057$ (Figura 47.4), um valor extremamente baixo, assim como para a susceptibilidade magnética. No entanto, observa-se que a densidade associada a zonas com teores anômalos de ouro está entre 2,6 e 2,8 g/cm³ (*e.g.*, a densidade das rochas xistosas e graníticas mineralizadas).

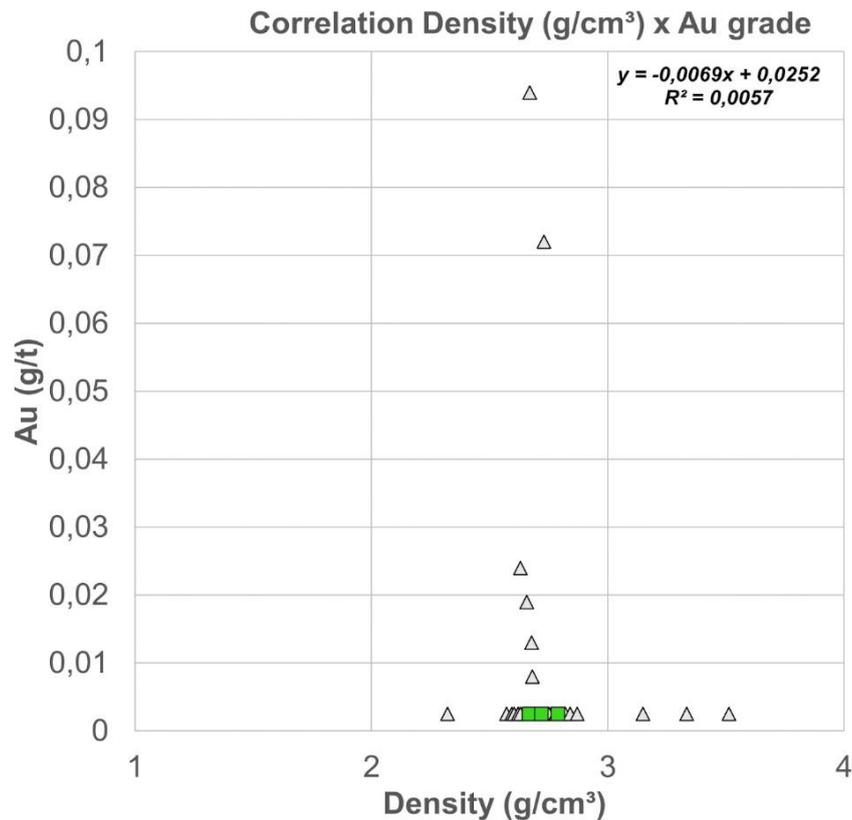


Figura 47.4 – Gráfico de correlação entre densidade (g/cm³) e teor de ouro (g/t). Destaque para o baixo coeficiente de determinação R² entre os parâmetros.

4.4 Análise Petrográfica, Alteração Hidrotermal e Geoquímica

Petrografia e Alteração Hidrotermal

A zona mineralizada da Anomalia BP (ABP) compreende enxames de veios de quartzo deformados envoltos por uma camada de mica hidrotermal (biotita e muscovita) onde cristais de pirita ocorrem disseminados, associados a óxidos de Fe e Fe-Ti. Essa rocha é produto da alteração hidrotermal de milonitos gerados pelo cisalhamento ao longo do contato entre o embasamento granítico e metassedimentos arcoseanos (metaconglomerado e metarenito) da Formação Fortuna e compreendem uma zona de forte alteração hidrotermal. As outras fases hidrotermais presentes incluem clorita, albita, feldspato potássico e carbonato (calcita). Marginalmente à zona de forte alteração hidrotermal que hospeda a mineralização, a associação das fases hidrotermais e a textura da rocha muda à medida que a rocha fica menos deformada. Outro aspecto que afeta a composição é o tipo de protólito, portanto abaixo é apresentada a descrição dos protólitos com pouca ou nenhuma alteração hidrotermal e as

variações mineralógicas observadas nas porções distais, intermediárias e próximas à zona mineralizada (Figura 48.4A-E).

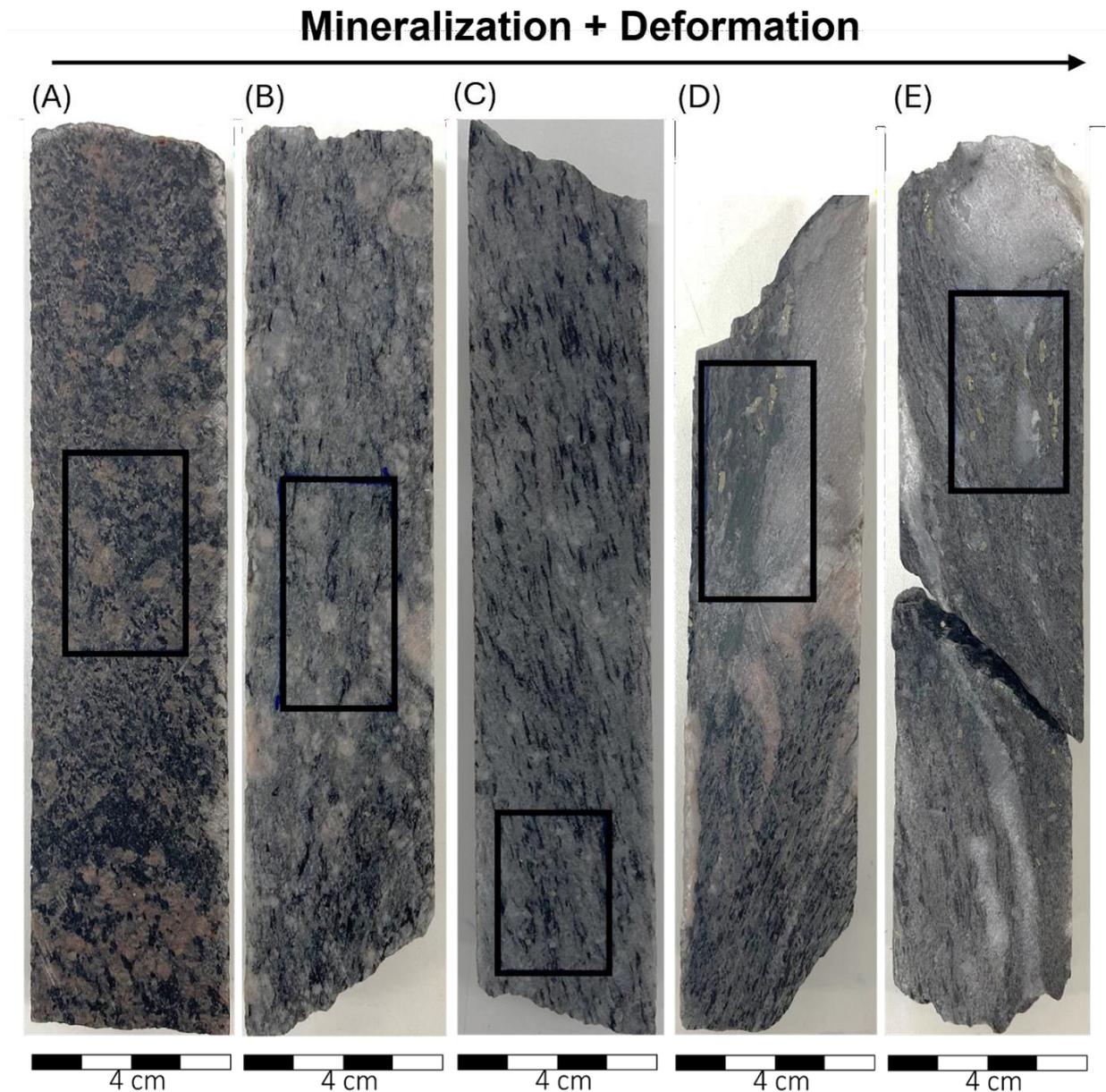


Figura 48.4 – Amostras dos furos de sondagem ABP0004 e ABP0009. (A) Granito maciço de cor marrom avermelhada (GRA), composto por cristais de feldspato (cm), quartzo, plagioclásio, biotita e epídoto. (B) Halo distal de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada, com foliação incipiente, caracterizada por uma matriz predominantemente maciça e níveis milimétricos compostos por fenocristais de quartzo, feldspato e minerais micáceos (*e.g.*, biotita e moscovita) orientados de acordo com o plano de “foliação.” Geralmente com ocorrências de vênulas preenchidas com quartzo e carbonato, além da presença de porfiroblastos de pirita. Observa-se uma concentração de carbonatação e cloritização. (C) Halo intermediário de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada a esbranquiçada, fortemente foliada, marcada por níveis alternados compostos de quartzo, feldspato e carbonatos. Presença de porfiroblastos de pirita > calcopirita e epídoto, além de minerais micáceos (*e.g.*, biotita e moscovita) orientados de acordo com a foliação. Observa-se uma concentração significativa de carbonatação, sericitização e cloritização. (D e E) Halo proximal de alteração hidrotermal: rocha de cor cinza esverdeada/esbranquiçada, foliada (com xistosidade bem-marcada) e de grão fino, composta por quartzo, carbonato e minerais micáceos alternados (biotita, moscovita, sericita e clorita), albita e óxidos de ferro.

Nota-se uma concentração forte e significativa de sericitização, carbonatação e, em menor medida, cloritização, além da sulfetação definida por pirita > calcopirita.

Granito (GRA)

Assim como descrito por Melo (2016), rochas da PIS ocorrem na porção sudeste da Província Alto Guaporé e compreendem *footwall* na Mina Pau-a-Pique e na Anomalia BP. As fácies variam de diorito no depósito Pau-a-Pique (Melo, 2016) a muscovita-biotita monzogranito porfirítico (maciço) na Anomalia BP. Essas rochas são encontradas nas porções mais rasas dos furos de sondagem estudados, possuem cor marrom avermelhada, granulação grossa, porfirítica, composta por feldspato (potássico), quartzo, plagioclásio, biotita e muscovita (Figura 49.4-A). Os cristais de feldspato potássico (30 a 40% da composição modal) ocorrem tanto na matriz, na forma de cristais anedrais com tamanho submilimétrico ou como grandes cristais porfiríticos com até 4cm de comprimento. O Plagioclásio (15 a 25% da composição modal) geralmente ocorre como cristais anedrais com geminação do tipo polissintética. A lâmina descrita é de uma rocha de composição sienogranítica com uma foliação gnáissica bem marcada dada pela orientação dos cristais de mica em torno dos cristais de feldspato potássico (Figura 49.4-B). A rocha também apresenta saussuritização dos feldspatos (Figura 49.4C-D) e, como a rocha apresenta grande quantidade de feldspato alcalino (feldspato potássico), em torno de 20-25% de quartzo sua classificação no QAP cai no campo dos monzogranitos a granodioritos.

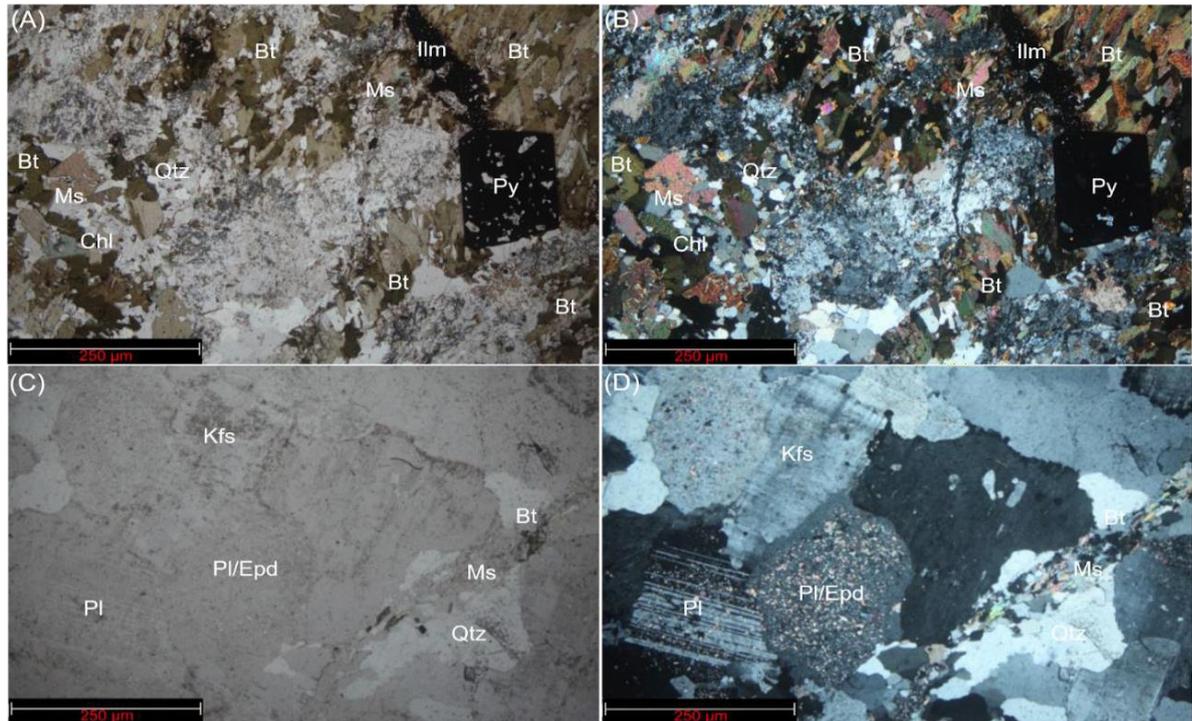


Figura 49.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (182,50 m), determinadas pela foliação gnáissica característica com cristais micáceos ao redor da matriz de feldspato potássico e quartzo. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (61,91 m), sendo o processo de saussuritização evidente no plagioclásio e a foliação incipiente determinada por minerais micáceos nos interstícios da matriz feldspática e de quartzo. *NX= Nicóis Cruzados; NP= Nicóis Paralelos.*

Dentro do mesmo contexto dos granitos (GRA) da SIP, foram evidenciados metagranitoides correlatos aos descritos na literatura como metatonalito ou tonalito Pau-a-Pique e Lavrinha (Geraldes, 2000; Geraldes et al., 2001; Ruiz, 2005). Subdivididos neste parágrafo para as porções mais distais e intermediárias de alteração hidrotermal dentro das rochas do embasamento e referente a proximidade da zona de cisalhamento e/ou contatos com os metassedimentos do Grupo Aguapeí.

Assim como nos estudos petrográficos de Melo (2016), preferiu-se seguir com a nomenclatura de diorito para unidade, devido a composição geral das rochas em questão.

Halo Distal

De forma geral, a rocha no halo distal, apresenta-se com coloração cinza-esverdeada, granulação fina a média, fanerítica, equi a inequigranular porfirítica, com estrutura foliada a milonítica incipiente determinada por minerais micáceos (biotita e muscovita) (Figura 50.4A-B). Em alguns casos é possível observar feições de textura porfirítica dado por fenocristais de plagioclásio. Os minerais presentes são quartzo, clorita, carbonato, plagioclásio, biotita, epídoto, hornblenda, ilmenita e pirita. Nas duas lâminas analisadas ocorrem cristais de

plagioclásio com geminação do tipo polissintética cobertos por uma massa de cristais de epidoto e carbonato associado (Figura 50.4-B e 50.4-D). Somados a isso ocorrem diversas vênulas de quartzo e carbonato. Algumas fácies apresentam textura porfírica com fenocristais de oligoclásio com geminação polissintética, que foram fortemente epidotizados.

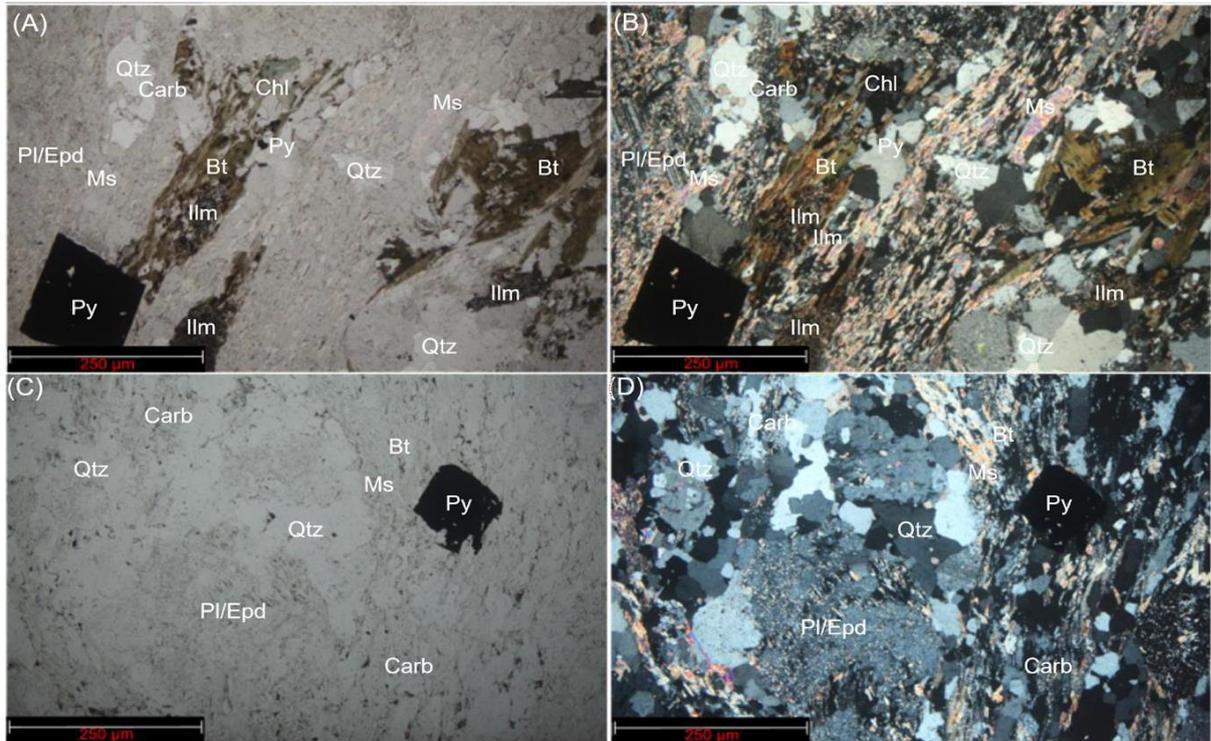


Figura 50.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (44,70 m), determinando uma estrutura foliada milonítica incipiente, marcada por minerais micáceos (biotita e moscovita), além de um aumento nos óxidos de ferro (*i.e.*, ilmenita). Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (108,73 m), onde o processo de saussuritização é evidente no plagioclásio e na foliação incipiente determinada por minerais micáceos nos interstícios da matriz quartzo-feldspática. *NX*= *Nicóis Cruzados*; *NP*= *Nicóis Paralelos*.

Halo Intermediário

O halo de alteração hidrotermal intermediário é heterogêneo, com rochas de composições mineralógicas semelhantes ao halo distal, porém podem variar muito em relação às suas texturas e proporção de tamanhos dos minerais. A rocha é de coloração cinza-esverdeado, fortemente foliada, marcada pela alternância de níveis compostos por quartzo, feldspato e carbonato com níveis milimétricos constituídos por minerais micáceos e porfiroblastos de pirita. Em alguns domínios quartzo-feldspáticos, predomina uma rocha de coloração cinza claro, com a foliação menos proeminente e de granulação fina, composta por minerais micáceos, carbonatos e pequenos grãos de ilmenita (Figura 51.4). Venulações preenchidas por quartzo e carbonato são comuns (Figura 51.4-B). A assembleia mineralógica

representativa do halo intermediário é composta predominantemente por quartzo (20-40%), clorita (20-25%), carbonato (20-30%), muscovita (10-15%), (10-15%), biotita (5%), ilmenita (5%) e sulfetos – pirita e calcopirita (<1%). Plagioclásio (5-15%) ocorre em meio a uma matriz fina e recristalizada e por vezes saussuritizado. Sericita (<15%) também pode ser observada em certos domínios. Este halo de alteração diferencia-se do halo distal pela predominância de cloritização, carbonatação e presença de óxidos de ferro (ilmenita e magnetita). Estes, aparecem à medida que se aproxima do halo proximal. Para melhor detalhamento do halo intermediário, os principais domínios identificados serão descritos separadamente. O primeiro domínio é caracterizado por uma rocha com a foliação bem- marcada pela orientação das lamelas de clorita, muscovita, biotita e sericita, definindo porções de textura lepidoblástica, além de carbonatação presente (51.4C-D). O segundo domínio é definido por níveis compostos predominantemente por quartzo e plagioclásio em matriz fina a média recristalizada e textura fanerítica fina (51.4, A-B). Epidoto, biotita, ilmenita, magnetita e sulfetos ocorrem em menores proporções. Neste domínio, o epidoto ocorre em pouca proporção como cristais anédricos e granulação fina, de maneira disseminada, assim como as lamelas de biotita e muscovita. Ilmenita se apresenta como pequenos bastonetes orientados de acordo com a foliação.

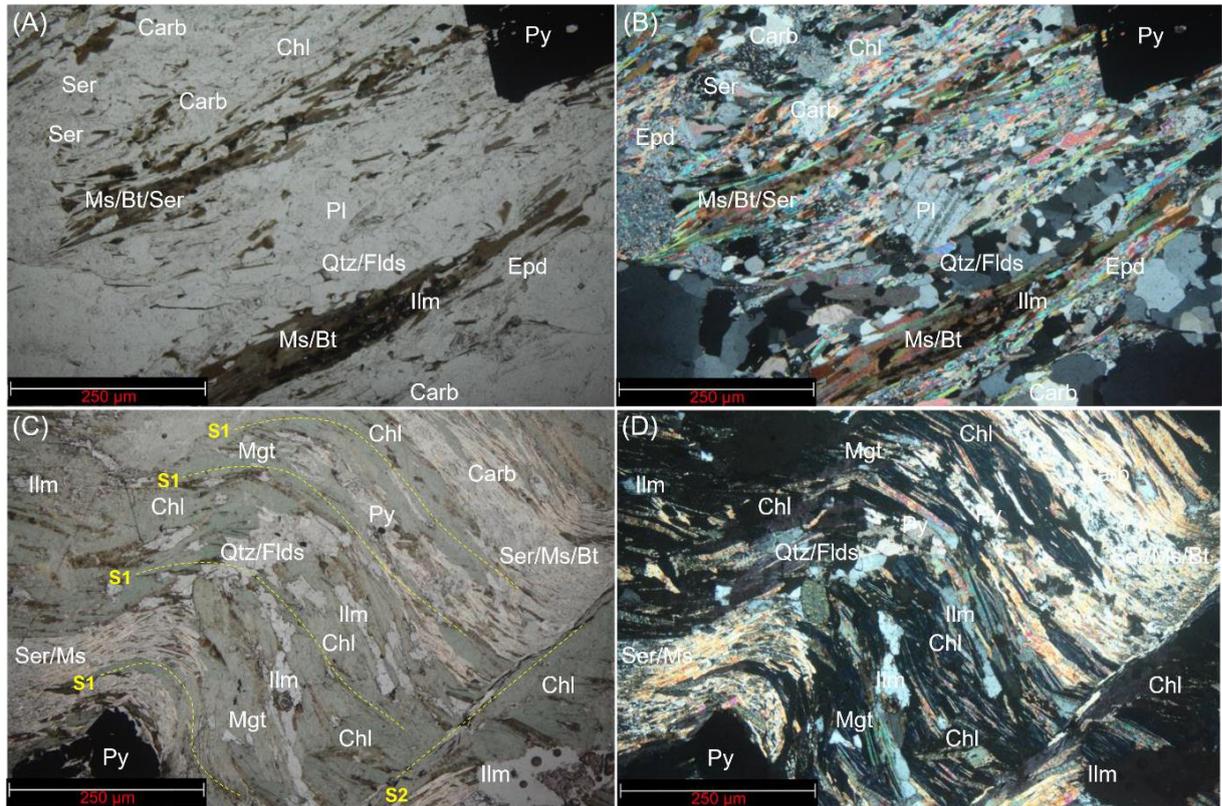


Figura 51.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (257,72 m), determinando uma estrutura fortemente foliada, caracterizada pela presença de minerais micáceos (biotita e moscovita), embora com características ígneas (quartzo-feldspato), com plagioclásio saussuritizado. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (101,18 m), determinadas por forte foliação (S1 e S2) e veios de quartzo associados, definidas por minerais micáceos e intensa cloritização, carbonatação e sericitização, além de aumento nos óxidos de ferro (*i.e.*, ilmenita e magnetita). NX= *Nicóis Cruzados*; NP= *Nicóis Paralelos*.

Halo Proximal

O halo de alteração hidrotermal proximal confere à rocha uma coloração cinza-esverdeada-esbranquiçada, foliada e de granulação predominantemente fina, composta por níveis e vênulas quartzosas milimétricos a centimétricos, intercalados com níveis constituídos por minerais micáceos. A mineralogia principal da rocha é constituída por mica branca (40-50%), quartzo (15-20%), clorita (10-15%), carbonato (5-10%) ilmenita/magnetita (5-10%), plagioclásio (5%), epídoto (<5%), albita (<1%), sulfetos (<1%) como pirita e calcopirita ocorrem em menores proporções como minerais acessórios e apatita (traço). A textura da rocha é caracterizada por domínios lepidoblásticos definidos pela orientação das lamelas de mica branca e clorita, em meio a uma matriz fina e recristalizada de quartzo e plagioclásio. O quartzo também ocorre de forma sigmoide, além de feições de migração de borda, extinção ondulante (deformações “sismos”) e sombras de pressão em porfiroblastos de pirita com extinção ondulante (Figura 52.4A-B), típicos de zonas miloníticas. A ilmenita ocorre com hábito prismático e orientada de acordo com a direção da foliação da rocha (Figura 52.4C-D). O epídoto ocorre associado aos feldspatos e rutilo ocorre disseminado como inclusões milimétricas e/ou

associados a sulfetação. O carbonato (calcita majoritariamente) ocorre como preenchimento na matriz (e.g., pervasivo) e em vênulas (e.g., fissural).

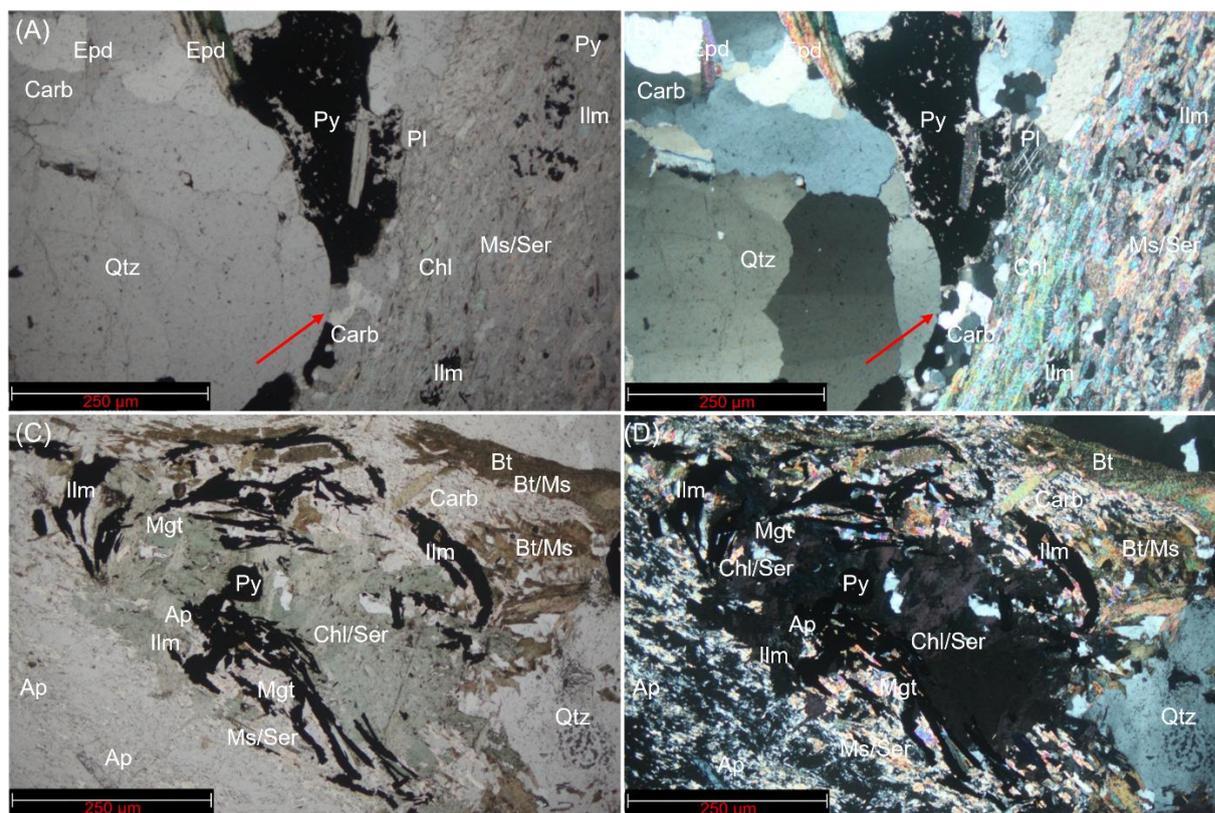


Figura 52.4 – Em (A e B), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0004 (285,74 m), determinando uma estrutura fortemente foliada, caracterizada por minerais micáceos (muscovita- sericita), e a seta vermelha destaca características de migração de borda, extinção ondulante (“deformações repetitivas”) e sombras de pressão em porfiroblastos de pirita com extinção ondulante. Em (C e D), características petrográficas (NX e NP) associadas ao furo ABP0009 (425,38 m), marcadas por forte foliação caracterizada por minerais micáceos e cloritização, carbonatação e sericitização, além de um aumento nos óxidos de ferro (ilmenita e magnetita) e apatita. NX= *Nicóis Cruzados*; NP= *Nicóis Paralelos*.

O halo proximal destaca-se em relação aos outros halos pelo enriquecimento em mica branca e óxidos de ferro (ilmenita e magnetita). E, assim como destacado por Melo (2016), a mineralogia é variável e parece depender tanto da intensidade da deformação quanto da composição inicial do protólito. Por vezes, micaxisto formado por cisalhamento de protólito metaluminoso (Ms+Bt+ Qtz + Cb + Chl+ Ap + Rt+ Ilm/Mag + Py) é reconhecido. Bt + Cb pode ser mais frequente em rochas dioríticas, enquanto a muscovita parece ser mais frequente nas tonalíticas. Os óxidos de ferro, como ilmenita, magnetita e hematita, indicam condições redox variadas durante a formação do depósito.

Geoquímica de Rocha Total

Amostras dos dois furos de sondagem estudados foram selecionadas para análise geoquímica (i.e., ABP0004 e ABP0009). Foram analisadas 1085 amostras ($\frac{1}{2}$ testemunho) de intervalos dos furos de sondagem, onde analisou-se, elementos, maiores, menores, traços e terras raras pelos métodos descritos no item 3.3. Os intervalos analisados são os mesmos intervalos selecionados para análise de teor de Au pelo método *Fire-Assay*, separados após a descrição dos testemunhos de sondagem. As rochas analisadas incluem desde granodiorito, granito e tonalito indeformado a pouco deformado com pouca evidência de alteração hidrotermal e que representam o protólito ígneo metaluminoso-peraluminoso que ocorre nas porções distais do depósito até biotita-muscovita xisto hidrotermal localizado nas porções proximais.

De forma geral, tanto as rochas das porções distais (granito, granodiorito inalterado), como as rochas das porções proximais (xistos hidrotermalizados) apresentam padrão de elementos terras raras (ETR) muito similar com alta concentração de elementos terras raras leves (LREE) e baixo fracionamento de HREE. Esse padrão é típico de suítes graníticas cálcio-alcalinas (Figura 53.4-A) formadas durante magmatismo de arco. Observa-se um leve empobrecimento em alguns LREE (i.e., Pr e Nd) em relação ao embasamento ígneo, sugerindo que pequenas perturbações na geoquímica desses elementos podem estar relacionadas ao processo de alteração e mobilidade dos elementos. Entretanto, esse padrão de ETR que mimetiza o padrão das rochas do embasamento, sugere que os elementos terras raras foram pouco móveis durante a alteração, provavelmente por estarem estocados em fases que foram menos susceptíveis a alteração, como por exemplo zircão, titanita e apatita.

Com relação aos elementos maiores e menores, são observadas diferenças relevantes nas concentrações de Rb, Na₂O, K₂O, CaO e SiO₂ (Fig. 53.4C-F). De maneira geral, observa-se um enriquecimento generalizado em K₂O das zonas distais para as zonas proximais do depósito, que tem relação com a alta concentração de muscovita e biotita e pela presença de feldspato potássico hidrotermal. Esse comportamento também é acompanhado pelo Rb que tende a substituir o K nos sítios dos cristais de mica e feldspato. Os elementos maiores, entretanto, são as amostras de protólitos que possuem composição compatíveis com rochas ígneas segundo Hughes's (1973) no diagrama da Figura 53.4-B. Estas são amostras não

deformadas de diorito máfico e granodiorito que tem composição metaluminosa sendo considerada a representação mais próxima da composição do protólito magmático.

Alguns dos principais elementos das amostras das zonas de cisalhamento apresentam uma diferença bem marcada na composição relacionada ao protólito e a maioria das amostras tende a ficar fora do campo de rochas ígneas não deformadas (Fig. 53.4-B). As principais diferenças são observadas no comportamento de Rb, Na₂O, K₂O, CaO e SiO₂ (Fig. 53.4C-F).

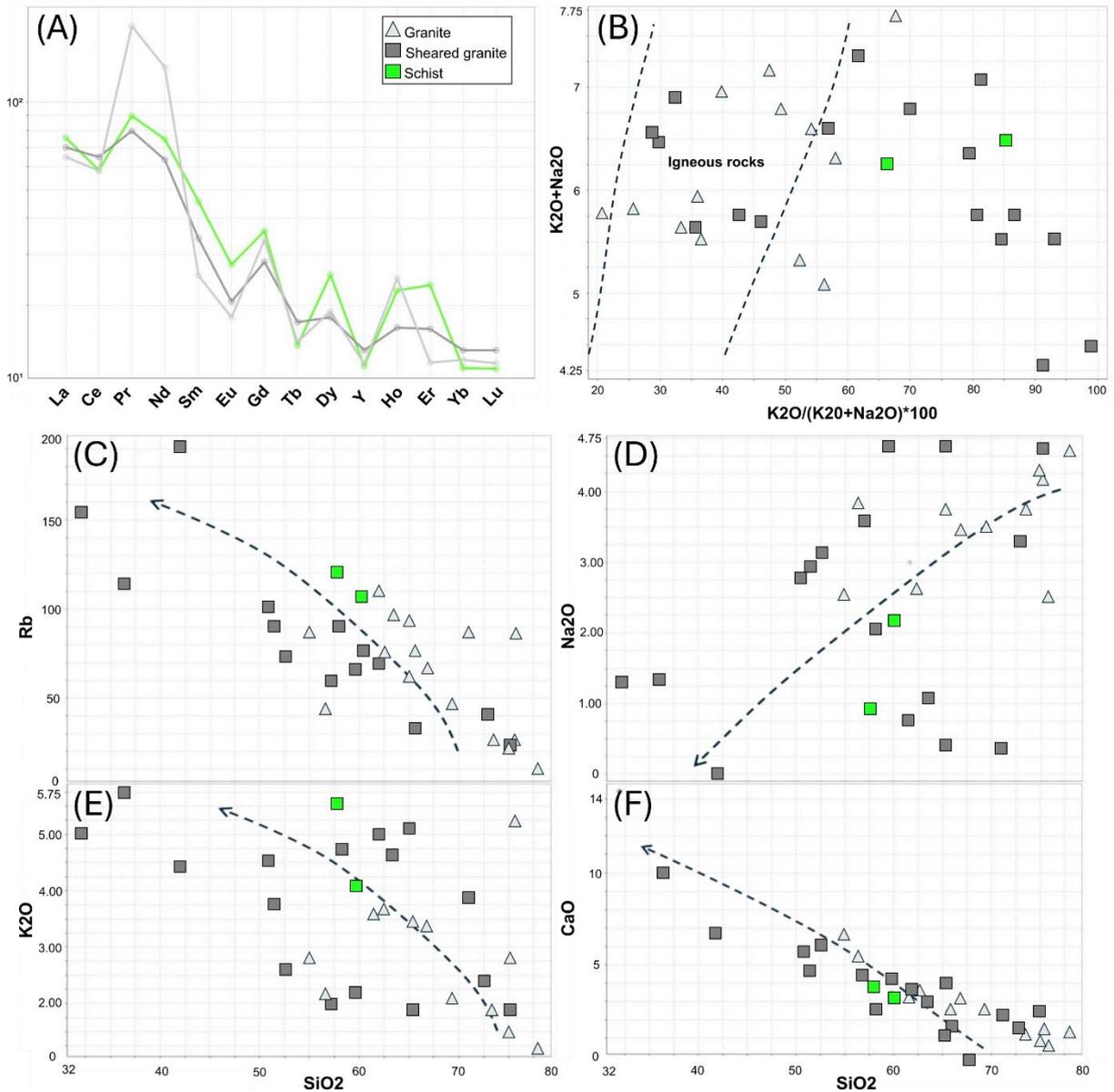


Figura 53.4 – Diagramas químicos seguindo a ordem lógica mencionada acima. (A): Diagrama ETR normalizado por condrito de Sun e McDonough (1989); (B): Composição total da rocha no diagrama (Na₂O + K₂O) versus K₂O/(K₂O + Na₂O) (% em peso) (Hughes, 1973); (C, D, E e F): Diagramas de Hacker de SiO₂ versus Rb, Na₂O, K₂O e CaO. (Baseado em Melo, 2016).

5 Discussão

Transformações Metamórficas e Metassomáticas

Assim como relatado por Melo (2016), o comportamento geoquímico e mineralógico em zonas de cisalhamento sugere que fluidos hidrotermais desempenharam um papel crucial nas transformações das rochas protólito. Pode-se observar correlações positivas entre Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 , Rb, CaO e Na_2O , indicativas de processos de alteração que afetam minerais como feldspatos, biotita e muscovita, assim como relatado para o metassomatismo associado a ouro orogênico em outros contextos.

Groves et al. (1998) e Goldfarb et al. (2005) destacam que a mineralização de ouro orogênico é frequentemente associada à alteração sericítica (*i.e.*, substituição de feldspato por sericita) e ao enriquecimento em potássio. Essas transformações são coerentes com as observadas na ABP e em Pau-a-Pique, onde o aumento de muscovita e biotita pode ser atribuído a fluidos ricos em K derivados de rochas metassedimentares próximas, um processo também descrito em contextos de zonas de cisalhamento em depósitos birimianos da África Ocidental (*e.g.*, Hein, 2010).

A presença de muscovita, biotita, epidoto e clorita nas zonas proximais e intermediárias denota um ambiente metamórfico de grau mais baixo, refletindo a associação da alteração hidrotermal. Goldfarb et al. (2005) também relatam que esses depósitos frequentemente evoluem a partir de condições metamórficas que geram zonas de alteração proximais ricas em micas brancas e carbonato.

Mobilidade dos Elementos

A mobilidade de SiO_2 , K_2O e CaO parece estar relacionada à formação de venulações e recristalização de feldspatos, carbonatos e quartzo, assim como para Melo (2016). Estudos como os de Ridley (2013) enfatizam que a circulação de fluidos hidrotermais através de zonas de cisalhamento conduz à desestabilização de plagioclásios, resultando em transformação para minerais mais estáveis, como albita e calcita. A substituição de plagioclásio por epidoto e carbonato na zona distal é um exemplo clássico da redistribuição de cálcio em ambientes hidrotermais, enquanto o enriquecimento em muscovita na zona proximal destaca o papel dos

fluidos ricos em K, frequentemente mencionados em depósitos de ouro orogênico como no Abitibi Greenstone Belt (Robert et al., 2005).

O aumento de CaO associado à depleção de SiO₂ no sistema, em contraste com o comportamento registrado por Melo (2016), pode estar relacionado a diferentes processos geológicos. Uma hipótese envolve o aumento da carbonatação, onde o cálcio é reintroduzido na forma de carbonatos (*i.e.*, calcita ou dolomita). Nesse contexto, fluidos hidrotermais ricos em CO₂ podem alterar os minerais silicáticos, como plagioclásios e feldspatos potássicos, levando à precipitação de carbonato e uma depleção relativa de sílica.

Outro processo pode estar relacionado à dissolução e recristalização de minerais ricos em cálcio (*i.e.*, epidoto ou anfibólios cálcicos) em ambientes de baixa atividade de sílica, onde a mobilização de cálcio pode ocorrer de forma mais pronunciada. Isso é típico em ambientes de baixa temperatura ou ao longo de zonas de cisalhamento, onde a sílica é preferencialmente removida por fluidos, e o cálcio é estabilizado em novos minerais. Esses processos de carbonatação, dissolução seletiva e mobilização de Ca são comuns em sistemas hidrotermais, especialmente em zonas de cisalhamento e áreas de deformação intensa, onde a interação fluido-rocha favorece a introdução de componentes químicos específicos (Ferry, 1991; Harlov & Austrheim 2013).

O aumento de K₂O é comumente associado à alteração sericítica. Os feldspatos, principalmente plagioclásios ricos em cálcio e sódio, são alterados para minerais de argila e mica ricos em potássio, como a sericita e a muscovita. Essa alteração é típica em sistemas hidrotermais próximos a zonas de cisalhamento ou em zonas de alteração mais intensa (Pirajno, 2009).

De forma geral, o Rubídio (Rb) acompanha o potássio em minerais como feldspato potássico e micas (como biotita e muscovita), explicando o incremento do elemento no sistema do ABP. O comportamento geoquímico do Rb é muito semelhante ao do K, atuando na substituição do potássio na estrutura cristalina dos minerais. Portanto, à medida que o K₂O aumenta, o Rb também tende a se concentrar em minerais potássicos (Groves et al. 1998; Goldfarb et al. 2005).

Alteração a Muscovita

Dados de diagrama molar Na/Al vs K/Al indicam uma forte predominância de muscovita, presenciada pela intensa alteração de muscovita associada à zona de cisalhamento (Figura 54.4-A). A predominância de muscovita junto a plagioclásio e K-feldspato também sugere que a alteração foi controlada pela química dos fluidos hidrotermais interagindo com as rochas do protólito. O empobrecimento de Na sugere a destruição de plagioclásios sódicos durante os eventos hidrotermais, enquanto o enriquecimento em K reflete a introdução de potássio e a estabilização de muscovita em condições de alteração intermediária a avançada.

Além disso, as amostras do protólito deformado e do xisto hidrotermalizado posicionam-se preferencialmente no campo da muscovita no diagrama ternário Al-K-Mg (Figura 54.4-B), que é caracterizada por assembleias de minerais como muscovita, sericita e quartzo. A presença de muscovita indica um ambiente com introdução de potássio, refletindo um aumento em K_2O associado a essas transformações, descritas previamente.

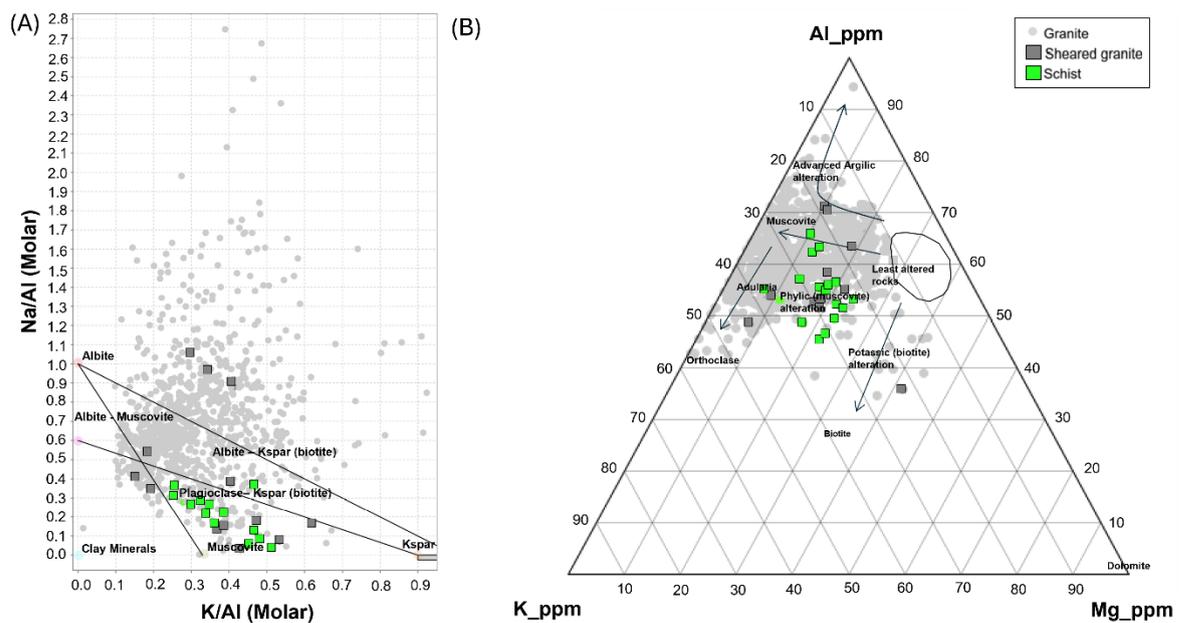


Figura 54.4 – Diagramas químicos associados à alteração hidrotermal do alvo Anomalia BP. (A): Diagrama molar Na/Al vs K/Al (Modificado de Davies & Whitehead, 2006) e (B): Diagrama ternário Al-K-Mg (Scott Halley, 2016).

A Zona de Cisalhamento Corredor é responsável pelo principal controle da mineralização do alvo Anomalia BP. A estrutura ocorre próximo ao contato entre o embasamento granítico Mesoproterozoico e pacote metassedimentar siliciclástico Meso-Neoproterozoico e este contato é caracterizado por uma falha inversa regional de alto ângulo com direção de aproximadamente N20°–W50° com vergência para nordeste, com registros de intensa alteração hidrotermal associada. O halo externo de alteração é dominado pelo processo de epidotização, sendo representado por uma assembleia composta por plagioclásio + biotita + k-feldspato ± epídoto ± quartzo ± carbonato.

O halo intermediário indica alteração de clorita ± muscovita ± quartzo ± epídoto, sendo caracterizado pelo aparecimento de mica branca, acompanhado pela alteração dos plagioclásios em epídoto e mica branca, além do surgimento do carbonato e óxidos de ferro (ilmenita ± magnetita).

O halo proximal define-se pela alteração fílica muscovita + quartzo + epídoto + clorita + ilmenita ± magnetita, somado ao incremento de óxido de ferro e aparecimento da apatita. Neste contexto, a pirita é o sulfeto característico e a ocorrência de ouro concentra-se em veios de quartzo e inclusões em porfiroblastos de pirita (Figura 55.4).

Além disso, a pirita geralmente ocorre como porfiroblasto e geralmente compreende menos de 5% da composição modal. Ele mostra evidências de crescimento sin-tectônico tardio dado por sombra de pressão e zoneamento textural. O xisto muscovítico hospeda outro tipo de veios de quartzo caracterizado por um enxame de veios centimétricos de formato sigmoidal formados por quartzo translúcido. É evidente que os veios de quartzo foram sujeitos a repetidas deformações rúpteis-dúcteis à medida que o sistema de veios foi desenvolvido, bem como após a colocação. No microscópio, é indicada deformação repetida por zonas comuns de deformação de extinção ondulatória exibindo vários graus de tamanho de grão redução e crescimento de quartzo fibroso na sombra de pressão de porfiroblastos de pirita (Melo et al., 2022).

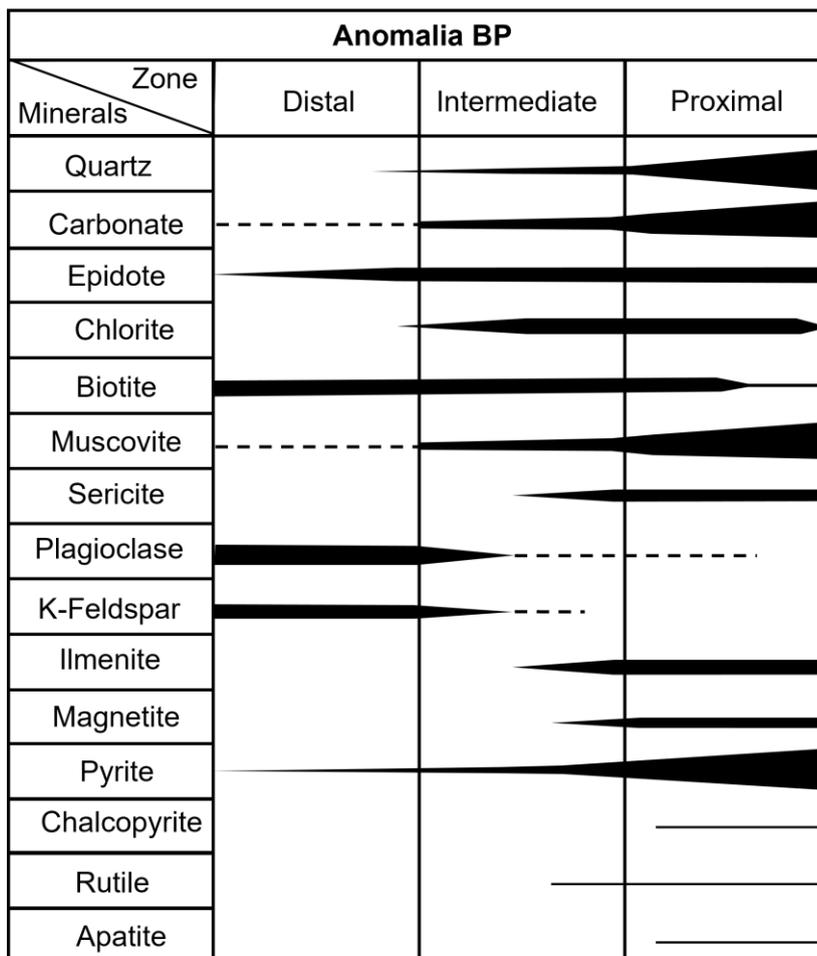


Figura 55.4 – Diagrama de evolução paragenética do alvo Anomalia BP, de acordo com as zonas de alteração hidrotermal.

No presente trabalho, não foram realizados estudos termo-barométricos para definição das condições de pressão e temperatura do fluido hidrotermal atuante no alvo Anomalia BP.

Com base nos dados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que os *footprints* do alvo Anomalia ABP (Figuras 56.4 e 57.4) são caracterizados por halos de alteração hidrotermal distal, intermediário e proximal, definidos predominantemente pelos processos de cloritização,

sericitização e carbonatação/silicificação, respectivamente. Esses processos também são evidenciados pelos dados geoquímicos, onde observa-se um aumento em SiO_2 , CaO , K_2O , TiO_2 e Al_2O_3 dentro dos halos de alteração, acompanhando as variações mineralógicas. A geoquímica também destacou a correlação positiva com alguns elementos *pathfinders* dentro das zonas de alteração, como Ca, K_2O , Rb e Ba (*i.e.*, elementos maiores e litófilos), associados ao ouro orogênico (Goldfarb et al., 2005). Em relação às propriedades físicas das rochas, não foram observadas grandes anomalias no alvo Anomalia BP, embora tenha sido identificado um intervalo de densidade entre 2,6 e 2,8 g/cm^3 nas amostras mineralizadas e baixa susceptibilidade magnética nas zonas de silicificação e/ou veios de quartzo. Além disso, houve um incremento nos valores de potássio (cps e %), associado à sericitização e sulfetação nas amostras mais enriquecidas em ouro.

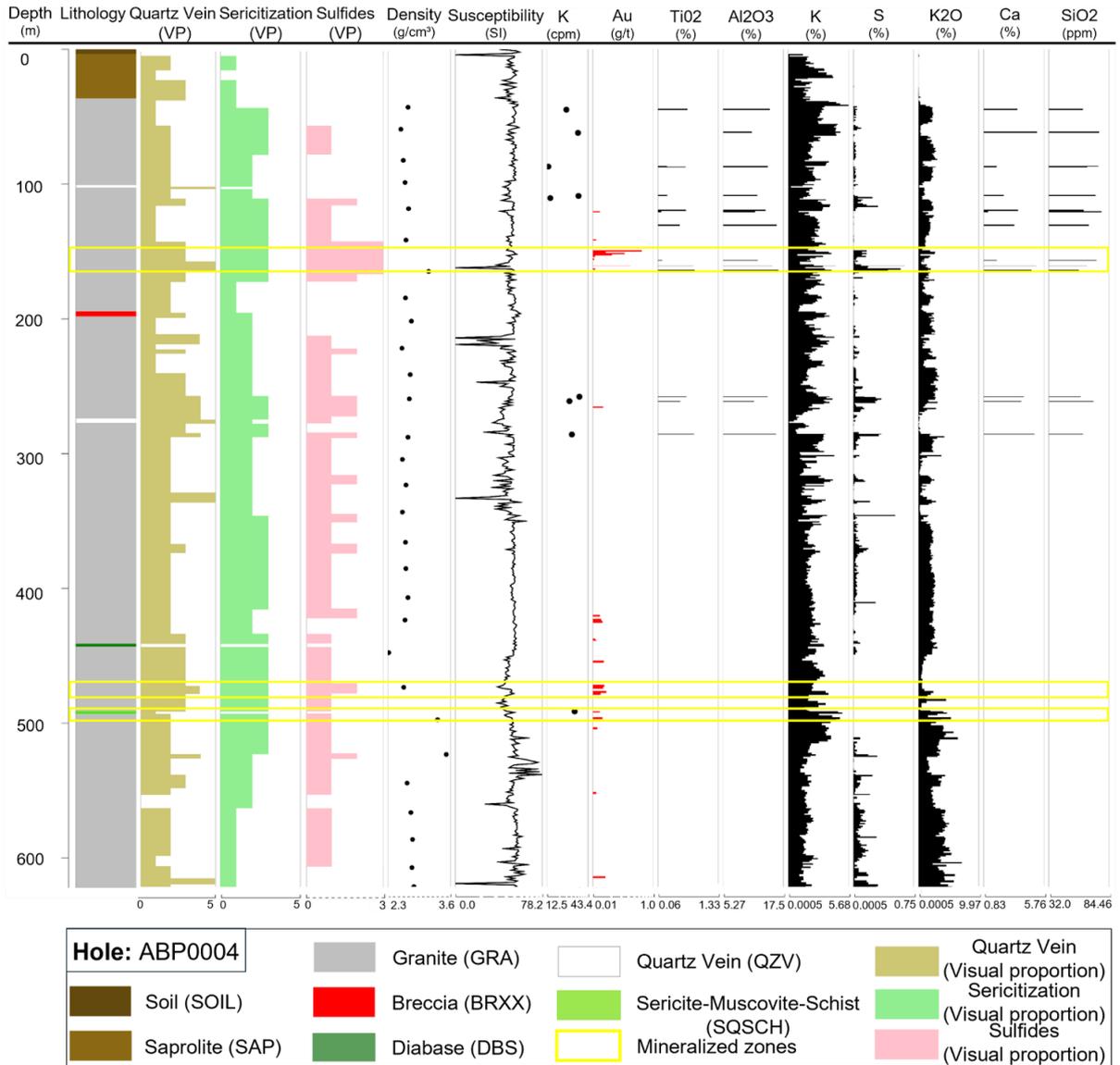


Figura 56.4 – Compilação de dados petrofísicos e geoquímicos caracterizando o Alvo de Anomalia BP conforme furo ABP0004. Destacando as estimativas visuais da presença de veios de quartzo e da extensão das alterações de sericitização e sulfetação, onde 0 representa ausência de presença e 5 representa forte alteração e/ou forte presença. Para sulfetos (frescos), a escala vai de 0 a 3, onde 1 é uma baixa proporção de sulfetos e granulometria fina e 3 uma alta proporção de sulfeto e granulometria grossa.

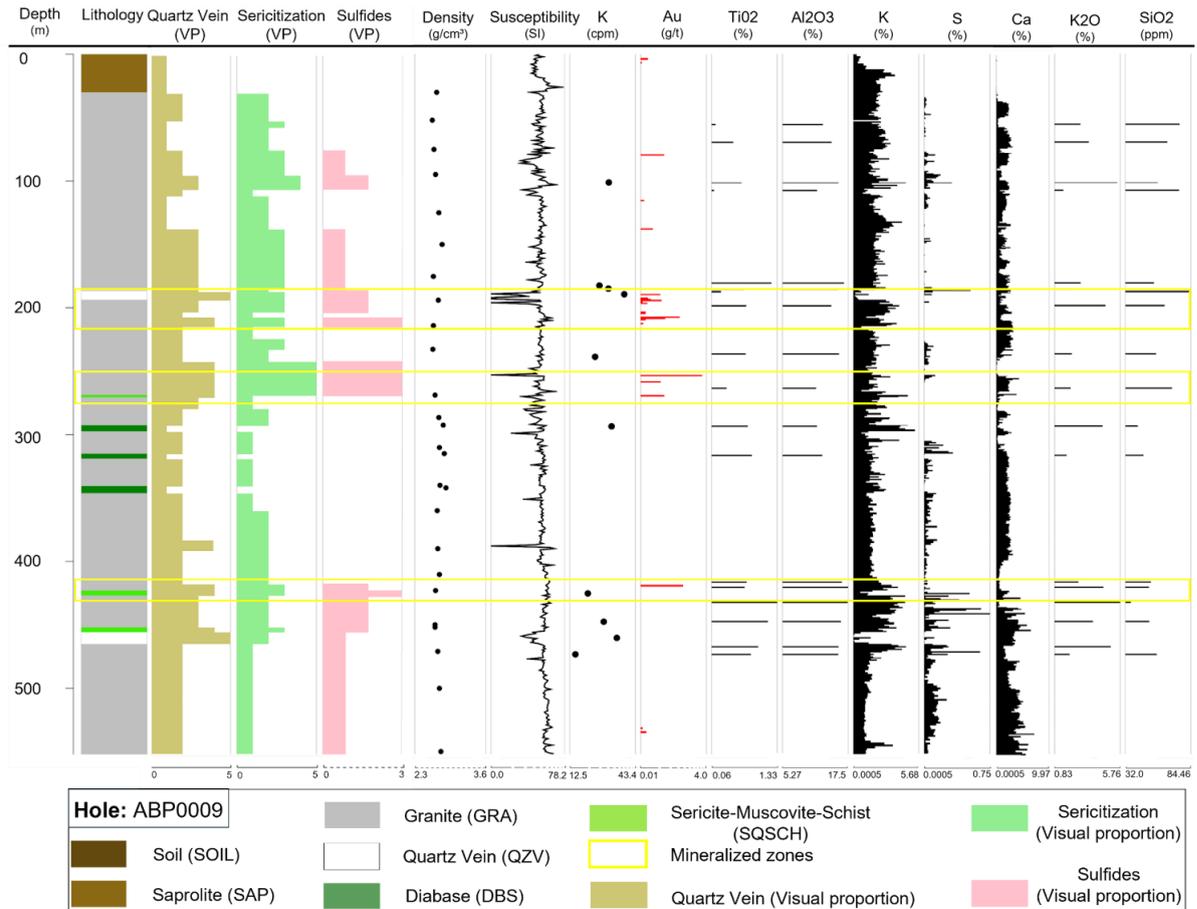


Figura 57.4 – Compilação de dados petrofísicos e geoquímicos caracterizando o Alvo de Anomalia BP conforme furo ABP0009. Destacando as estimativas visuais da presença de veios de quartzo e da extensão das alterações de sericitização e sulfetação, onde 0 representa ausência de presença e 5 representa forte alteração e/ou forte presença. Para sulfetos (frescos), a escala vai de 0 a 3, onde 1 é uma baixa proporção de sulfetos e granulometria fina e 3 uma alta proporção de sulfeto e granulometria grossa.

6 Conclusões

A integração de dados de susceptibilidade magnética, gamaespectrométricos, de densidade, geoquímicos e geológicos tem se mostrado cada vez mais essencial para a identificação e caracterização dos *footprints* de zonas mineralizadas em terrenos com depósitos de ouro orogênico em diferentes escalas. A combinação dessas técnicas permite análises robustas associadas ao potencial para áreas mineralizadas, aprimorando a definição e a compreensão dos depósitos. Estudos recentes destacam que a interação de dados de susceptibilidade magnética e gamaespectrométricos com análises geoquímicas, assim como a integração de dados de densidade e geologia de campo, proporciona uma ampla vetorização das

zonas mineralizadas, otimizando a exploração e modelagem em depósitos de ouro orogênico (Kosiak et al., 2022; Hronsky et al., 2023; Harris et al., 2024).

As características e/ou assinaturas associadas ao alvo Anomalia BP podem assim ser definidas:

i) Em escala regional, as porções limítrofes e/ou de contatos irregulares entre o Domínio radiométrico I (Figura 34.4) e com anomalias magnéticas lineares de comprimento de onda curto (*i.e.*, Metassedimentos do Grupo Aguapeí) e o Domínio radiométrico II (Figura 34.4) e de caráter magnético dipolar positivo (*i.e.*, Granitos da Suíte Intrusiva Pindaituba e Santa Helena), principalmente ao longo da direção NW (*e.g.*, Zona de Cisalhamento Corredor) e zonas de confluência de dobras regionais, representam armadilhas tectono-estruturais significativas para migração de fluidos hidrotermais;

ii) Halo Distal: Dominado pela epidotização, com a composição mineral representada por plagioclásio (Pl), biotita (Bt), feldspato potássico (Kfs), \pm epídoto (Ep), \pm quartzo (Qtz) e \pm carbonato (Carb). Halo Intermediário: Caracterizado por alteração de clorita (Chl) \pm muscovita (Ms) \pm quartzo (Qz) \pm epídoto (Ep). Inclui o aparecimento de mica branca (Ms), alteração dos plagioclásios (Pl) em epídoto (Ep) e mica branca (Ms), além do surgimento de carbonato (Carb) e óxidos de ferro como ilmenita (Ilm) \pm magnetita (Mt). Halo Proximal: Definido pela alteração fílica com muscovita (Ms), quartzo (Qtz), epídoto (Ep), clorita (Chl) e ilmenita (Ilm) \pm magnetita (Mt). Há um aumento na quantidade de óxidos de ferro e a presença de apatita (Ap). A pirita (Py) é o sulfeto característico, e o ouro (Au) se concentra em veios de quartzo (Qtz) e inclusões em porfiroblastos de pirita (Py).

iii) Os dados geoquímicos denotam um aumento em SiO₂, CaO, K₂O, TiO₂ e Al₂O₃, que acompanha as variações mineralógicas. Elementos farejadores como Ca, K₂O, Rb, Li, Tl e Ba demonstraram correlação positiva, sugerindo associação com ouro orogênico.

iv) Em termos petrofísicos, embora não tenham sido detectadas grandes anomalias nas propriedades físicas das rochas, as amostras mineralizadas apresentaram densidade entre 2,6 e 2,8 g/cm³, além de baixa susceptibilidade magnética nas zonas de silicificação e abundância de veios de quartzo. Além de incremento nos valores de potássio correlacionando-se com sericitização e sulfetação nas amostras anômalas em ouro.

Na Província Aurífera Alto Guaporé, as áreas mineralizadas mostram uma clara associação com fluidos hidrotermais, o que também foi observado no alvo de estudo, conhecido como Alvo Anomalia BP. Essa relação é evidenciada por transformações mineralógicas e

geoquímicas, identificadas a partir da análise integrada de dados petrográficos, geoquímicos e petrofísicos.

Referências

ADETUNJI, Ademola Q.; LAUNAY, Gaetan; FERGUSON, Ian J.; SIMMONS, Jack M.; MA, Chong; AYER, John; LAFRANCE, Bruno. Crustal conductivity footprint of the orogenic gold district in the Red Lake greenstone belt, western Superior craton, Canada. **Geology**, v. 51, n. 4, p. 377–382, 2023.

AISENGART, T.; BARBOSA, D.; PITHAWALA, T.; PEREIRA, J.; PORTO, C.; ANDO, J.L.; RECHAND, M.; JOHNSON, A. High resolution inversion of the magnetization vector in the Pontes e Lacerda area of southwestern Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysics**, v. 38, p. 159–164, 2017.

ARMISTEAD, S. et al. Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago Region, New Zealand. **Economic Geology**, v. 101, n. 8, p. 1525–1543, 2006.

BETTENCOURT, J. S.; LEITE, W. B.; RUIZ, A. S.; MATOS, R.; PAYOLLA, B. L.; TOSDAL, R. M. The Rondonian-San Ignacio Province in the SW Amazonian Craton: An overview. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 28–46, 2010.

BOHLKE, J. K. Comparison of metasomatic reactions between a common CO₂-rich vein fluid and diverse wall rocks: intensive variables, mass transfers, and Au mineralization at Alleghany, California. **Economic Geology**, v. 84, n. 2, p. 291–327, 1989. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.2.291>.

BOYLE, R. W. The geology, geochemistry, and origin of the gold deposits of the Yellowknife district. **Geological Survey of Canada**, Memoir 310, 193 p., 1961.

CLARK, M. E.; CARMICHAEL, D. M.; HODGSON, C. J.; FU, M. Wall-rock alteration, Victory gold mine, Kambalda, Western Australia: Processes and P-T-XCO₂ conditions of metasomatism. **Economic Geology Monograph**, n. 6, p. 445–459, 1989.

CEZAR, P. A. **Caracterização Deformacional e Metamórfica do Cinturão Móvel Aguapeí nas Serras do Caramujo e Salto do Aguapeí-SW de Mato Grosso**. Relatório de Graduação. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2004.

CPRM - **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Aerogeofísico Mato Grosso - Área 2: Relatório final**. Brasília, 2008.

D'AGRELLA-FILHO, M. S.; TOHVER, E.; SANTOS, J. O. S.; ELMING, S. A.; TRINDADE, R. I. F.; PACCA, I. I. G.; GERALDES, M. C. Direct dating of paleomagnetic results from Precambrian sediments in the Amazon craton: Evidence for Grenvillian emplacement of exotic crust in SE Appalachians of North America. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 267, p. 188–199, 2008.

DAVIES, A. G. S.; WHITEHEAD, R. E. S. Fluid-rock interactions in hydrothermal systems: Implications for alteration processes and mineral deposit formation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 90, p. 58-76, 2006.

DI, Qingyun et al. Lithospheric structures across the Qiman Tagh and western Qaidam Basin revealed by magnetotelluric data collected using a self-developed SEP system. **Science China Earth Sciences**, v. 64, p. 1813-1820, 2021.

ECHAGUE, J.; LEÃO-SANTOS, M.; MELO, R.; MENDES, T.; BORGES, W. Application of geophysical methods in the identification of mineralized structures and ranking of areas for drilling as exemplified by Alto Guaporé Orogenic Gold Province. **Minerals**, v. 14, p. 788, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14080788>.

EILU, P. K.; MATHISON, C. I.; GROVES, D. I.; ALLARDYCE, W. J. Atlas of alteration assemblages, styles and zoning in orogenic lode-gold deposits in a variety of host rock and metamorphic settings. **The University of Western Australia Publication**, v. 30, p. 50, 1999.

FERNANDES, C. J.; PULZ, G. M.; KUYUMJIAN, R. M.; PINHO, F. E. C. Diferenças entre os depósitos auríferos do Grupo Aguapeí (Estado de Mato Grosso) e os clássicos exemplos de ouro em conglomerados. **Pesquisa em Geociências-UFRGS**, v. 32, p. 10, 2005.

FERNANDES, C. J.; KUYUMJIAN, R. M.; PULZ, G. M.; GERALDES, M. C.; PINHO, F. E. C. Geologia estrutural e idade $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ do depósito Pau-a-Pique, Faixa Móvel Aguapeí, sudoeste do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, p. 13, 2006a.

FERNANDES, C. J.; KUYUMJIAN, R. M.; MOURA, M. A.; BARBOZA, E. S.; PULZ, M. G. Tipologia dos veios de quartzo e estudo de inclusões fluidas nos depósitos de ouro da Faixa Móvel Aguapeí–Cráton Amazônico–Mina de São Vicente, Região da Lavrinha e Pau-a-Pique. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, Suplemento S1, p. 59–70, 2006.

FERRY, J. M. Dehydration and decarbonation reactions as a record of fluid infiltration. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 26, p. 351-393, 1991.

GERALDES, M. C.; FIGUEIREDO, B. R.; TASSINARI, C. C. G.; EBERT, H. D. Middle Proterozoic vein-hosted gold deposits in the Pontes e Lacerda region, southwestern Amazonian Craton, Brazil. **International Geology Review**, v. 39, p. 438-448, 1997.

GERALDES, M. C.; NOGUEIRA, C.; VARGAS-MATTOS, G.; MATOS, R.; TEIXEIRA, W.; VALENCIA, V.; RUIZ, J. U–Pb detrital zircon ages from the Aguapeí Group (Brazil): Implications for the geological evolution of the SW border of the Amazonian Craton. **Precambrian Research**, v. 244, p. 306–316, 2014.

GERALDES, M. C.; VAN SCHMUS, W. R.; CONDIE, K. C.; BELL, S.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian craton in Mato Grosso state, Brazil. **Precambrian Research**, v. 111, p. 91–128, 2001.

GOLDFARB, R. J.; BAKER, T.; DUBÉ, B.; GROVES, D. I.; HART, C. J. R.; GOSSELIN, P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. **Economic Geology**, 100th Aniv., p. 407–450, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5382/av100.14>.

GOLDFARB, R. J.; GROVES, D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. **Lithos**, v. 233, p. 2–26, 2015.

GOLDFARB, R. J.; LEACH, D. L.; MILLER, M. L.; PICKTHORN, W. J. Geology, metamorphic setting, and genetic constraints of epigenetic lode-gold mineralization within the Cretaceous Valdez Group, south-central Alaska. **Geological Association of Canada Special Paper**, v. 32, p. 87–105, 1986.

GROVES, D. I.; GOLDFARB, R. J.; GEBRE-MARIAM, M.; HAGEMANN, S. G.; ROBERT, F. Orogenic gold deposits—a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. **Ore Geology Reviews**, v. 13, p. 7–27, 1998.

GROVES, D. I.; SANTOSH, M.; ZHANG, L. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach. **Geoscience Frontiers**, v. 11, p. 719–738, 2020.

HALLEY, S. Hydrothermal processes and mineralization: Insights from field studies and experimental investigations. **Journal of Economic Geology**, v. 111, n. 1, p. 1-20, 2016.

HARRIS, J.; WILKE, D.; LIANG, H. Field geology combined with geochemical and geophysical data for orogenic gold deposit exploration. **Economic Geology**, v. 119, n. 2, p. 247-266, 2024.

HARLOV, D.; AUSTRHEIM, H. Metasomatism and the chemical transformation of rock. **Springer**, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-28394-9.

HEIN, K. A. A. Birimian greenstone belts hosting gold deposits in West Africa. **SEG Special Publication**, v. 15, p. 137-152, 2010.

HRONSKY, J.; ROSMAN, N.; SCHAEFER, M. Combining density and geochemical analysis for improved gold orebody characterization. **Ore Geology Reviews**, v. 139, p. 104582, 2023.

HUGHES, C. J. Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. **Geological Magazine**, v. 109, p. 513-527, 1973.

KERRICH, R. Geodynamic setting and hydraulic regimes: shear zone hosted mesothermal gold deposits. In: BURNSNALL, J. T. (Ed.). **Mineralization and shear zones**. Geological Association of Canada Short Course Notes 6, p. 89–128, 1989.

KOSIAK, S.; ABZALOV, M.; PATEL, M. Magnetic susceptibility and gamma-ray spectrometry integration for gold exploration in orogenic terrains. **Journal of Applied Geophysics**, v. 195, p. 104546, 2022.

JÁCOMO, Marta Henriques. Associação de magnetometria, gamaespectrometria, geoquímica e petrografia para modelamento tridimensional da mineralização de nióbio do depósito Morro

do Padre, Goiás, Brasil. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LEITE, J. A. D.; SAES, G. S. Geology of the southern Amazon craton in southwestern Mato Grosso, Brazil: A review. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 91–94, 2000.

LITHERLAND, M.; ANNELLS, R. N.; DARBYSHIRE, D. P. F.; FLETCHER, C. J. N.; HAWKINS, M. P.; KLINCK, B. A.; MITCHELL, W. I.; O'CONNOR, E. A.; PITFIELD, P. E. J.; POWER, G.; et al. The proterozoic of eastern Bolivia and its relationship to the Andean mobile belt. **Precambrian Research**, v. 43, p. 157–174, 1989.

LITHERLAND, M.; ANNELLS, R. N.; APPLETON, J. D.; BERRANGE, J. P.; BLOOMFIELD, K.; BURTON, C. C.; DARBYSHIRE, D. P. F.; FLETCHER, C. J. N.; HAWKINS, M. P.; KLINCK, B. A.; LLANOS, A.; MITCHELL, W. I.; O'CONNOR, E. A.; PITFIELD, P. E.; POWER, G.; WEBB, B. C. The geology and mineral resources of the Bolivian Precambrian Shield. **Keyworth Overseas Memoir**, v. 9, British Geological Survey, 153 p., 1986.

LITHERLAND, M.; BLOOMFIELD, K. The Proterozoic history of eastern Bolivia. **Precambrian Research**, v. 15, p. 157–179, 1981.

LOVBØRG, L.; MOSE, E. Counting statistics in radioelement assaying with a portable spectrometer. **Geophysics**, v. 52, n. 4, p. 555–563, 1987. In: Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data. **IAEA**, Vienna, 2003.

MATOS, J. B. D.; SCHORSCHER, J. H. D.; GERALDES, M. C.; SOUZA, M. Z. A. D.; RUIZ, A. S. Petrografia, Geoquímica e Geocronologia das Rochas do Orógeno Rio Alegre, Mato Grosso: Um Registro de Crosta Oceânica Mesoproterozóica no SW do Cráton Amazônico. **Revista do Instituto de Geociências-USP**, v. 4, p. 75–90, 2004.

MELO, R. P. D. **Caracterização do metamorfismo da Faixa Móvel Aguapeí e sua relação com a gênese dos depósitos de ouro da região de Pontes e Lacerda-MT**. 2016. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

MELO, R. P. D.; OLIVEIRA, M. A. F. D.; GOLDFARB, R. J.; JOHNSON, C. A.; MARSH, E. E.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, L. R.; MORGAN, L. E. Early Neoproterozoic gold deposits of the Alto Guaporé Province, Southwestern Amazon Craton, Western Brazil. **Economic Geology**, v. 117, p. 127–163, 2022.

MENEZES, R. G.; SILVA, L. C.; TAKAHASHI, A. T.; LOPES, L., Jr.; BEZERRA, J. R. L. Folha Pontes e Lacerda, SD.21-Y-C-II. CPRM: Brasília, 1993.

MILÉSI, J. P.; LEDRU, P.; ANKRAH, P.; JOHAN, V.; MARCOUX, E.; VINCHON, C. The metallogenic relationship between Birimian and Tarkwaian gold deposits in Ghana. **Mineralium Deposita**, v. 26, p. 228–238, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00209263>.

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

MÜLLER, D.; KWAN, K.; GROVES, D. I. Geophysical implications for the exploration of concealed orogenic gold deposits: A case study in the Sandy Lake and Favourable Lake Archean greenstone belts, Superior Province, Ontario, Canada. **Ore Geology Reviews**, v. 128, p. 103892, 2021.

OSTROSVSKIY, E. Ya., Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. **International Geology Review**, 17, p. 461-468, 1973.

PIRAJNO, F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. **Springer**, 1250 p., 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>.

PULZ, G. M.; BARBOSA, E. S.; PINHO, F. E. C.; RONCHI, L. H.; JELINEK, A. R.; DUARTE, L. D. C. Inclusiones fluidas en venas auríferas del yacimiento Pau-a-Pique, suroeste del craton Amazónico, Brasil. **Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía**, v. 26, p. 79-92, 2003.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. Geophysical study of the Sertãozinho, Rio Aguapeí and Nova anomalies (SW of Mato Grosso, Brasil). In: **Proceedings of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGf)**, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 August 2013.

RIDLEY, J. R.; DIAMOND, L. W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and implications for Genetic Models. *Society of Economic Geologists*, v. 13, 2000.

RIZZOTTO, G. J.; HARTMANN, L.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. Tectonic evolution of the southern margin of the Amazonian craton in the late Mesoproterozoic based on field relationships and zircon U-Pb geochronology. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 86, p. 57-84, 2014.

ROBERT, F.; POULSEN, K. H.; DUBÉ, B. Gold Deposits and Their Geological Classification. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (eds.). **Economic Geology 100th Anniversary Volume**, p. 1001-1033, 2005.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. Mineral Resource Estimation. In: **Mineral Resource Estimation**. Springer, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>.

RUIZ, A. S. **Evolução geológica do sudoeste do cráton amazônico região limítrofe Brasil Bolívia-Mato Grosso**. 2005. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

SAES, G. S. Evolução tectônica e paleogeográfica do aulacógeno Aguapeí (1.2-1.0 GA) e dos terrenos do seu embasamento na porção sul do cráton amazônico. 1999. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SAES, G. S.; LEITE, J. A. D. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Aguapeí, Proterozoico médio na porção meridional do Cráton Amazônico: Mato Grosso e oriente boliviano. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23, p. 31-37, 1993.

SAES, G. S.; LEITE, J. A. D. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Aguapeí, Proterozoico médio na porção meridional do Cráton Amazônico: Mato Grosso e oriente boliviano. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 23, p. 31–37, 1993.

SOUZA, E. P.; HILDRED, P. R. Contribuição ao estudo da geologia do Grupo Aguapeí, oeste de Mato Grosso. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 31., 1980, Camboriú. **Anais...** Camboriú: SBG, v. 2, p. 813-825, 1980.

SUN, S. S.; MCDONOUGH, W. F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: SAUNDERS, A. D.; NORRY, M. J. (eds.). **Magmatism in the Ocean Basins**, Geological Society, London, Special Publications, v. 42, p. 313-345, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

TASSINARI, C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, p. 174–182, 1999.

TEIXEIRA, W.; GERALDES, M. C.; MATOS, R.; RUIZ, A. S.; SAES, G.; VARGAS-MATTOS, G. A review of the tectonic evolution of the Sunsás belt, SW Amazonian Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 47–60, 2010.

TOHVER, E.; VAN DER PLUIJM, B. A.; MEZGER, K.; SCANDOLARA, J. E.; ESSENE, E. J. Significance of the Nova Brasilândia Metasedimentary Belt in western Brazil: Redefining the Mesoproterozoic boundary of the Amazon craton. **Tectonics**, v. 23, p. TC6004, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003TC001563>.

YANG, J. et al. Geophysical Exploration for Gold and Associated Minerals, Case Study of the Abitibi Greenstone Belt. **Journal of Geophysical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 345-356, 2021.

CAPÍTULO V

5. Considerações Finais

As investigações realizadas nesta dissertação revelam a importância da convergência de métodos geofísicos e geoquímicos na identificação e caracterização de zonas mineralizadas, na Província Aurífera Alto Guaporé. A integração de técnicas como susceptibilidade magnética e gamaespectrometria, juntamente com dados geoquímicos e geologia de campo, demonstrou ser importantes para a compreensão dos depósitos de ouro orogênico em diferentes escalas. Esse trabalho permitiu caracterizar e definir guias prospectivos a partir do entendimento das alterações hidrotermais, das assinaturas geoquímicas e das propriedades físicas das rochas nas zonas mineralizadas. As principais considerações e sugestões resultantes desta pesquisa são as seguintes:

- 1) O desenvolvimento de um modelo geológico-geofísico prospectivo se mostrou eficaz, fornecendo um guia técnico robusto que considera a arquitetura estrutural das rochas metassedimentares e graníticas. Este modelo permitiu o delineamento de *footprints* metalogenéticos associados a estruturas subverticais e de direção preferencial de N20-50W), zonas magnéticas de baixa intensidade (condutores principais) e de baixa resistividade, e alta cargabilidade em metassedimentos e zonas de contato que são indicativas de potenciais depósitos de ouro. A viabilidade em caracterizar e identificar *footprints* metalogenéticos e zonas mineralizadas a profundidades entre 100 e 350 m, foi validada por meio de perfurações.
- 2) A análise petrofísica das amostras revelou que, embora não tenham sido identificadas grandes anomalias nas propriedades físicas, as amostras mineralizadas apresentaram densidade entre 2,6 e 2,8 g/cm³, além de baixa susceptibilidade magnética nas áreas de silicificação, apontando para a presença de veios de quartzo e a mineralização de ouro;
- 3) Em termos geoquímicos e geofísicos, a análise dos dados indicou um aumento nos teores de SiO₂, CaO, K₂O, TiO₂ e Al₂O₃, que estão fortemente correlacionados com a mineralização aurífera. Elementos *pathfinders*, como Ca, K, Rb e Ba, mostraram associações positivas com o ouro, reforçando a importância das análises geoquímicas na caracterização das zonas mineralizadas vinculadas à processos de epidotização, carbonatação e sericitização (*i.e.*, associação com anomalias geofísicas com altos teores de potássio), e paragênese mineral de pirita (Py), muscovita (Ms), sericita (Ser), ilmenita (Ilm), hematita (Hem), magnetita (Mag), carbonatos (Carb), clorita (Chl), albita (Ab), calcopirita (Cpy) e turmalina (Tur).

- 4) Sugestões para pesquisas futuras incluem a aplicação de tecnologias de espectroscopia de reflectância para mapeamento mineral ainda mais detalhado sobre os processos de alteração mineral e composicional. Recomenda-se também a incorporação de furos ortogonais à estrutura principal, definida entre o contato entre os metassedimentos e o embasamento granítico, corroborando a aderência do modelo e seções geológicas-estruturais geradas. Para melhor delimitação das zonas de cisalhamento e falhas regionais de grande escala, que controlam a distribuição dos depósitos, sugere-se aplicação do método magnetotelúrico, com intuito de fornecer o posicionamento e extensão (*i.e.*, profundidade) acurada de estruturas de primeira/segunda ordem.

Em suma, os resultados desta pesquisa abrem novas perspectivas para a exploração mineral e para a aplicação de métodos integrados, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento em geologia econômica e no potencial prospectivo da região.

Referências

ARMISTEAD, S. et al. Sources of metals and fluids in orogenic gold deposits: Insights from the Otago Region, New Zealand. **Economic Geology**, v. 101, n. 8, p. 1525–1543, 2006.

BUTLER, R. F. **Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes**. Boston: Blackwell Scientific Publications. v. 319, 1992.

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. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 187-200, 1997.

DOYLE, H.A. Geophysical exploration for gold - A review. **Geophysics**, v. 55, p. 134–146, 1990.

ECHAGUE, J.; LEÃO-SANTOS, M.; MELO, R.; MENDES, T.; BORGES, W. Application of geophysical methods in the identification of mineralized structures and ranking of areas for drilling as exemplified by Alto Guaporé Orogenic Gold Province. **Minerals**, v. 14, p. 788, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14080788>.

ELLIS, R. G.; WET, B.; MACLEOD, I. N. Inversion of magnetic data from remanent and induced sources. In: **22nd International Geophysical Conference and Exhibition**, Australia, 2012.

EVERETT, M. E. **Near-Surface Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

FERNANDES, C.J.; KUYUMJIAN, R.M.; PULZ, G.M.; GERALDES, M.C.; PINHO, F.E.C. Geologia estrutural e idade $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ do depósito Pau a Pique, Faixa Móvel Aguapeí, sudoeste do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, Suplemento S1, p. 13, 2006c.

FERNANDES, C.J.; KUYUMJIAN, R.M.; MOURA, M.A.; BARBOZA, E.d.S.; PULZ, M.G. Tipologia dos veios de quartzo e estudo de inclusões fluidas nos depósitos de ouro da Faixa Móvel Aguapeí–Cráton Amazônico–Mina de São Vicente, Região da Lavrinha e Pau-a-Pique. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, Suplemento S1, p. 59–70, 2006d.

GOLDFARB, R. J.; GROVES, D. I.; GARDOLL, S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. **Ore Geology Reviews**, v. 18, p. 1–75, 2001.

GOLDFARB, R. J. Lode gold deposits in time and space. In: ELIAS, S.; ALDERTON, D. (Eds.). **Encyclopedia of geology**. 2nd ed., p. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00006-0>.

GRIFFITHS, D. H.; BARKER, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. **Journal of Applied Geophysics**, v. 29, p. 21-26, 1993. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J).

HALLOFF, P. G.; YAMASHITA, M. The use of the IP method to locate gold-bearing sulfide mineralization. In: FINK, J. B.; STERNBERG, B. K.; MCALISTAR, E. O.; WEIDUWILT, W.

G.; WARD, S. H. (Eds.). **Induced Polarization: Applications and Case Histories**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, p. 227-279, 1990.

HINZE, W. J.; VON FRESE, R. R.; SAAD, A. H. **Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

JÁCOMO, Marta Henriques. Associação de magnetometria, gamaespectrometria, geoquímica e petrografia para modelamento tridimensional da mineralização de nióbio do depósito Morro do Padre, Goiás, Brasil. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. John Wiley & Sons, 2009.

KUBOTA, R.; UCHIYAMA, A. Three-dimensional magnetization vector inversion of a seamount. **Earth and Planetary Science**, v. 57, p. 691–699, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/BF03351849>.

LELIÈVRE, P. G.; OLDENBURG, D. W. A comprehensive study of including structural orientation information in geophysical inversions. **Geophysical Journal International**, v. 178, n. 2, p. 623–637, Aug. 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04188.x>.

LESMES, D. P.; FRYE, K. M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 106, p. 4079–4090, 2001. doi: 10.1029/2000JB900392.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. 3D inversion of magnetic data. **Geophysics**, v. 61, p. 394-408, 1996.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. 3D inversion of gravity data. **Geophysics**, v. 63, p. 109-119, 1998.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. 3D inversion of induced polarization data. **Geophysics**, v. 65, p. 1931–1945, 2000.

LIMA, O. A.; SHARMA, M. M. A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. **Geophysics**, v. 57, p. 431-440, 1992.

LOVBØRG, L.; MOSE, E. Counting statistics in radioelement assaying with a portable spectrometer. **Geophysics**, v. 52, n. 4, p. 555–563, 1987. In: Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data. IAEA, Vienna, 2003.

LOWRIE, W. Fundamentals of Geophysics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

MACKENZIE, D.; CRAW, D. Geophysical signals and exploration for orogenic gold on the low-grade margins of the Otago Schist. In: **GOLD'17 Conference**, Rotorua, New Zealand, 2017. Extended Abstracts: 62–65. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314113204>.

MARSHALL, D. J.; MADDEN, T. R. Induced polarization, a study of its causes. **Geophysics**, v. 24, p. 790–816, 1959.

MELO, R. P. **Caracterização do metamorfismo da Faixa Móvel Aguapeí e sua relação com a gênese dos depósitos de ouro da região de Pontes e Lacerda – MT.** 2016. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

MELO, R. P.; OLIVEIRA, M. A. F.; GOLDFARB, R. J.; JOHNSON, C. A.; MARSH, E. E.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, L. R.; MORGAN, L. E. Early Neoproterozoic gold deposits of the Alto Guaporé Province, Southwestern Amazon Craton, Western Brazil. **Economic Geology**, v. 117, p. 127–163, 2022.

MENDES, T. L.; LEÃO-SANTOS, M. H.; TABOSA, L. F. C.; BORGES, W. R.; DOS SANTOS ALVES, C.; DE FREITAS SUITA, M. T. Airborne geophysics, petrophysics, geochemistry and geology of Ni-Cu (Co-Au-PGE) footprints to define exploration targets in mafic-ultramafic rocks. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, p. 104716, 2023.

MILSOM, J. **Field geophysics**. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

MITCHINSON, D.E. **Targeting Archean orogenic gold mineralization using physical properties and integrated geophysical methods**. 2009. Tese (Doutorado em Geociências), University of British Columbia, Vancouver, BC, 2009.

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

MOCITAIBA, L. S. R. **Análise da interferência do acoplamento eletromagnético na interpretação de dados de polarização induzida e resistividade**. Trabalho de Graduação (Graduação em Geofísica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

MÜLLER, D.; KWAN, K.; GROVES, D. I. Geophysical implications for the exploration of concealed orogenic gold deposits: A case study in the Sandy Lake and Favourable Lake Archean greenstone belts, Superior Province, Ontario, Canada. **Ore Geology Reviews**, v. 128, p. 103892, 2021.

OLHOEFT, G. R. Low-Frequency Electrical Properties. **Geophysics**, v. 50, p. 2492-2503, 1985. <https://doi.org/10.1190/1.1441880>.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1997.

REVIL, A.; FLORSCH, N. Determination of permeability from spectral induced polarization data in granular media. **Geophysical Journal International**, v. 181, p. 1480-1498, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x>.

REVIL, N.; FLORSCH, C.; CAMERLYNCK, J. Spectral induced polarization porosimetry. **Geophysical Journal International**, v. 198, n. 2, p. 1016–1033, ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/gji/ggu180>.

ROBERT, F.; POULSEN, K. H.; DUBÉ, B. Gold Deposits and Their Geological Classification. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (eds.). **Economic Geology 100th Anniversary Volume**, p. 1001-1033, 2007.

SEIGEL, H.O.; JOHNSON, I.; HENNESSEY, J. Different methodology: geophysical aids to gold exploration. **Lead. Edge**, v. 3, p. 32–35, 1984.

SUMNER, J. S. **Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration**. Amsterdam: Elsevier, 1976.

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

TITOV, K.; KOMAROV, V.; TARASOV, V.; LEVITSKI, A. Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands. **Journal of Applied Geophysics**, v. 50, n. 4, p. 417–433, 2002.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. **Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. Society of Exploration Geophysicists, 1988.**

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.

YANG, J. et al. Geophysical Exploration for Gold and Associated Minerals, Case Study of the Abitibi Greenstone Belt. **Journal of Geophysical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 345-356, 2021.

APÊNDICE 1

Descrições Petrográficas

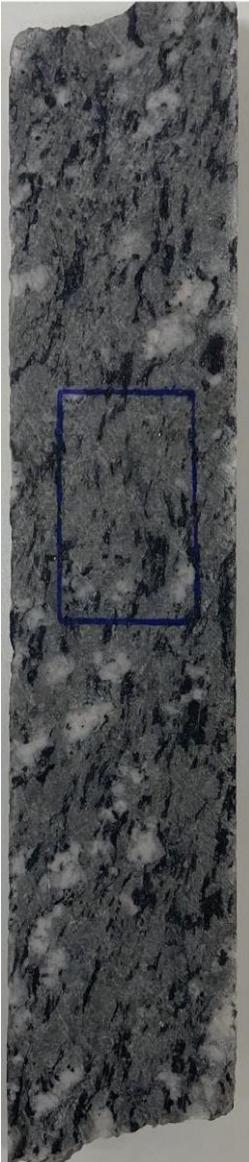
ID Amostra: **ABP0004-44,70**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 44,70



Legenda: Rocha Ígnea fortemente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha fortemente sericitizada com presença de fenocristais (cm) de feldspato imersos em uma matriz alterada, mas fina (mm), com presença

de vênulas de Qtz-Carbonato e porfiroblastos (cm-mm) de pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

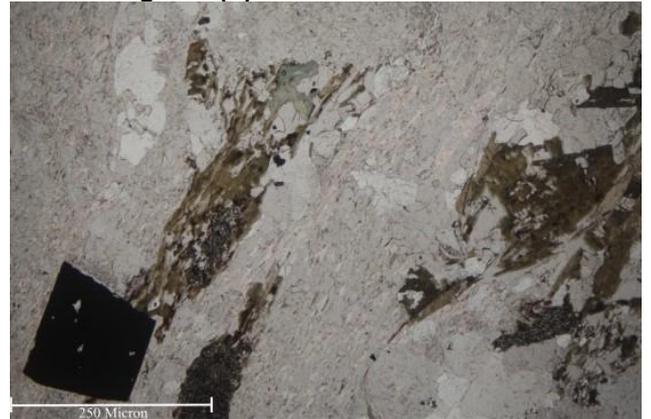
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

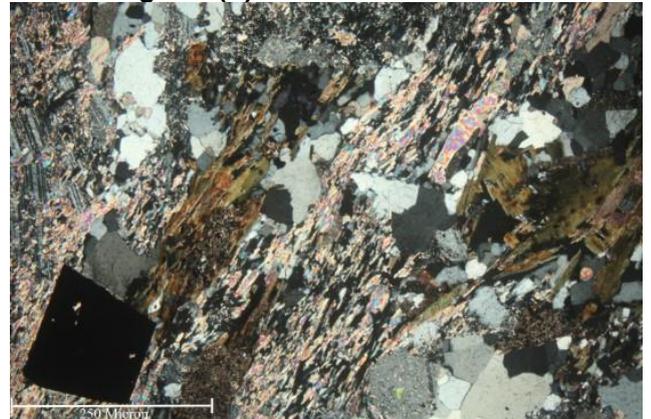
Maciça

Fotomicrografia (A)

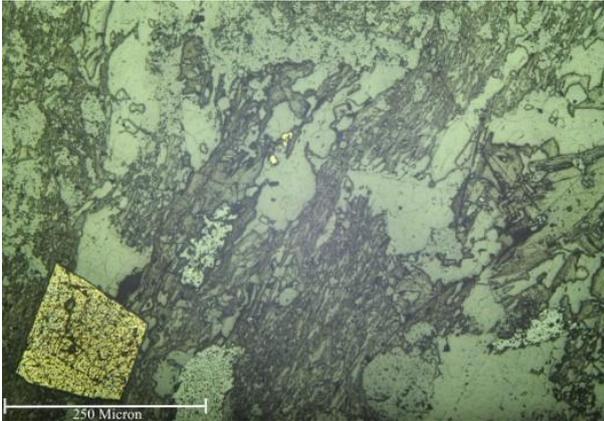


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de saussuritização dos feldspatos cm (carbonato + sericita) intersticial e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural: Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas porfíricas (protólito), aliadas a níveis foliados cisalhados intersticiais com saussuritização.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Porfírica

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	25	Essencial
Feldspato	30	Essencial
Micas (Ms/Ser)	35	Secundário?
Calcita	5	Secundário
Épidoto?+Rutilo+Magnetita?	5	Acessório
Py+Cpy	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares); aumento de agregados de biotita hidrotermal + muscovita/sericita > epidoto nas zonas de cisalhamento; a sericita ocorre de forma pervasiva, como minerais prismáticos produtos da alteração do feldspato potássico (cerca 50%); venulações de quartzo-carbonato (dúcteis-rúpteis) nas zonas cisalhadas; zonas cisalhadas (extinção ondulante c/ diferentes tamanhos de grão); pirita ocorre disseminada como porfiroblastos em fraturas e traço > cpy como inclusões em veios de Qtz; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtz e zonas saussuritizadas de forma fissural.

Nome Rocha:

Diorito/Tonalito com lentes cisalhadas de Bt-Ms Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

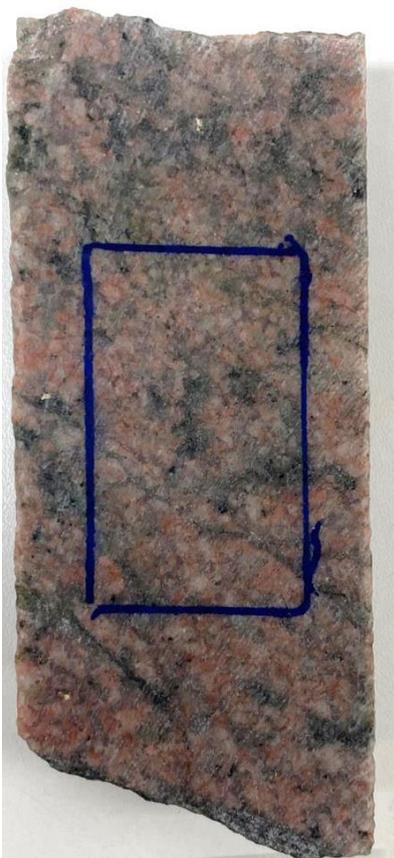
ID Amostra: **ABP0004-61,91**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 61,91



Legenda: Rocha Ígnea com moderada alteração.

Descrição da amostra:

Rocha moderadamente alterada com presença de fenocristais (mm) de feldspato potássico e sódico, e presença de microvênulas de Qtz-Cal-Epd-Bt-Anf e porfiroblastos (mm) de pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

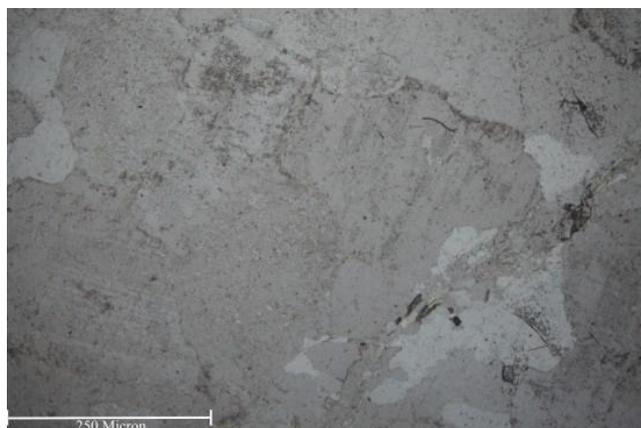
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

Maciça

Fotomicrografia (A)



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Grau de cristalinidade:

Holocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica fina com presença de albitização, saussuritização dos feldspatos (epídoto) intersticiais e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Estruturalmente maciça com microvênulas de Qtz-Cal-Epd-Bt-Anf intersticiais.

Granulação/granulometria:

Fina

Tamanho relativo dos cristais:

Equigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	35	Essencial

Feldspato (Albita/Microclinio)	55	Essencial
Calcita	10	Secundário
Bt+ Epd?+Rt+Magnetita?	5	Acessório
Py	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Estrutura ígnea primária bem preservada com a articulação entre os grãos (planares); Saussuritização (30%) dos FK; Albitização (Epd+Cal) (50%) do FK; microvenulações de quartzo-carbonato-epídoto-anfibólio intersticial; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtzo e zonas saussuritizadas de forma fissural. Presença de pertita nos feldspatos.

Nome Rocha:

Sieno/Monzo Granito com microvênulas de Qtz-Cal-Epd-Bt-Anf

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):
Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):
Sieno/Monzo Granito

ID Amostra: **ABP0004-86,95**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 86,95



Legenda: Rocha Ígnea fortemente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha fortemente epidotizada com presença de fenocristais (cm) de feldspato imersos em uma matriz alterada, mas fina (mm) na porção preservada ígnea, e porfiroblastos de py (mm) dispostos em lente hidrotermalizada (Epd>>Ser+Ms) // sn.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

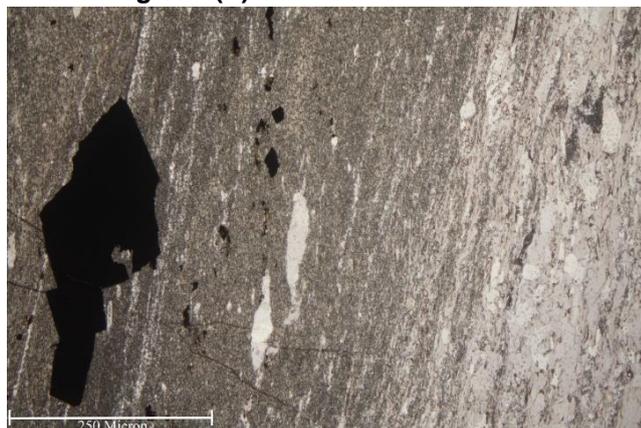
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

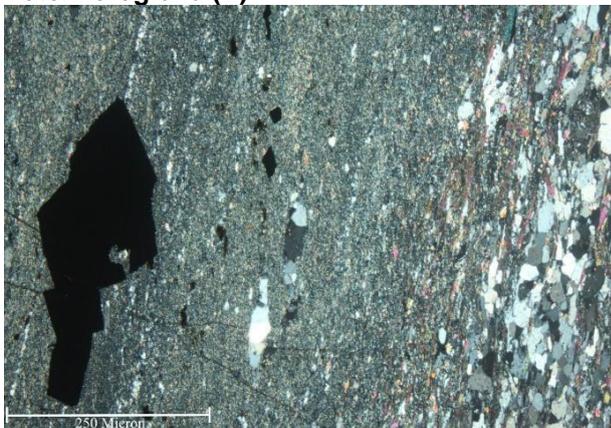
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

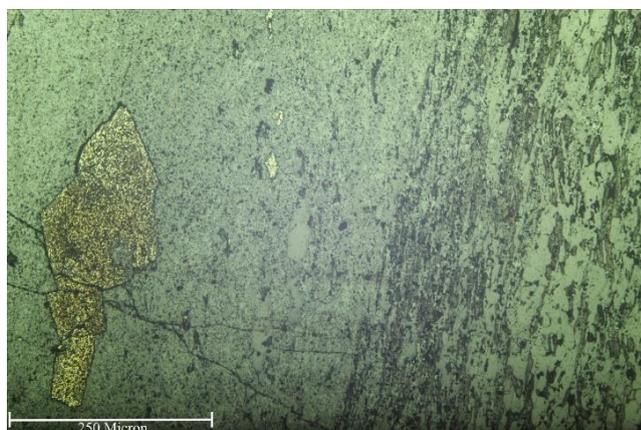


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de lentes c/ epidotização, sericitização local e saussuritização dos feldspatos intersticiais (protólito e lente hidrotermalizada) e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas..

Descrição estrutural:

Na porção do protólito arranjada de forma maciça porfirítica e foliada nas bordas e na lente com forte epidotização e sericitização/saussuritização pontual dos feldspatos.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Porfirítica

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	35	Essencial
Epídoto	20	Secundário?
Calcita	5	Secundário
Micas (Bt/Ms/Ser)	10	Acessório
Py	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) no protólito e planares na lente epidotizada; aumento de agregados epídoto, biotita hidrotermal > muscovita/sericita na lente

hidrotermalizada; o epídoto, sericita e biotita ocorrem de forma fissural (lente), como minerais prismáticos produtos da alteração do feldspato (cerca 40%) e fissural como produto da saussuritização do protólito ígneo; foliação bem marcada nas zonas de contato com a lente epidotizada; pirita ocorre disseminada como porfiroblastos na lente hidrotermalizada e em fraturas; A Cal ocorre em associação com microvênulas de Qtzo e em zonas saussuritizadas do protólito preservado, de forma fissural.

Nome Rocha:

Diorito com lentes xistosas “Epd-Ser”

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

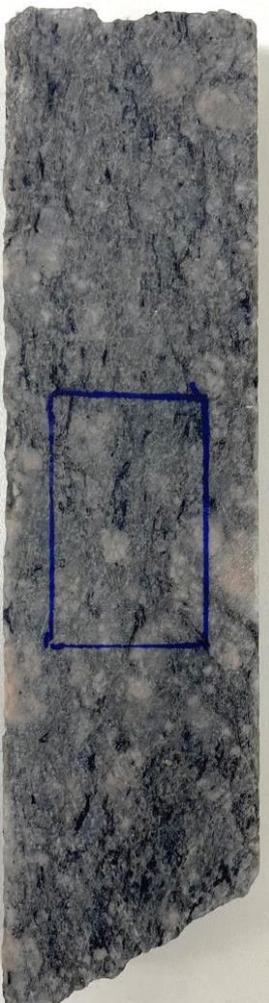
ID Amostra: **ABP0004-108,73**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 108,73



Legenda: Rocha Ígnea moderadamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha moderadamente sericitizada com presença de fenocristais (cm) de feldspato imersos em uma matriz alterada, mas fina (mm), com presença de vênulas de Qtz-Carbonato e porfiroblastos (mm) de pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

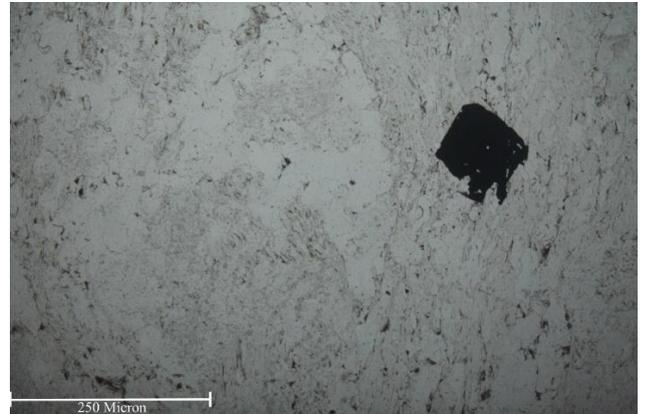
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

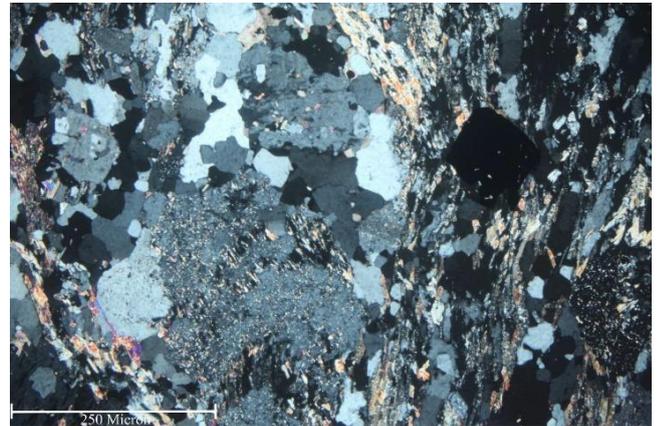
Maciça

Fotomicrografia (A)

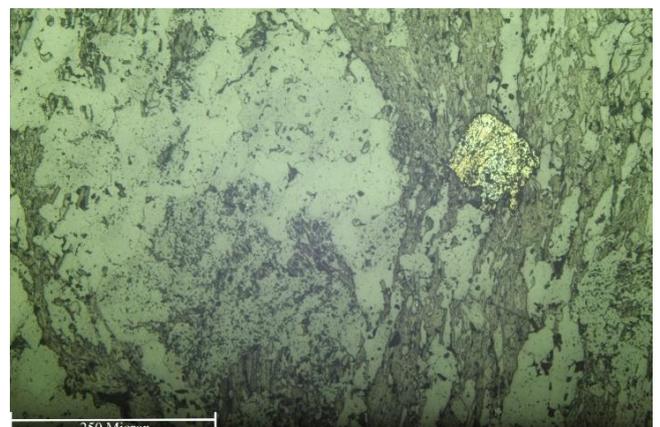


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de sausrutização dos feldspatos cm (carbonato + sericita) intersticial e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas porfíricas (protólito), aliadas a níveis foliados cisalhados intersticiais com saussuritização e sericitização.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Porfírica

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	35	Essencial
Feldspato	35	Essencial
Micas (Ms/Ser)	20	Secundário
Calcita	5	Secundário
Epídoto+Rutilo+Mgt?	5	Acessório
Py	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares); aumento de agregados de biotita hidrotermal + muscovita/sericita > epídoto nas zonas de cisalhamento; a sericita ocorre de forma pervasiva, como minerais prismáticos produtos da alteração do feldspato potássico (cerca 25%); venulações de quartzo-carbonato (dúcteis-rúteis) nas zonas cisalhadas; zonas cisalhadas (extinção ondulante c/ diferentes tamanhos de grão); pirita ocorre disseminada como porfiroblastos em fraturas e traço > cpy como inclusões em veios de Qtz; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtzo e zonas saussuritizadas de forma fissural.

Nome Rocha:

Bt Granito com lentes cisalhadas de Bt/Ser/Ms Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Bt Tonalito

ID Amostra: **ABP0004-257,72**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 257,72



Legenda: Rocha Ígnea deformada e altamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica em Pl+Qtz+FK na matriz (protólito) e Bt+Ms+Ser+Chl na foliação presente; alteração dada por sericitização/cloritização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms em matriz FK/Pl+Qtz (alterada) + veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de (py+cpy>rt) e disseminada junto a matriz alterada por sericita+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

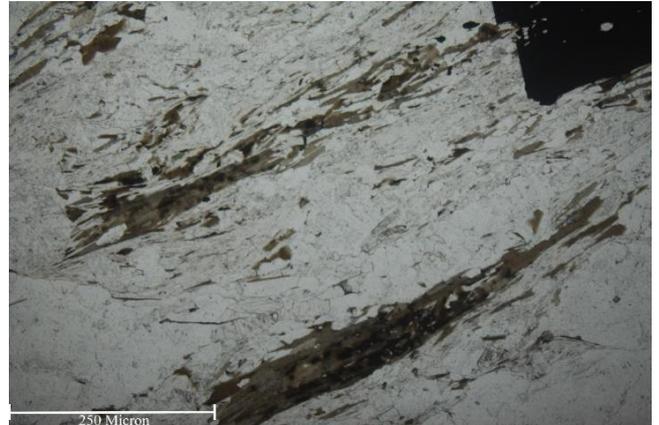
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

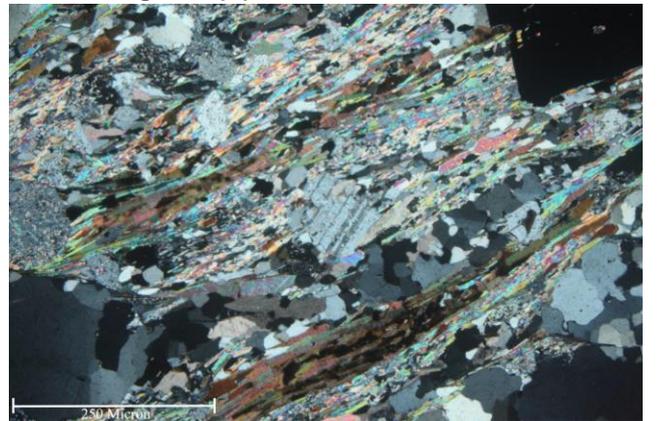
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

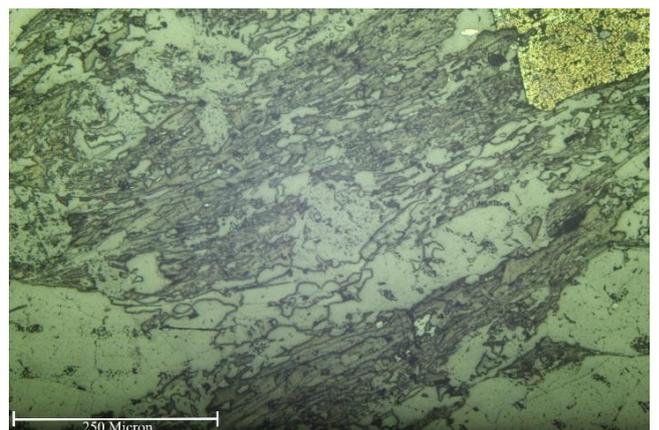


Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por

Qtz/FK/Pl; alteração dada por epidotização (feldspatos) intersticial e sericitização e a rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblástica dada por Qtz/FK/Pl; alteração dada por epidotização (feldspatos) intersticial e sericitização e cloritização intensa e sericitização (muscovita+biotita) + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com zona preservadas (graníticas) c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	35	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	25	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto	5	Acessório
Py; Cpy; Ilm; Rutilo	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) na matriz do protólito (metaluminoso) preservado e planares nas porções cisalhadas, Bt/Ms/Chl>Epd, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e em alguns casos também é comum um aumento no teor de epídoto. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com

extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulações de Qtz sigmoidais. O Epd ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz do protólito (cerca 30% das feldspatos); il+rt ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; porfiroblastos de py>>cpy ocorrem disseminadas na matriz cisalhada e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento em vênulas e matriz do protólito.

Nome Rocha:

Tonalito com níveis xistosos (Ms-Bt-Chl Xisto)

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Tonalito

ID Amostra: **ABP0004-261,01**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 261,01



Legenda: Veio de Qtz encaixado em rocha xistosa altamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica muito alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Ser+Chl na foliação presente; alteração dada por sericitização/cloritização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>>cpy e disseminada junto a matriz alterada por sericita+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

Índice de cor:

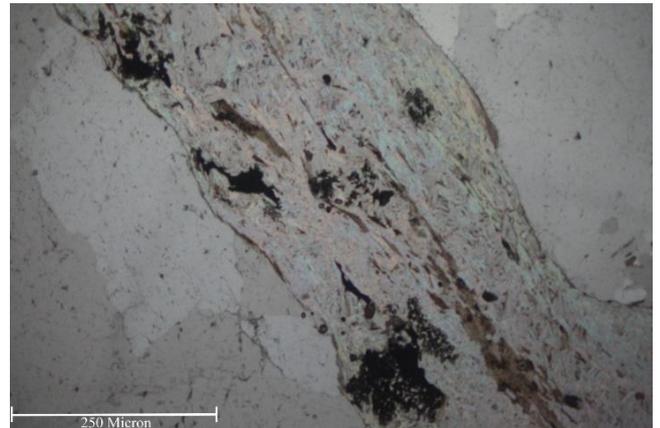
Leucocrática

Estrutura:

Xistosidade

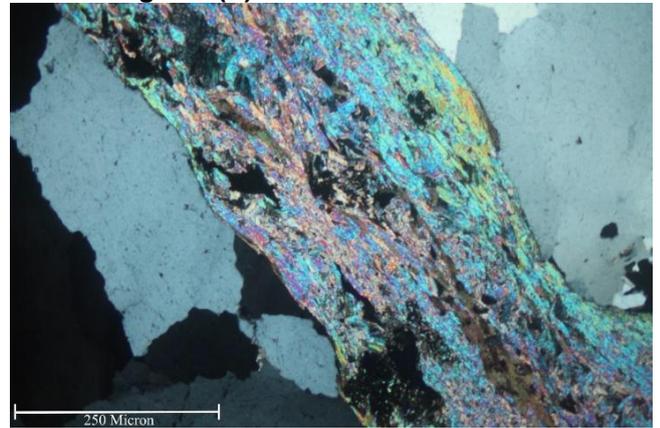
Fotomicrografia (A)

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl; alteração dada por sericitização e

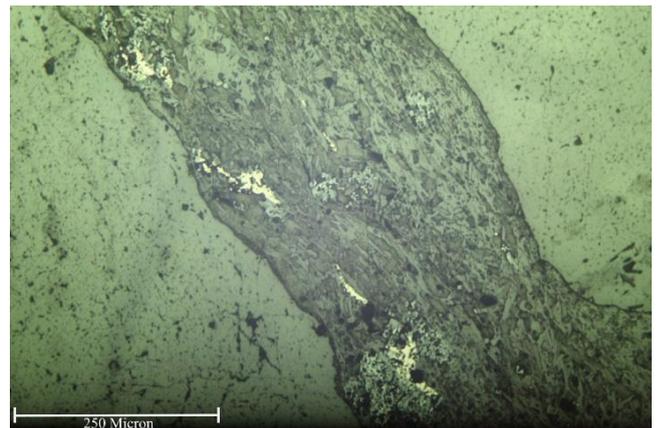


Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

cloritização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com zona venuladas c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	45	Essencial
Carbonato	10	Secundário
Epídoto	4	Acessório
Py; Cpy; Rutilo; Ap	1	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl>Epd, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e em alguns casos também é comum um aumento no teor de epídoto. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais. O Epd ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz do protólito (cerca 10% das feldspatos); rt ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; porfiroblastos de py>>cpy ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e em vênulas.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Tonalito

ID Amostra: **ABP0004-285,74**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 285,74



Legenda: Rocha xistosa altamente alterada c/ veio de Qtzo-Carb alojado.

Descrição da amostra:

Rocha completamente cisalhada e alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Ser+Chl na foliação bem desenvolvida; alteração dada por sericitização/cloritização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>cpy>>il e disseminada junto a matriz alterada por sericita+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

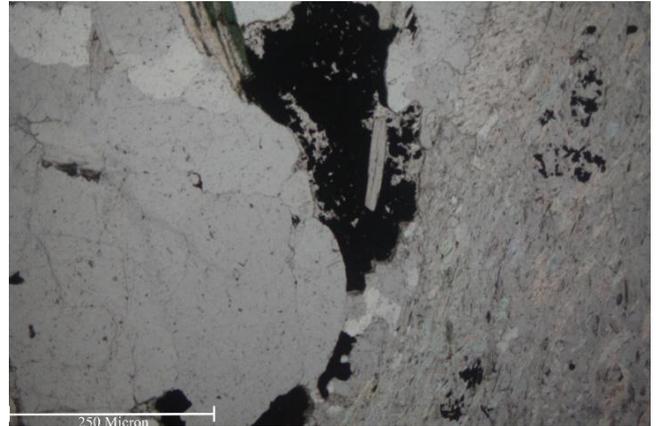
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

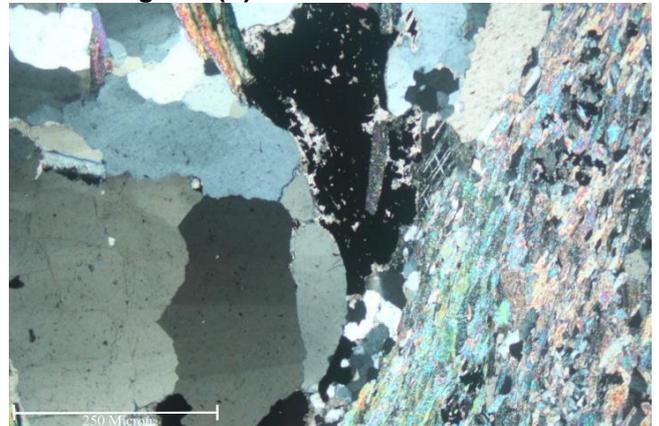
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

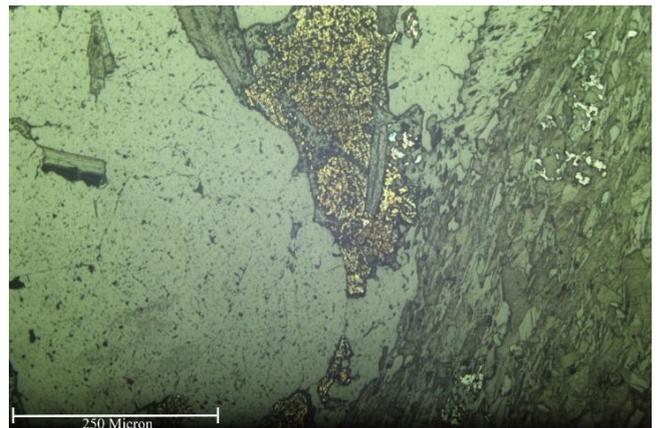


Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl; alteração dada por sericitização e

cloritização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com zona venuladas c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	45	Essencial
Carbonato	10	Secundário
Epídoto	traço	Acessório
Py; Cpy; Il; Rutilo; Ap	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl>Epd, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e em alguns casos também é comum um aumento no teor de epídoto. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante, migração de borda de grão, redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais. O Epd ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo feldpsatos locais da matriz (cerca 5% das feldpsatos); rt ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; porfiroblastos de py>cpy>>il ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e em vênulas.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Tonalito

ID Amostra: **ABP0004-492,95**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0004 – 492,95



Legenda: Rocha xistosa altamente alterada c/ microvenulas de Qtzo-Carb alojado.

Descrição da amostra:

Rocha xistosa completamente cisalhada e alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Ser+Chl nas foliações bem desenvolvidas; alteração dada por sericitização/cloritização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm) e Carb (mm).

Grau de visibilidade:

Fanerítica

Índice de cor:

Mesocrática

Estrutura:

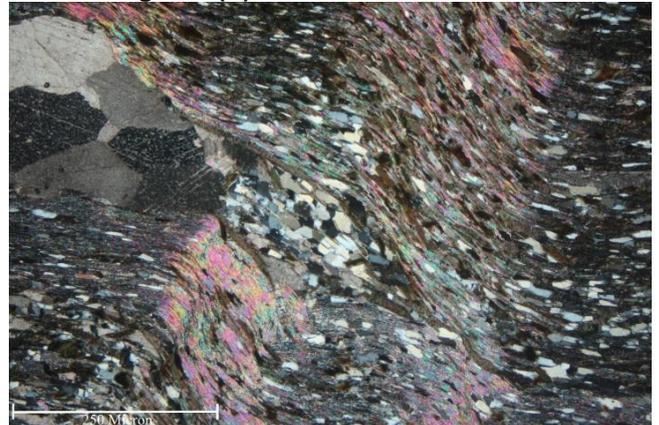
Xistosidade

Fotomicrografia (A)



Legenda: NP 4x – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX 4x – Luz Trasmitada

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e localmente textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl; alteração dada por sericitização e cloritização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Arranjada de forma xistosa cisalhada (determinada por minerais micáceos em zona de cisalhamento); alternada com zona venuladas c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	25	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	50	Essencial
Carbonato	15	Secundário
Epídoto	traço	Acessório
Rutilo?	traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl/Epd, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e também aumento no teor de epídoto. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante, migração de borda de grão, redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de FK e Qtzo. Foliações (Sn e Sn+1 bem desenvolvidas e que definem o comportamento paralelizado as outras fases da rocha. Deformação também presenciada nas venução de Qtz sigmoidais. rt ocorrem disseminadas como inclusões (mm) locais; microvenulas de Qtz e Qtz+Carb // a sn. A Cal ocorre como preenchimento matriz micacea e em vênulas.

Nome Rocha:**Ms-Bt-Chl Xisto****Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):****Fácies Xisto Verde****Protólito (Rochas Metamórficas):**

Diorito

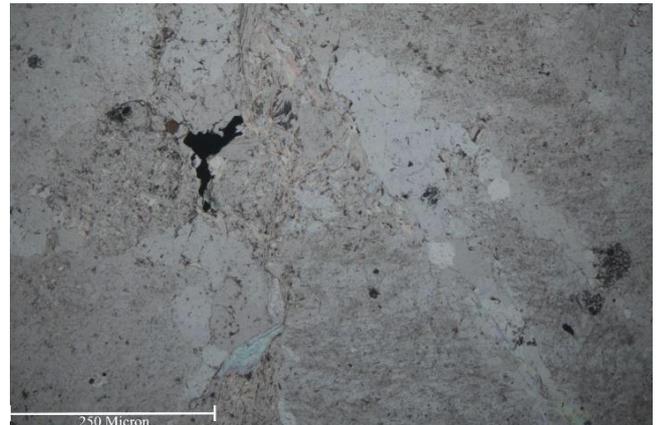
ID Amostra: **ABP0004-110,31**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 08/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

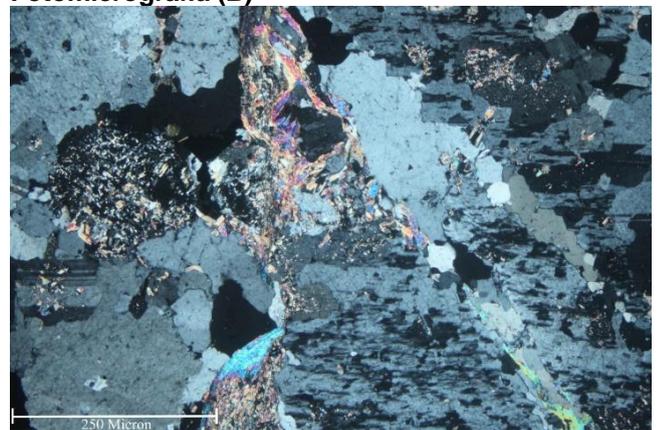
Foto amostra (macro)

ABP0004 – 110,31



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Legenda: Veio de Qtzo+Carb encaixado em Rocha Ígnea.

Descrição da amostra:

Rocha com moderada alteração alcalina? presença de fenocristais de ortoclásio (cm) imersos em uma matriz de Pl+Qtz (mm), com presença de vênulas de Qtz-Bt/Ms-Carbonato e porfiroblastos (mm) de pirita e biotita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

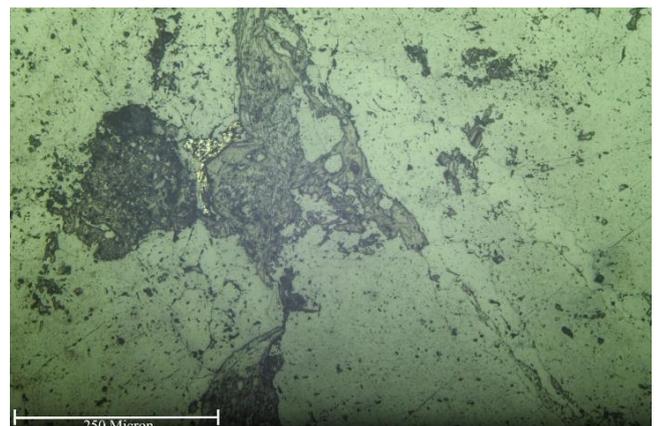
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

Maciça

Fotomicrografia (A)



NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa, determinada por feldspatos (alcalinos) + presença de saussuritização dos feldspatos cm (carbonato + epidoto) da matriz mais fina + venulações de Qtz/Bt+Ms e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas porfíricas (protólito), imbricadas por zonas venulares + zonação da matriz feldspática com saussuritização (matriz Pl+Qtz mais fina).

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Porfírica

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	45	Essencial
Micas (Bt/Ms/Ser)	15	Essencial
Calcita	5	Secundário
Epidoto?+Rutilo	5	Acessório
Py+Magnetita	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) matriz mais fina e planares entre as porções com fenocristais de feldspato; aumento de agregados de biotita hidrotermal + muscovita>>sericita+epidoto nas zonas venuladas; o epidoto ocorre de forma de alteração (preenchimento), como minerais prismáticos produtos da alteração do feldspato potássico (cerca 15%); venulações de quartzo-carbonato (dúcteis-rúteis); a pirita e magnetita ocorrem disseminada como porfiroblastos em fraturas e traço como inclusões em veios de Qtz-Carb; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtz e zonas saussuritizadas de forma fissural. Presença de pertita denotando intercrescimento entre Na e Ca dos feldspatos.

Nome Rocha:

Alcali Diorito com venulações de Qtz + Bt/Ms

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

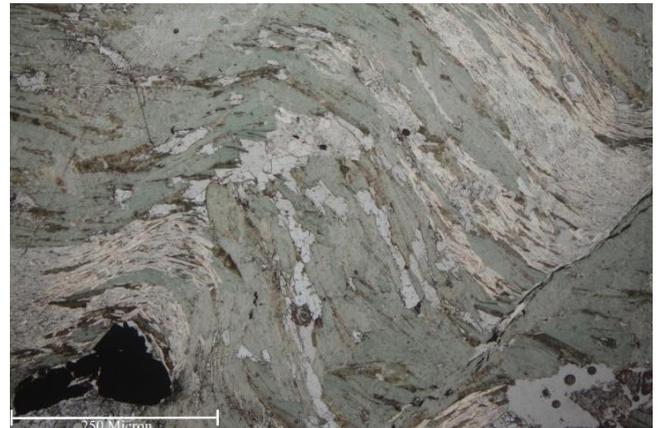
ID Amostra: **ABP0009-101,19**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 11/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

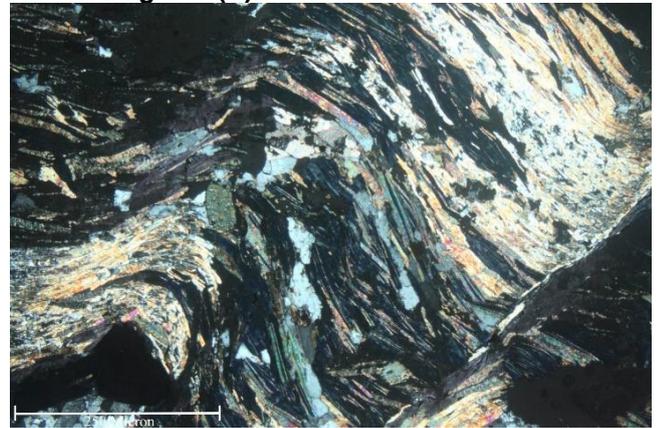
Foto amostra (macro)

ABP0009 – 101,18



Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Legenda: Veio de Qtz encaixado em rocha ígnea altamente deformada e alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica muito alterada na matriz (protólito), com Bt+Ms+Ser+Chl na foliação presente; alteração dada por cloritização/sericitização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>cpy>>il e disseminada junto a matriz alterada por sericita+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

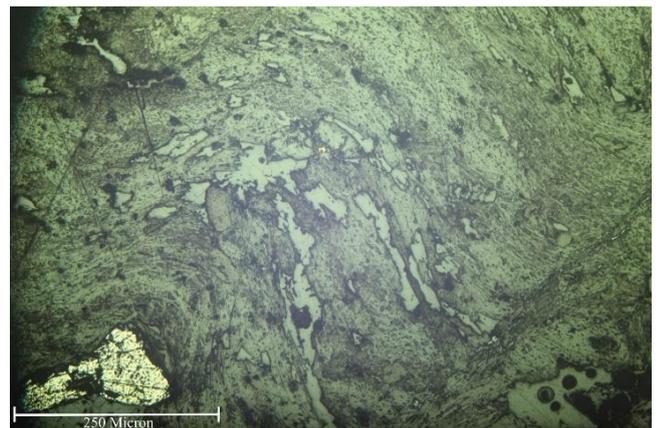
Índice de cor:

Mesocrática

Estrutura:

Xistosidade

Fotomicrografia (A)



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Chl/Ser e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl; alteração dada por cloritização em sua maioria e sericitização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (definida por minerais micáceos); alternada com zona venuladas c/ Qtz+FK+Pl+Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto. Pares “S-C” são evidenciados, denotando grau de deformação e cisalhamento intenso na amostra.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	25	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Chl>>Ser)	45	Essencial
Carbonato	15	Secundário
Epidoto	traço	Acessório
Py; Cpy; Rt; Ap	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita/muscovita. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais; rt e il ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; profiroblastos de py>>cpy ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e em vênulas.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Tonalito

ID Amostra: **ABP0009-182,50**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

amostra (macro)

ABP0009 – 182,50



Legenda: Rocha Ígnea moderadamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha moderadamente epidotizada + fracamente sericitizada com presença de fenocristais (cm) de feldspato imersos em uma matriz Qtz-FK alterada, mas fina (mm), com disseminação de epidoto (alteração) + de vênulas de Qtz-Carbonato e porfiroblastos (mm) de magnetita>pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

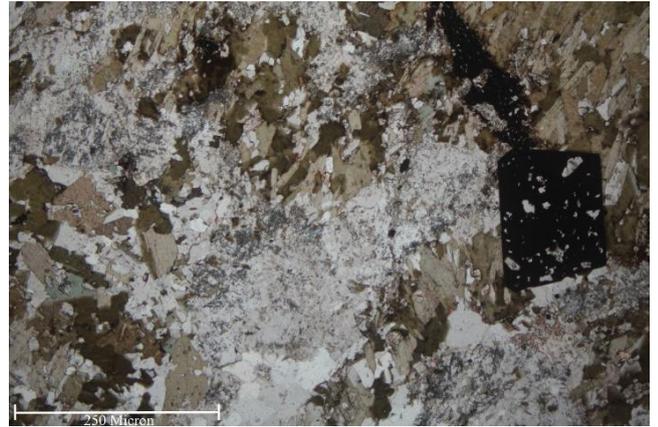
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

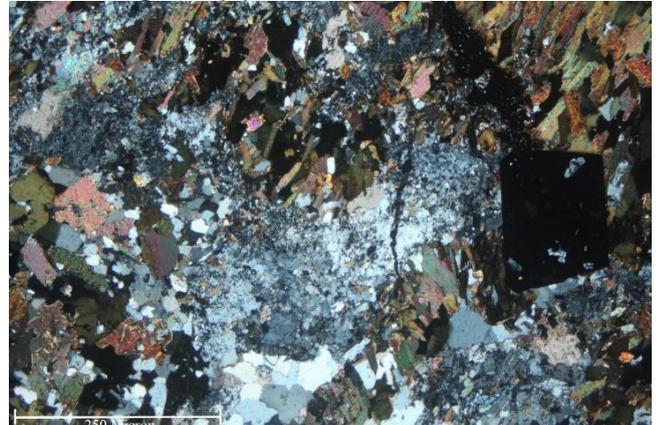
Maciça

Fotomicrografia (A)

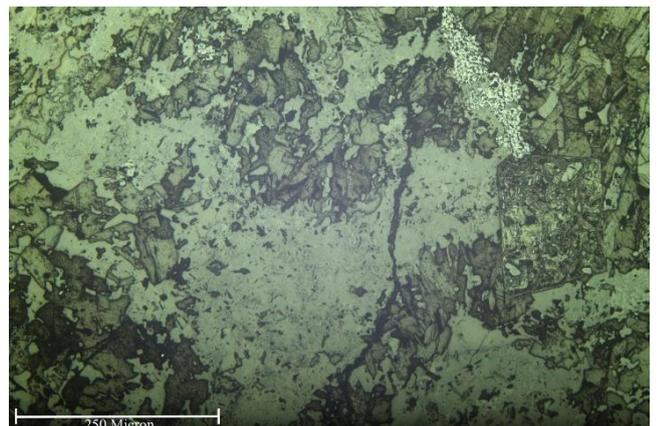


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica média com presença de epidotização/saussuritização dos feldspatos cm (carbonato + sericita) intersticial e forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito), aliadas a lentes foliadas cisalhadas intersticiais com predomínio de Ms+Bt.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	25	Essencial
Feldspato	40	Essencial
Micas (Ms/Chl)	20	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto?+Rutilo+Mgt?	10	Acessório
Py	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares); aumento de agregados de biotita + muscovita > epídoto nas lentes cisalhadas; epídoto ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz (cerca 60% das albitas); venulações de quartzo-carbonato (dúcteis-rúteis) nas zonas cisalhadas; zonas cisalhadas (extinção ondulante c/ diferentes tamanhos de grão); magnetita e pirita ocorrem disseminadas como porfiroblastos em fraturas, por vezes essa magnetita está alterada para hidróxido de ferro; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtzo e zonas saussuritizadas de forma fissural.

Nome Rocha:

Bt Sieno Granito com lentes cisalhadas de Bt/Ms Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):
Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):
Sieno Granito

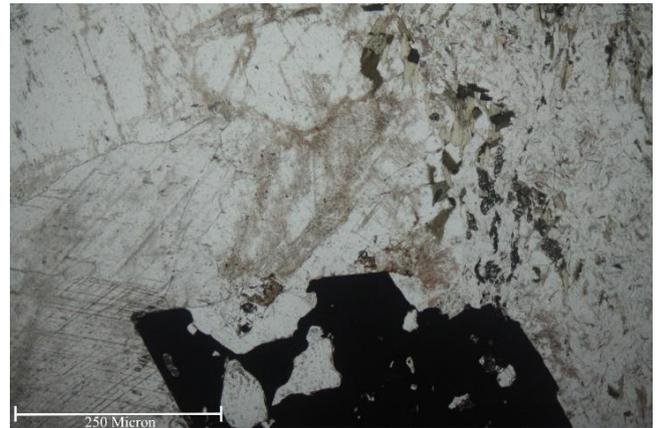
ID Amostra: **ABP0009-184,89**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

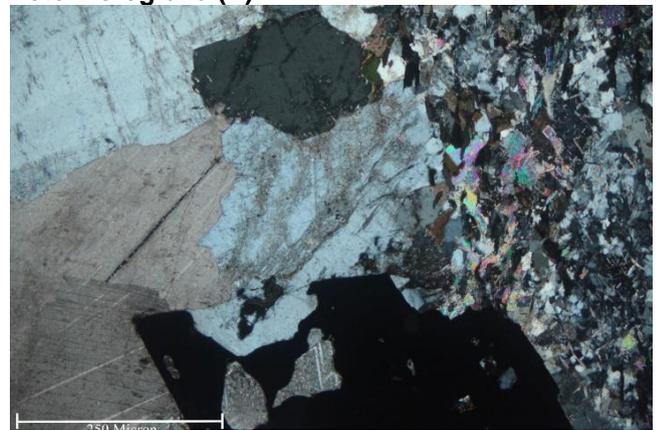
Foto amostra (macro)

ABP0009 – 184,89



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Legenda: Rocha Ígnea fortemente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha fortemente saussuritizada + epidotizada + sericitizada com presença de fenocristais (cm) de feldspato (albita) em veios de Qtz-FK (cm), disseminação de epidoto (alteração) dos FK + vênulas de Qtz-Carbonato-Albita e porfiroblastos (mm) de pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

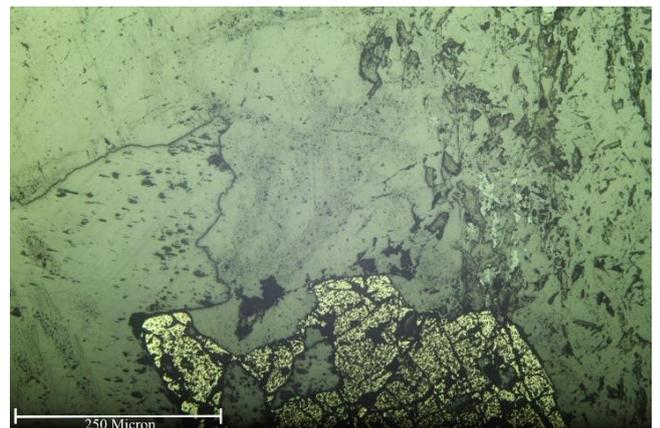
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

Xistosidade

Fotomicrografia (A)



NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de saussuritização dos feldspatos cm (carbonato + sericita) intersticial + sericitização (muscovita+biotita) + fenocristais de albita (cm) associadas a veios de Qtz + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito), intercaladas por zonas foliadas cisalhadas intersticiais com predomínio de Ms+Bt+Ser+Chl.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	40	Essencial
Feldspato	30	Essencial
Micas (Ms/Ser/Chl)	20	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto?+Rutilo+Mgt?	5	Acessório
Py	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) no protólito e planares entre os grãos micáceos (cisalhadas); aumento de agregados planares de biotita hidrotermal + muscovita/sericita/clorita; a sericita e clorita ocorrem de forma fissural, como minerais prismáticos produtos da alteração do feldspato potássico (cerca 25%) e biotita (40%) e preenchendo/zonando bordas de minerais de fenocristais de feldspato; epídoto ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz (cerca 20% das albitas); venulações de quartzo-carbonato-albita (dúcteis-rúteis) nas bordas das zonas cisalhadas; zonas cisalhadas (extensão ondulante c/ diferentes tamanhos de grão); magnetita e pirita ocorrem disseminadas como porfiroblastos (mm-cm) em fraturas e/ou como inclusões, tanto a magnetita quanto a pirita apresentam estados de alteração oxidante (férica); A Cal ocorre em associação com os veios de Qtzo-Albita e zonas saussuritizadas de forma preenchimento. A biotita também ocorre na forma de inclusões em veios de Qtz.

Nome Rocha:

Bt Ms Sieno Granito Cisalhado

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):
Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):
Sieno Granito

ID Amostra: **ABP0009-238,69**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 238,69



Legenda: Rocha Ígnea fracamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha fortemente saussuritizada + epidotizada + com presença de fenocristais (cm) de feldspato (albita) em matriz Qtz-FK e em veios de Qtz-Carb+FK (cm), disseminação de epídoto (alteração) dos FK e vênulas de epídoto (tardias) + vênulas de Qtz-Carbonato-Albita e porfiroblastos (mm) de pirita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

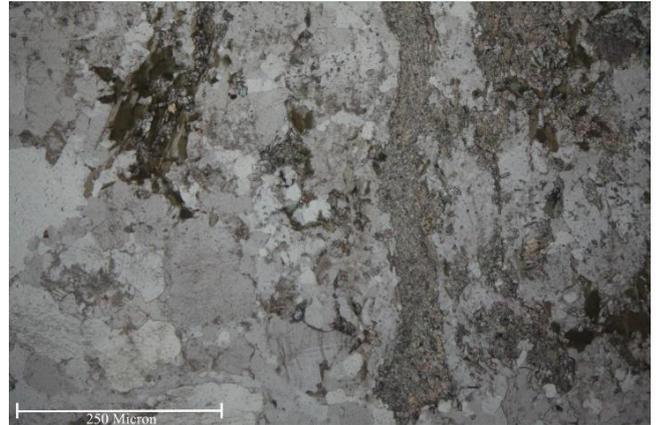
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

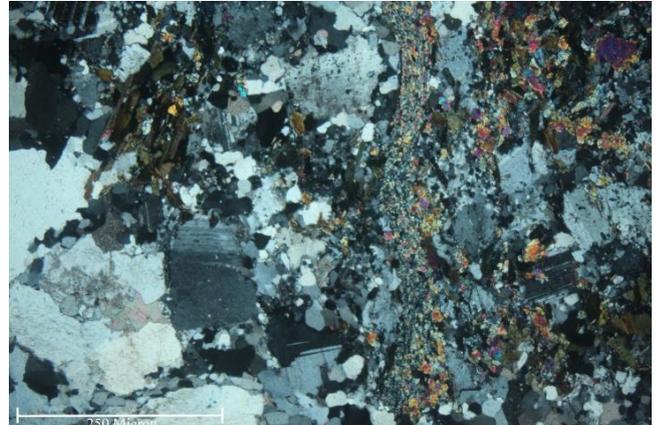
Maciça

Fotomicrografia (A)



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de saussuritização dos feldspatos cm (carbonato + sericita) intersticial + cloritização/sericitização (muscovita+biotita) + fenocristais de albita (cm) associadas a veios de Qtz e disseminados na matriz + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito), intercaladas por vênulas de Epd+Chl e Qtz.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	40	Essencial
Feldspato	25	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	15	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto	15	Acessório
Py; Magnetita?; Rutilo	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) no protólito e planares entre os grãos micáceos (venulas de epídoto/clorita); agregados planares de biotita hidrotermal + muscovita/sericita/clorita associados e/ou próximo as zonas venuladas; epídoto ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz (cerca 30% das albitas) e de forma venulada; venulações de quartzo-carbonato-albita (dúcteis-rúteis); py >> mgn ocorrem disseminadas como inclusões (mm) em Qtz; A Cal ocorre em associação com os veios de Qtzo-Albita e zonas saussuritizadas de forma preenchimento.

Nome Rocha:

Epd Sieno Granito

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Sieno Granito

ID Amostra: **ABP0009-293,58**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)



Legenda: Rocha Ígnea moderadamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha moderadamente epidotizada + sericitizada + com presença de fenocristais (cm) de feldspato (albita) em matriz Qtz-FK e em veios de Qtz-Carb+FK (cm), disseminação de epidoto (alteração) dos FK + vênulas de Qtz-Carbonato-Albita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

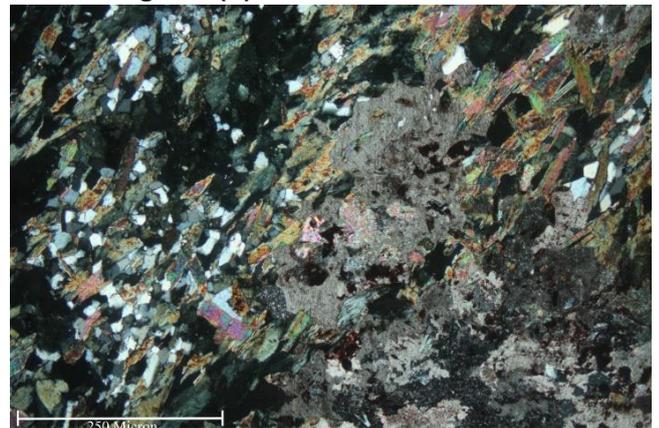
Maciça

Fotomicrografia (A)



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença de saussuritização dos feldspatos cm (sericita>>carbonato) intersticial + cloritização/sericitização (muscovita+biotita) + fenocristais de albita (cm) disseminados na matriz + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito), intercaladas por zonas tabulares (cisalhadas) de Ms+Epd+Ser+Chl.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	40	Essencial
Feldspato	30	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	15	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto	10	Acessório
Py; Magnetita?; Rutilo	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) no protólito e planares entre os grãos micáceos (zonas cisalhadas marcadas por muscovita/epídoto/sericita/clorita); agregados planares de biotita hidrotermal + muscovita/sericita/clorita associados e/ou próximo em zonas cisalhadas; fenocristais de FK (albita?), apresentam com zanações de oxido nas bordas e por vezes ocorrem como agregados; epídoto ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz (cerca 25% das albitas); rt + mgn ocorrem disseminadas como inclusões (mm) em Qtz/FK (oxidados); A Cal ocorre em zonas saussuritizadas como preenchimento.

Nome Rocha:**Epd Sieno Granito****Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):****Fácies Xisto Verde****Protólito (Rochas Metamórficas):****Sieno Granito**

ID Amostra: **ABP0009-447,67**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 447,67



Legenda: Rocha Ígnea levemente alterada e foliada.

Descrição da amostra:

Rocha rica em Pl+Qtz/Bt+Ms e alterada por epidotização/cloritização + com presença de fenocristais planares (cm) de bt/ms em matriz Pl+Qtz (alterada p/ cloritza/sericita) + porfiroblastos de (py>ilm+mgt) disseminados junto a matriz alterada por epídoto+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

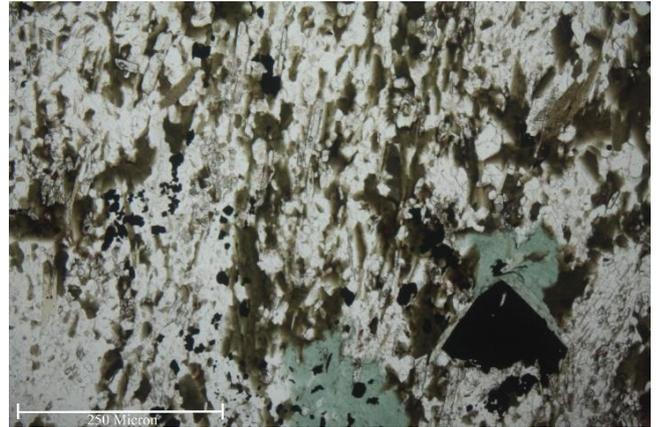
Índice de cor:

Mesocrática

Estrutura:

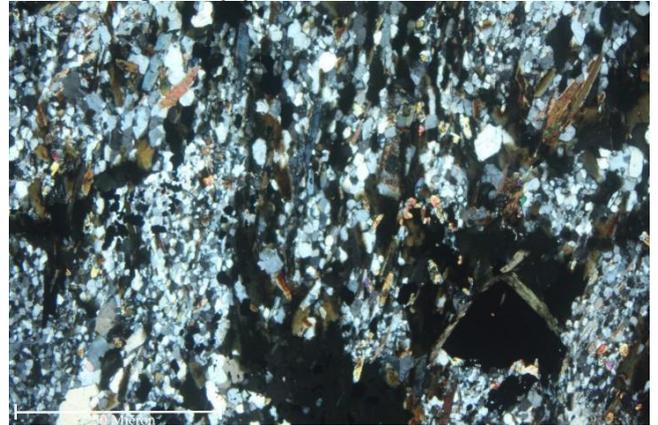
Maciça

Fotomicrografia (A)

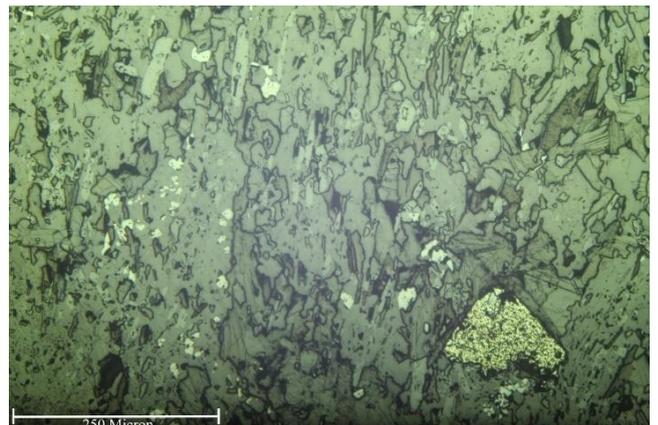


Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica média com presença fenocristais de feldspato, quartzo e agregados estirados biotita/muscovita + alteração dada por cloritização e sericitação

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito) interlulado por zona cisalhadas (epidotização/cloritização) marcada por Bt/Ms/Ser/Epd e porfiroblastos de Py+Il+Mgt.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	40	Essencial
Micas (Ms/Ser+Chl)	20	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto+Anfibolio	5	Acessório
Py; Ilm; Magnetita?	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) matriz do protólito preservado e foliada nas porções alteradas e cisalhadas com agregados orientados de fenocristais de Bt, Ms/Chl; epídoto ocorre de forma disseminada ao longo da trama da matriz (cerca 20% dos feldspatos); il+mgn ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; py ocorrem disseminadas na matriz (cisalhada e preservada) como porfiroblasto, porém, concentra-se em maiores proporções na zona cisalhada. A Cal ocorre como preenchimento nas zonas deformadas.

Nome Rocha:

Bt Ms Diorito

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

(feldspatos+muscovita/biotita) intersticial + matriz do protólito (preservado) definida por Pl+Qtz+Bt/Epd/Ms + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

ID Amostra: **ABP0009-473,40**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 09/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 473,40



Legenda: Rocha Ígnea altamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica em anfibólio e alterada por epidotização/cloritização + com presença de fenocristais fibrosos (cm) de hornblenda em matriz Pl+Qtz (alterada) + veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de (py+cpy+ilm>mgt) e disseminada junto a matriz alterada por epídoto+clorita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

Índice de cor:

Mesocrática

Estrutura:

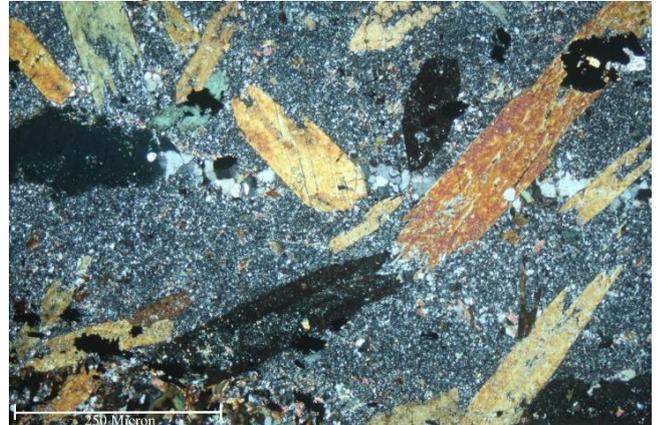
Maciça

Fotomicrografia (A)

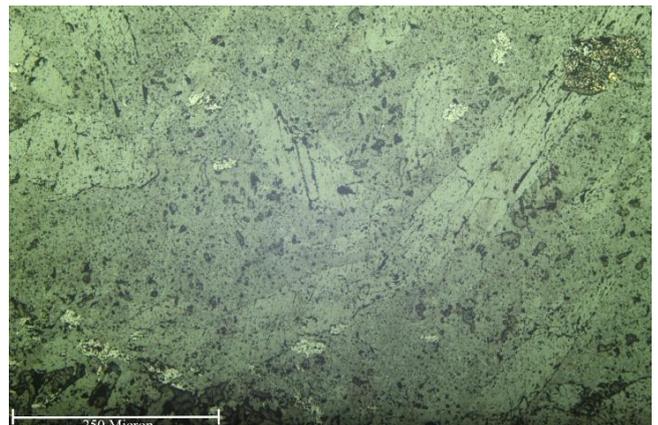


Legenda: NP – Luz Transmitida e Refletida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta textura fanerítica grossa com presença fenocristais de hornblenda (cm) + alteração dada por epidotização (feldspatos) intersticial e cloritização intensa e sericitização

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça nas zonas faneríticas (protólito) em contato zona alteradas (epidotização) de Ms+Epd+Ser+Chl e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	40	Essencial
Micas (Ms/Bt/Chl+Ser)	10	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Epídoto+Anfibolio	15	Acessório
Py; Cpy; Ilm; Magnetita?; Rutilo	Traço	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos (irregulares) tanto na matriz do protólito preservado, quanto nas porções alteradas com fenocristais de Anf, Bt, Ms/Chl, ocorrência de agregados planares de biotita hidrotermal/ muscovita/sericita/clorita associados nas duas porções são e alterada; fenocristais de hornblenda; epidoto ocorre de forma disseminada (pervasiva) ao longo da trama da matriz (cerca 40% das feldspatos); il+rt+mgn ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; py>cpy ocorrem disseminadas na matriz das duas fácies (alteradas e são) da amostra, porém, concentra-se em maiores proporções na zona de epidotização e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento em vênulas.

Nome Rocha:

Anf Diorito

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

(muscovita+biotita) + matriz do protólito (preservado) definida por Pl+Qtz+Bt/Epd/Ms + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

ID Amostra: **ABP0009-189,37**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 189,37



Legenda: Veio de Qtz encaixado em rocha xistosa altamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica muito alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Chl+Ser na foliação presente; alteração dada por cloritização/sericitização+ com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>cpy>>mgt e disseminada junto a matriz alterada por clorita e sericita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

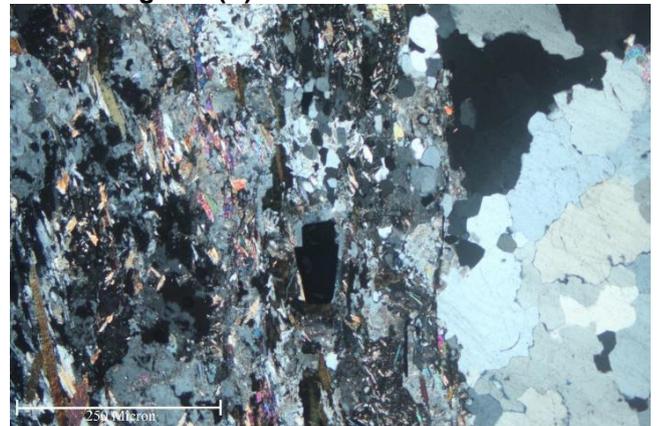
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

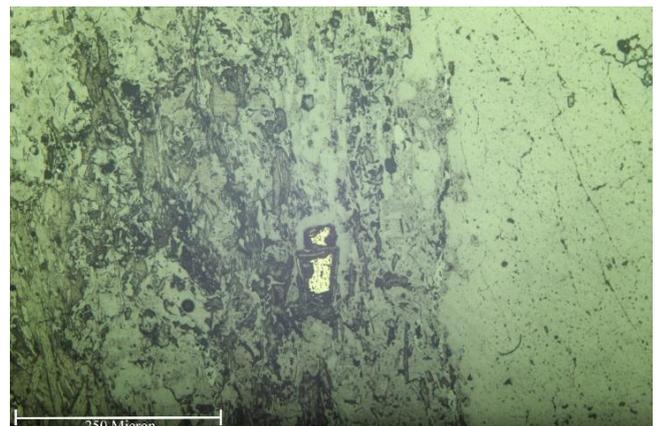


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl/Py/Mgt; alteração dada por cloritização/sericitização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com zona venuladas c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	20	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Bt/Ser+Chl)	45	Essencial
Carbonato	15	Secundário
Py; Cpy; Rutilo; Óxidos; Ap	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e muscovita. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa, a qual, apresenta também indica de formação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de porfiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais. rt e il ocorrem disseminadas como inclusões (mm) e/ou associados a sulfetação; porfiroblastos de py>cpy>>mgt ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e em vênulas. Oxidação de sulfetos são evidenciadas nas bordas dos porfiroblastos de Py.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

ID Amostra: **ABP0009-425,38**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 425,38



Legenda: Veio de Qtz Sulfetado encaixado em rocha xistosa altamente alterada.

Descrição da amostra:

Rocha rica muito alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Chl+Ser na foliação presente; alteração dada por cloritização/sericitização+ com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>cpy>>mgt e disseminada junto a matriz alterada por clorita e sericita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

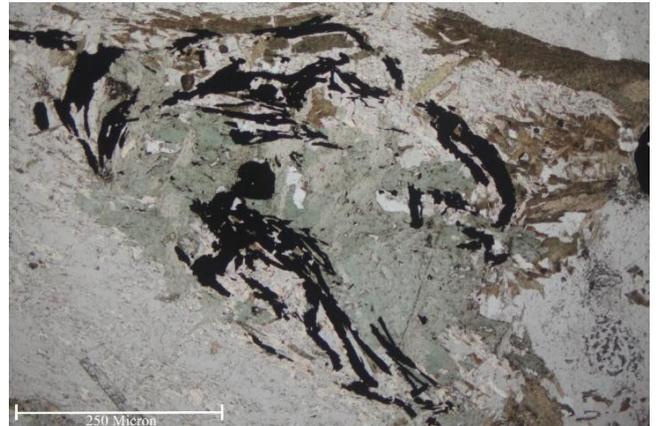
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

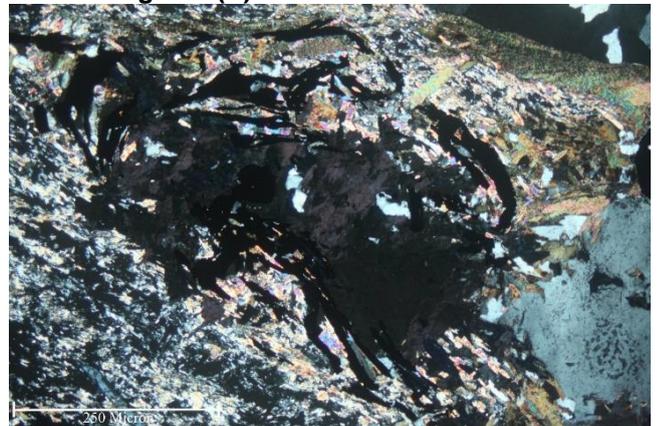
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

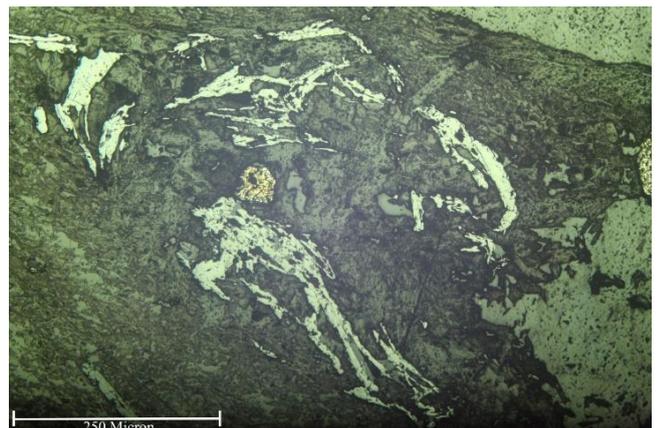


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Diorito

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl/Py/Il; alteração dada por cloritização/sericitização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com zona venuladas c/ Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	35	Essencial
Feldspato	10	Essencial
Micas (Ms/Bt/Chl/Ser)	40	Essencial
Carbonato	10	Secundário
Py; Cpy; Óxidos; Ap	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e muscovita. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama xistosa (cloritizada e sericitizada), a qual, apresenta também indica deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de profiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais. Il ocorrem disseminadas na matriz micacea e/ou associados a sulfetação; profiroblastos de py>cpy>il ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

ID Amostra: **ABP0009-460,47**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

Foto amostra (macro)

ABP0009 – 460,47



Legenda: Rocha xistosa altamente alterada com Veio de Qtzo sulfetado associado.

Descrição da amostra:

Rocha rica muito alterada na matriz (protólito) e Bt+Ms+Chl+Ser na foliação presente; alteração dada por cloritização/sericitização+ com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms encaixada em veios de Qtz-Carb (mm), c/ porfiroblastos de py>cpy>>il e disseminada junto a matriz alterada por clorita e sericita.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

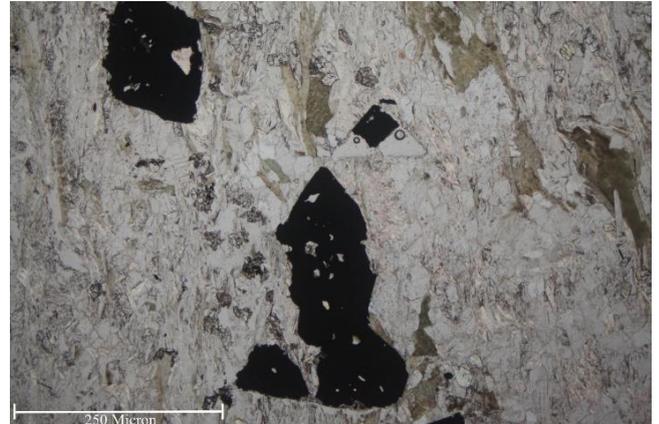
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

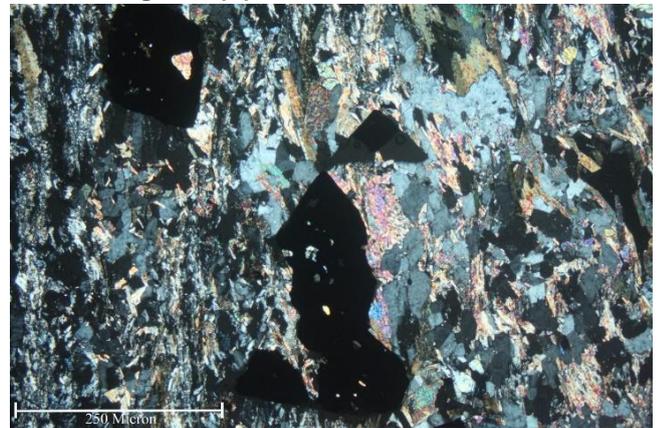
Xistosidade

Fotomicrografia (A)

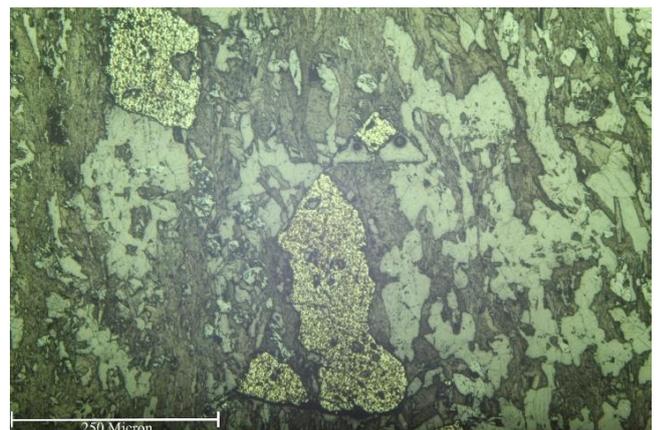


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura porfiroblastica dada por Qtz/FK/Pl/Py/Il; alteração dada por cloritização/sericitização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma xistosa (determinada por minerais micáceos); alternada com veios de Qtz/FK/Pl/Cal e venulações de Qtz+Carb+sulfeto.

Granulação/granulometria:

Grossa

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	30	Essencial
Feldspato	20	Essencial
Micas (Ms/Bt/Chl/Ser)	45	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Py; Cpy; Il; Óxidos; Ap	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos planares nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl, zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e muscovita. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama micácea xistosa (cloritizada e sericitizada), a qual, apresenta também indícios de deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão e crescimentos de quartzos fibrosos nas sombras de pressão de porfiroblastos de pirita. Deformação também presenciada nas venulação de Qtz sigmoidais e estruturas de micafish. Il ocorrem disseminadas na matriz micácea e/ou associados a sulfetação; porfiroblastos de py>cpy>il ocorrem disseminadas na matriz cisalhada micácea e em venulas de Qtz. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e/ou em vênulas associadas ao Qtz.

Nome Rocha:

Ms-Bt-Chl Xisto

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Diorito

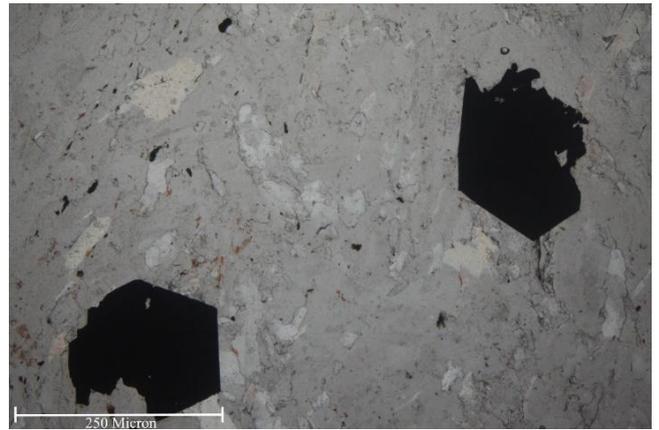
ID Amostra: **ABP0011-396,90**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: Ígnea
 Tipo de Lâmina: Seção Polida
 Tipo de Amostra: Testemunho

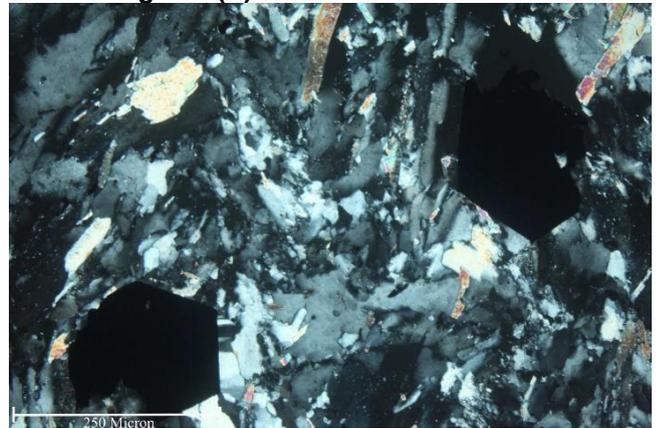
Foto amostra (macro)

ABP0011 – 396,90



Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Transmitida

Legenda: Rocha ígnea moderadamente deformada e alterada.

Descrição da amostra:

Rocha moderadamente alterada na matriz (protólito) e com foliação incipiente marcada por minerais placoides; alteração dada por cloritização/sericitização + com presença de cristais fibrosos (cm) de Bt+Ms e porfiroblastos de mgt > py.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

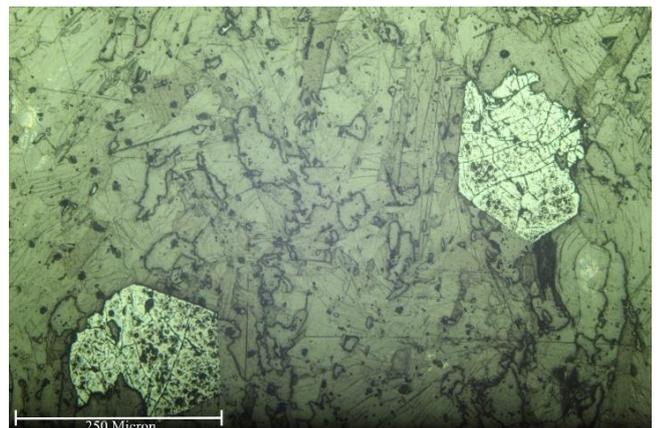
Índice de cor:

Leucocrática

Estrutura:

Maciça

Fotomicrografia (A)



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocrystalina

Descrição textural:

A rocha apresenta em sua maioria textura fanerítica média, definida por fenocristais de

Qtz+FK+PI e subordinadamente texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Ser/Chl e textura

porfiroblastica dada por Qtz/FK/PI/Py/Il; alteração dada por cloritização/sericitização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça (Qtz+FK+PI), alternada com xistosidade incipiente definida por minerais micáceos.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Quartzo	45	Essencial
Feldspato	25	Essencial
Micas (Ms/Bt/Chl/Ser)	20	Essencial
Carbonato	5	Secundário
Mgt; Il; Py traço; Ap; Epd	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos irregulares no protólito ígneo e nas porções cisalhadas e venuladas, Bt/Ms/Chl, possíveis porções distais de zonas de cisalhamento são marcadas por um aumento no teor de biotita e muscovita. A fase associada ao cisalhamento é dada pela trama orientada micácea xistosa (cloritizada e sericitizada), a qual, apresenta também indícios de deformação (sismos) repetidos em textura de quartzo com extinção ondulante e redução de diferentes tamanhos de grão local. porfiroblastos de mgt+il>py ocorrem disseminadas na matriz ígnea e micácea e em venulas de Qtz locais. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e/ou em vênulas associadas ao Qtz.

Nome Rocha:

Bt Tonalito fracamente cisalhado

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Tonalito

ID Amostra: **Ultramáfica(Superfície)**
 Petrógrafo
 Jorge Tomás Trovó Echague

Alvo
 Anomalia BP
 Data: 10/01/2024

Tipo de Rocha: **Ígnea**
 Tipo de Lâmina: **Seção Polida**
 Tipo de Amostra: **Am. de mão**

Foto amostra (macro)



Legenda: Rocha ultramáfica com alteração forte.

Descrição da amostra:

Rocha altamente alterada na matriz (protólito), porfiroclastos de anfibólio + minerais placoides (Bt+Ms) subordinados; alteração dada por cloritização e porfiroblastos de mgt > il.

Grau de visibilidade:

Fanerítica

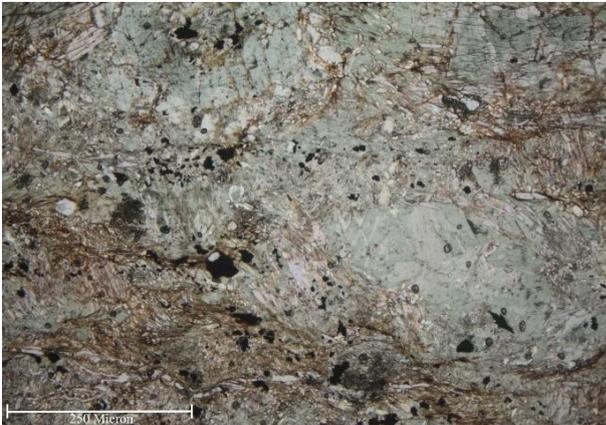
Índice de cor:

Melanocrática

Estrutura:

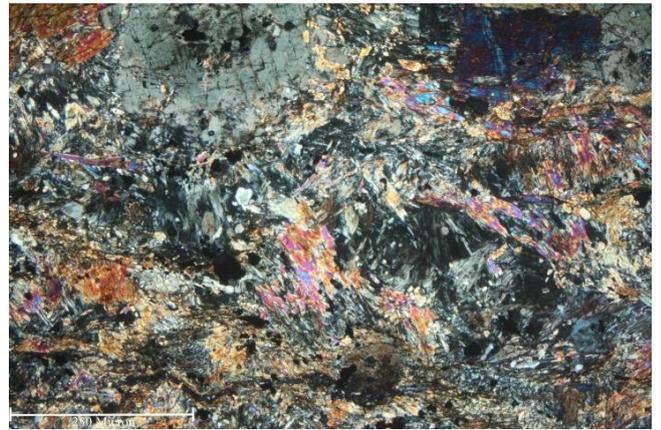
Maciça

Fotomicrografia (A)

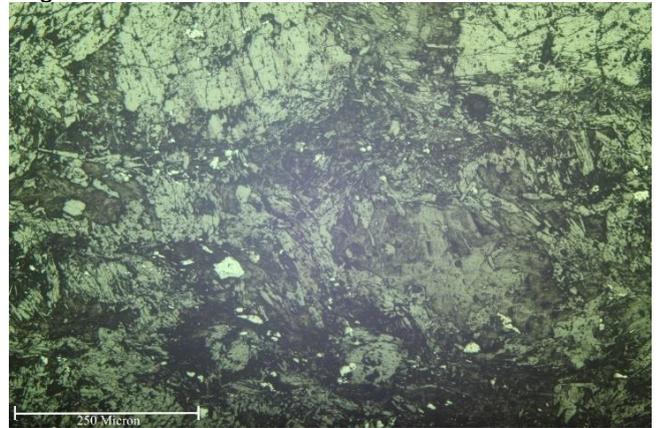


Legenda: NP – Luz Transmitida

Fotomicrografia (B)



Legenda: NX – Luz Trasmiteda



Legenda: NX – Luz Transmitida e Refletida

Grau de cristalinidade:

Hipocristalina

Descrição textural:

A rocha apresenta em sua maioria textura nematoblástica, definida por minerais prismáticos de anfibólio e, subordinadamente, texturas lepidoblástica (minerais placoides) – com presença de Ms/Bt/Chl e textura porfiroblastica dada por Mgt/Il; alteração dada por cloritização + forma geométrica dos grãos hipidiomórficas.

Descrição estrutural:

Majoritariamente arranjada de forma maciça (Anf+Pl+Qtz+FK), alternada com foliação incipiente definida por minerais micáceos.

Granulação/granulometria:

Média

Tamanho relativo dos cristais:

Inequigranular

Composição modal (maior → menor)

Mineral	%	Tipo
Anfibolio	45	Essencial
Plagioclásio	25	Essencial
Micas (Ms/Bt)	20	Acessório

Quartzo e Feldspato	5	Secundário
Mgt; Il; Epd	5	Acessório

Descrição das relações entre os minerais:

Articulação entre os grãos irregulares no protólito ígneo e nas porções dos minerais prismáticos (planares). Presença de minerais micáceos denotando início de foliação incipiente (cisalhamento)? Porfiroblastos de mgt>il ocorrem disseminadas na matriz máfica e micácea. A Cal ocorre como preenchimento na matriz e/ou em vênulas associadas ao Qtz.

Nome Rocha:

Mgt Anfibolito fracamente cisalhado

Grau Metamórfico (Rochas Metamórficas):

Fácies Xisto Verde

Protólito (Rochas Metamórficas):

Gabro

APÊNDICE 2

Artigo publicado na revista Minerals (MDPI)

Application of Geophysical Methods in the Identification of Mineralized Structures and Ranking of Areas for Drilling as Exemplified by Alto Guaporé Orogenic Gold Province

Jorge Echague ^{1,*}, Marcelo Leão-Santos ^{1,2}, Rodrigo Melo ³, Thiago Mendes ¹ and Welitom Borges ¹

¹ Institute of Geosciences, University of Brasília, Brasília 70910-900, DF, Brazil; marcelo.leao@unb.br (M.L.-S.); thiagomendes.geof@gmail.com (T.M.); welitom@unb.br (W.B.)

² Faculty of Planaltina, University of Brasília, Brasília 73345-010, DF, Brazil

³ Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro 13506-900, SP, Brazil; rp.melo@unesp.br

* Correspondence: jorgetrovo15@gmail.com

Abstract: Mineral exploration works conducted in the Alto Guaporé Gold Province (AGGP), situated in the southwest region of the Amazon Craton in Brazil, faces the challenges of many gold provinces around the world, i.e., declines in the discoveries of new economic deposits and increases in exploration costs. Ground geophysical methods, combined with structural analyses and geological mapping, are valuable tools that have potential to improve accuracy in selecting exploration targets and in determining drilling locations. AGGP deposits are primarily associated with regional N20°–W50° inverse faulting and sheared geologic contacts between Meso-Neoproterozoic siliciclastic metasedimentary rocks and Mesoproterozoic basement (granite and volcano–sedimentary sequences). Mining currently occurring in the central portion of the province drives exploration works towards the many existing targets at the area. Among them, the ABP target is one of the most promising for being located few kilometers north of the Pau-a-Pique mine. At the ABP target, gold is associated with hydrothermal alteration located in the sheared contacts and in the hinge zone of folded metasedimentary sequence. Hydrothermal phases include Fe-oxides, sulfide (py), muscovite and quartz veins. In this study, we use magnetic and geoelectric (induced polarization) surveys coupled with structural and geological mapping to identify potential footprints within the ABP target. The results from induced polarization (IP) profiles successfully mapped the shape and orientation of the main structures down to approximately 350 m at the ABP target, indicating potential locations for hydrothermal alteration hosting gold. Additionally, 3D magnetic data inversions illustrated the distribution of magnetic susceptibilities and magnetization vectors associated with shear zone structures and isolated magnetic bodies. Magnetic data highlighted fault zones along the contacts between metamorphic rocks and granites, while IP data identified areas with high chargeability, correlating with sulfidation zones mineralized with gold. These findings suggest a metallogenic model where gold deposits are transported through deep structures connected to regional faults, implying significant tectonic and structural control over gold deposition. The results underscore the potential of multiparameter geophysics in identifying and characterizing deposits in both deep and strike, thereby advancing our understanding of mineral occurrences in the region and enhancing the search for new mineralized zones.



Citation: Echague, J.; Leão-Santos, M.; Melo, R.; Mendes, T.; Borges, W. Application of Geophysical Methods in the Identification of Mineralized Structures and Ranking of Areas for Drilling as Exemplified by Alto Guaporé Orogenic Gold Province. *Minerals* **2024**, *14*, 788. <https://doi.org/10.3390/min14080788>

Academic Editors: Stanisław Mazur and Amin Beiranvand Pour

Received: 24 May 2024

Revised: 4 July 2024

Accepted: 12 July 2024

Published: 31 July 2024



Copyright: © 2024 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords: Alto Guaporé Gold Province (AGGP); gold exploration; magnetometry; induced polarization (IP); fault zones; geological-geophysical prospecting model

1. Introduction

Although the discovery of new metallic mineral deposits, including gold, has declined on a global scale, costs have risen significantly in recent years, placing pressure on mineral

exploration teams to enhance their precision through more meticulous target selection [1] and a reduction in geological drilling expenses.

When entering an immature province, greenfield exploration teams typically deal with limited information. Therefore, area selection must be based on the use of conceptual models that are based on the mineral system concept and applied at the province scale. In addition to this, the models must consider parameters of fertility, architecture, geodynamics and preservation (e.g., [2]). An important parameter in this analysis is the matter of scale. Gold deposits of different types (e.g., orogenic gold, Carlin type, iron oxide copper gold ore deposits (IOCG), intrusion-related gold deposits (IRGD)) exhibit distinct characteristics when analyzed individually. However, at the lithospheric scale, they may have been formed in the same geodynamic context. Consequently, the individual analysis and ranking of targets should be accompanied by an analysis of the tectonic context where these targets are embedded. (e.g., [1]).

In more mature provinces, the challenge for brownfield exploration teams is to correlate and interpret large volumes of data and generate new targets from existing data in order to optimize work and reduce exploration costs. Roshanravan et al. [3] put forth a methodology comprising the following steps: (a) correlation of available data; (b) identification of key expressions and ingredients of mappable ore-forming processes, using spatial data modeling (particularly inversion and modeling together with advanced geophysical data filtering); (c) development of a conceptual model based on the mineral system concept; (d) translation of the conceptual model into an effective tool in target generation.

In the western portion of the Brazilian state of Mato Grosso, situated in close proximity to the international border with Bolivia, a series of Au + base metal deposits have been identified. These include (1) gold deposits of the Alto Guaporé Gold Province in Mato Grosso (e.g., [4–10]); (2) gold deposits of the San Ramon Gold Province in Bolivia; (3) the Cu-Au-Ag polymetallic Don Mario deposit, Bolivia [11]; and (4) the Cu-Au polymetallic Cabaçal deposit [12,13] considered a VMS by some authors (Figure 1). Although the deposits in question are relatively small to medium in size, their occurrence in a geotectonic context (i.e., near the Neoproterozoic margin of the Amazon Craton) serves to highlight the region as an important exploratory frontier in South America. This is because the region has large areas that remain unexplored alongside more developed provinces. The Alto Guaporé Gold Province (AGGP) is the most extensively studied of the aforementioned deposits. The province encompasses a series of gold deposits situated along a fold belt spanning over 500 km, designated the Aguapeí Belt [14–17]. The total resources are estimated at >1.8 Moz, based on production, resources and reserves from exploration and mining activities over the past 40 years [9]. However, these deposits have been exploited since the colonial period (e.g., [18]).

These deposits, which were formed in the early Neoproterozoic (~920 Ma), are interpreted as orogenic gold deposits generated by low-salinity aquo-carbonic fluids (e.g., [4–7,9,18]). The mineralizing fluids originated from metamorphic processes involving siliciclastic sedimentary sequences (Aguapeí Group) deposited in a rift basin during the late Mesoproterozoic (e.g., [17,19–23]). AGGP deposits are hosted in second- or third-order structures near the suture zone between the Paraguá Block and the Amazon Craton (e.g., [24]). Mineralization styles include quartz veins with sulfides (e.g., pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite) found in regional folds and shear zones at the contact between Aguapeí metasediments and basement rocks ([9]).

The ABP target, situated 6 km to the north of the Pau-a-Pique mine, represents a strategic exploratory site. Within the target, gold occurrences have been found within the contact zone between the granites of the Pindaituba Intrusive Suite and the metasediments of the Aguapeí Group, as well as within hydrothermally altered folded Aguapeí metasediments. The contact between the igneous basement and metasediments is marked by faulting and shearing associated with the corridor shear zone ([25,26]). The ore zone consists of quartz veins with hydrothermal muscovite, which host high-grade mineralization. The

hydrothermally altered folded Aguapeí metasediments are situated within the context of the Caldeirão syncline hinge zone (e.g., [7–9,18,27]).

Despite being considered a mature province in terms of exploration, the Alto Guaporé Gold Province (AGGP) lacks significant geophysical research at the district or deposit scale compared to major orogenic gold provinces worldwide. Regionally, the existing literature consists of the following: (1) seismology that investigates the deep crust in the region (e.g., [28]); (2) regional studies in the neighboring Cabaçal deposit that employ potential methods that utilize the contrast between magnetic and radiometric properties to identify dioritic/porphyritic intrusions hosting gold, copper and zinc mineralization [29]; (3) studies that apply inversion of regional aeromagnetic data to guide exploration activities [30]. None of aforementioned studies are focused on identifying structurally controlled gold deposits at the deposit or district scale. The effectiveness of using geophysical–geological tools to search for orogenic gold mineralization has been reported in the literature. At the regional scale, integrating aeromagnetic and geoelectric data with geological and structural information facilitates the identification of prospective areas, which can then be validated by using robust geological and structural interpretation (i.e., shear zones) and their correlation with known deposits (e.g., [31]). At both the district and deposit scales, detailed terrestrial potential and electromagnetic surveys conducted throughout various stages of exploratory research, integrated with geological (geochemical and structural) data, enable the development of a prospective (favorability) model for mineralization, which is validated using robust mathematical tools to establish associations between known deposits, occurrences and geophysical signatures (e.g., [32]). In deeper portions of the crust, integrating potential, seismic and electrical data with good quality geological information can enhance our understanding of the genesis of orogenic gold mineralization, as validated by drilling data (e.g., [33,34]).

Previous works have utilized induced polarization to investigate electrical conductivity and chargeability (disseminated) metallic minerals associated with orogenic gold deposits (e.g., [35–38]). Examples demonstrating the effective application of this method in gold exploration are provided, all of which rely on accurate geological knowledge of the area and optimized survey scales (i.e., mineralization thickness; alterations; host/host rocks and type of sulfidation) [35–38].

The ABP target was chosen as a case study for ground geophysical surveys (magnetometry and IP) due to its strategic location near the Pau-a-Pique mine and its geological and structural context. The objective of this study was to assess the applicability of these methods at a district/deposit scale in brownfield exploration of orogenic gold deposits. The geological environment where the target is situated is characterized by low magnetic gradients [39] and potential for polarization (e.g., presence of disseminated sulfides). The findings of this study illustrate the potential of ground geophysics as a tool for guiding the exploration of orogenic gold deposits in mature provinces.

2. Geological Context

2.1. Geological Settings

The study area is situated in the southwestern portion of the Amazon Craton (Figure 1) within the geo-tectonic context of the Sunsás–Aguapeí orogeny (1.25–1.00 Ga) (e.g., [26,40,41]). The AGGP deposits are hosted along the Aguapeí Belt, a narrow (~30 km wide) belt of low-grade Neoproterozoic metamorphic folds (~0.92 Ga) [18]. The Western Amazon Belt developed during the final stages of reactivation, transpression and closure of rift-type basins, resulting from the convergence between the Paraguá Block and the Amazon Craton [42].

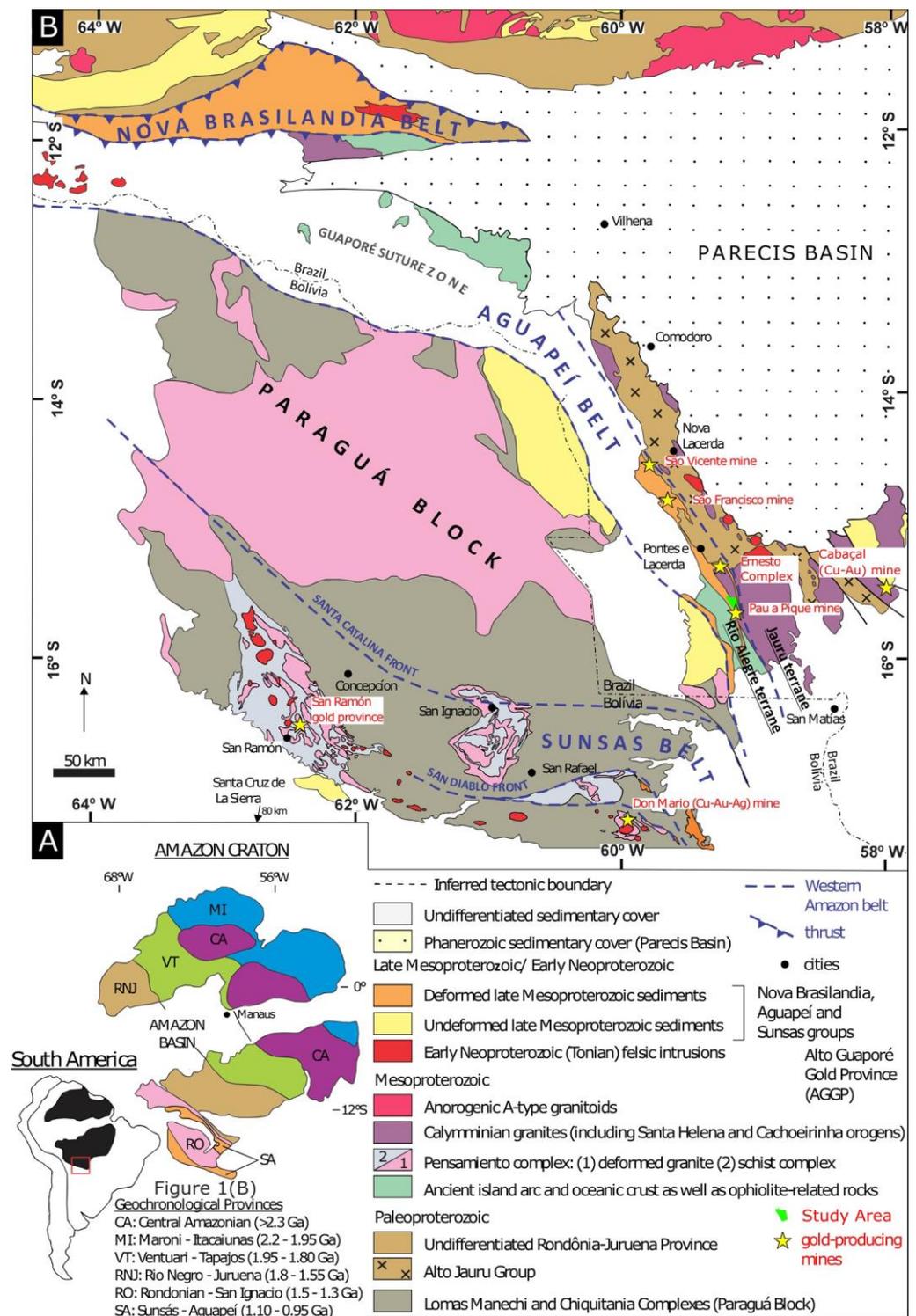


Figure 1. Regional geologic settings (extracted and modified from [9]). (A) Major geochronological provinces of the Amazon Craton according to [40] and its location in South America. (B) Major geologic and tectonic domains of the southwest Amazon Craton (modified from [24,27], after [42–45]). The dashed blue line represents the limits of early Neoproterozoic belts that constitute the Western Amazon Belt [42]. The Aguapeí Belt, the youngest fold–thrust belt formed during the Sunsás–Aguapeí orogeny ([14,15,17]), began with the deposition of siliciclastic sediments of the Aguapeí Group in rift-type basins (1265–1150 Ma) [19,20,41], later deformed and metamorphosed at a low grade during the final stages of compression and transpression along the Mesoproterozoic margin of the Amazon Craton (e.g., [9,42]).

The Aguapeí Group encompasses a thick sequence of siliciclastic metasedimentary rocks deposited in an aulacogen-type basin ([21,23,46]) between 1265 and 1149 ± 7 Ma ([19,47]). The group is divided into three formations: the Fortuna Formation (conglomerates and quartz arenites), the Vale da Promissão Formation (metapsammites and metapelites) and the Morro Cristalina Formation (fluvial sandstones and siltstones) [21–23]. The aforementioned rocks exhibit green schist facies low-grade metamorphism ([18,23,27,48]).

The Aguapeí Group's basement comprises rocks originating from the Rio Alegre and Jauru terrains. The Rio Alegre Terrain is composed of meta-volcano-sedimentary rocks (Minouro, Santa Isabel and São Fabiano Formations) [49], which have been interpreted as a suture zone between the Paraguá Block and the Amazon Craton (e.g., [24]). The Jauru Terrain (1780 Ma–1420 Ma) encompasses Paleoproterozoic and Mesoproterozoic igneous and metamorphic rocks, including the Alto Jauru Group, Alto Guaporé Metamorphic Complex and Figueira Branca Intrusive Suite [26].

In the study area, the basement of the Aguapeí Group is represented by granites and granitoids of the Pindaituba Intrusive Suite (Maraboa, Guaporé, Santa Elina granites and Lavrinha Tonalite) [25,26]. These rocks are interpreted as continental magmatic arc granitoids, with crystallization ages estimated between 1465 ± 4 Ma [50] and 1461.6 ± 4 Ma [9].

2.2. ABP Target

The ABP target is located in the central part of the Alto Guaporé Gold Province (AGGP), between the municipalities of Pontes e Lacerda and Porto Esperidião, approximately 6 km north of the Pau-a-Pique Mine (Figure 2). In this area, Mesoproterozoic granites are exposed in the relatively flat foothills of the NW-oriented Pau-a-Pique ridge, while metasedimentary rocks of the Aguapeí Group form outcrops on the mid-slope and hilltop of the ridge. The shaded relief in the background of the geological map (Figure 3B) illustrates the topography and elevation differences, which range from 325 m to 575 m, in the target area.

The ABP target comprises three gold occurrences known as Cunha, Serrinha and Ferruginous (Figure 3B). The Cunha occurrence, situated in the eastern part of the target, lies at the eastern contact of a wedge-shaped layer of metaconglomerate, tectonically emplaced within the surrounding basement granite. This metasedimentary wedge is approximately 100 m thick and extends over 400 m in length (Figure 3B). In cross-section, it exhibits a triangular shape (Figure 3A) and is interpreted as tectonically intercalated metasediments within the granite basement. Above-background gold grades mark a gold anomaly at the surface, which is associated with a zone rich in iron oxide minerals (e.g., hematite, specularite and minor magnetite). The hydrothermal fluids circulating throughout the shear zone altered the mylonite into layers of hydrothermal muscovite and biotite and precipitated quartz veins (e.g., [9]). The shear zone is estimated to be approximately 200 m thick and over 3.5 km in length (Figure 3B).

The Serrinha occurrence resembles the Cunha occurrence as it is also located along the sheared contact between the granite and metasediments (i.e., metarenites and lithic metarenites and conglomerates). The hydrothermal alteration observed at Serrinha mimics that of the Cunha occurrence, characterized by swarms of centimeter-scale quartz veins associated with hydrothermal muscovite-biotite “schists”, iron oxide (magnetite) (Figure 4iv,v), disseminated sulfides (pyrite) and pervasive silicification. The Ferruginous occurrence features a zone with strong presence of Fe-oxides (hematite + magnetite) (Figure 4iii) and sulfides (cubic to octahedral pyrite), disseminated throughout the folded metasedimentary rocks (metarenite and metaconglomerate) of the Aguapeí Group. This zone, characterized by Fe-oxides and sulfides, is associated with higher-than-background gold grades and has a lenticular shape, approximately 50 m thick and over 3 km in length, arranged as lenses along the strike.

In both Serrinha and Cunha, the quartz veins are white and translucent, occurring at centimeter-scale, sometimes with calcite (Figure 5A) and albite (Figure 5B) and surrounded by hydrothermal muscovite and biotite (Figure 5). Other hydrothermal phases present,

include magnetite (Figure 5B), calcite (Figure 5C) and sulfides (pyrite and lesser amounts of chalcopyrite) (Figure 5A,D-F).

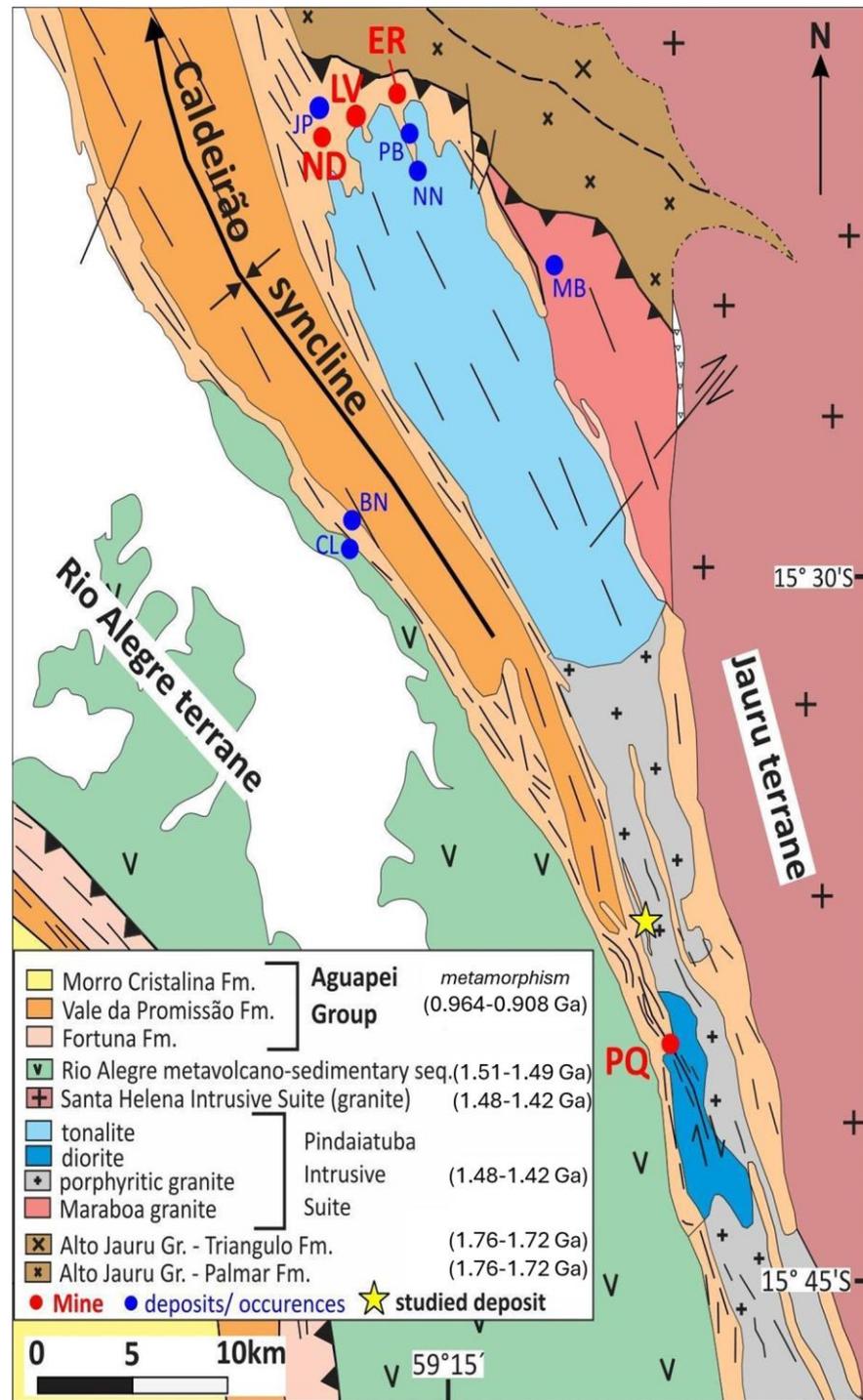


Figure 2. Geological map of the central portion of Aguapeí Gold Province (AGGP) indicating the approximate location of the studied deposit (ABP target) as well as commercial mines and known gold occurrences. BN = Bananal; CL = Caldeirão; ER = Ernesto; JP = Japonês; LV = Lavrinha; MB = Maraboa; ND = Nosde; NN = Nene; PB = Pombinhas; PQ = Pau-a-Pique. Modified from [9].

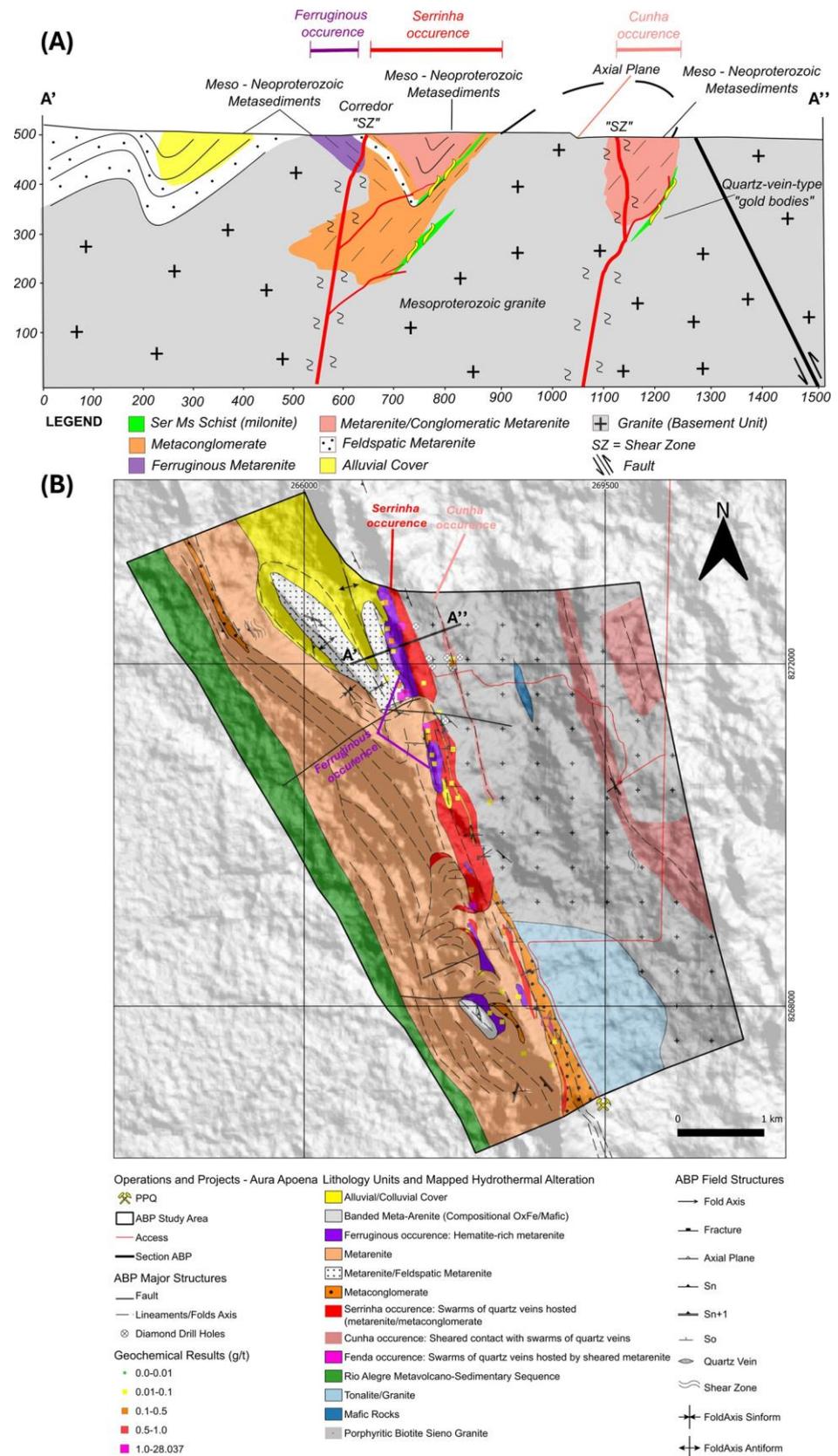


Figure 3. Geological map and profile section of APB Target. (A) Interpreted geological section of the studied area. (B) Detailed geological map with mapped hydrothermal alteration of the three gold occurrences of ABP target. PPQ = Pau-a-Pique and ABP = BP Anomaly.

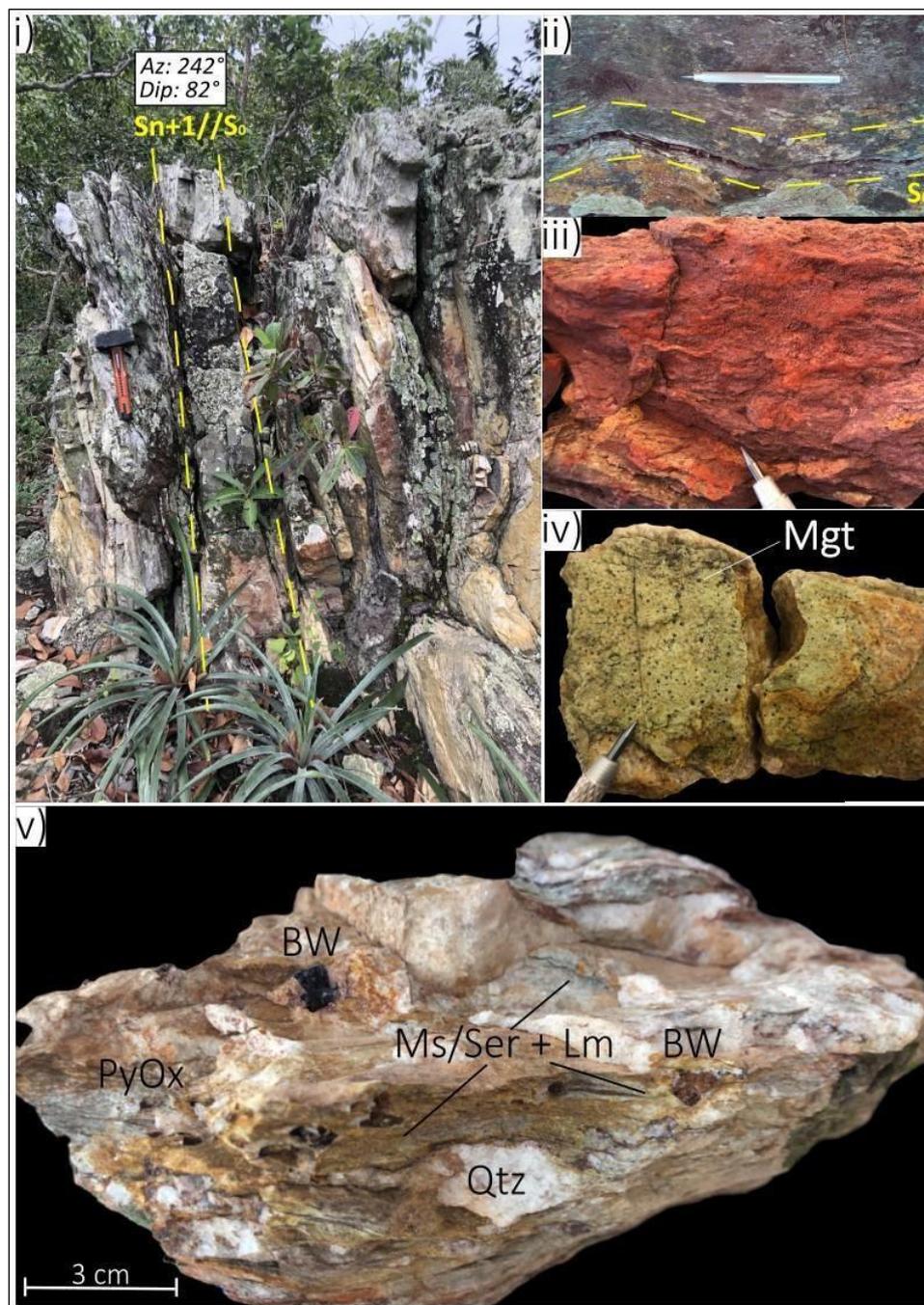


Figure 4. Photos showing the aspects of weathered surface exposures of the ABP target's hydrothermal alteration. (i) Intensely deformed metasedimentary rocks cropping on hangwall of Serrinha occurrence, shown by vertically displayed layers of metaconglomerate interbedded with medium- to coarse-grained metarenite. (ii) Detail of fine to medium grained metarenite present on hangwall Serrinha occurrence showing moderate deformation and stratification (S_0) parallel to the main foliation ($S_n + 1$); (iii) ferruginous metarenite from ferruginous occurrence characterized by limonitized hydrothermal hematite/specularite and oxidized pyrite; (iv) sample of silicified metarenite with disseminated magnetite from Serrinha occurrence; and (v) weathered sample of hydrothermal alteration of Serrinha occurrence characterized by sigmoidal shape quartz veins associated with muscovite, oxidized pyrite, limonite and box work texture. Az = Azimute; Mgt = magnetite; BW = boxwork; PyOx = oxidized sulfide; Ms = muscovite; Ser = sericite; Lm = limonite and Qtz = quartz.

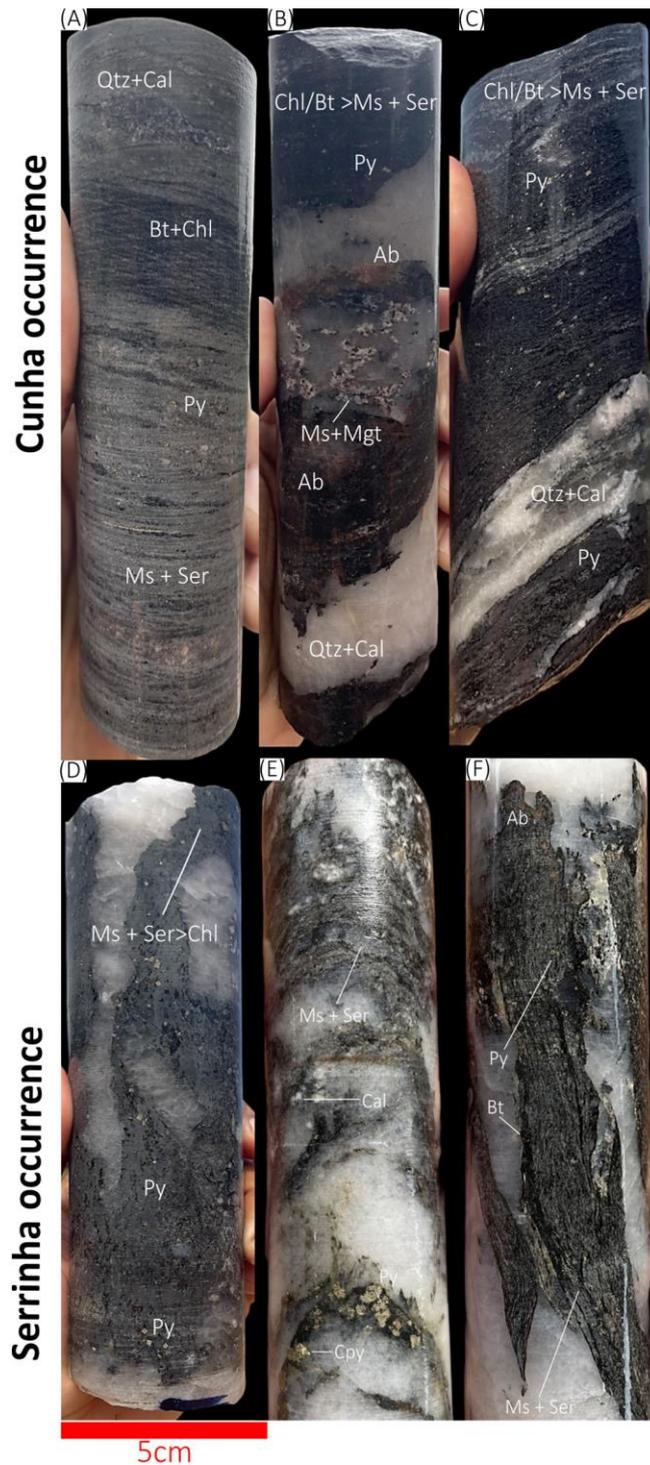


Figure 5. Drill core photos showing the aspects of hydrothermal alteration of Cunha and Serrinha occurrence in ABP target. Photos show that Cunha hydrothermal alteration is given by quartz±calcite veins (C) in association with hydrothermal muscovite—biotite “schist” formed at the sheared contact (A) between metasediments of the Aguapeí Group and the granitic basement. The other hydrothermal phases include magnetite (B); albite (B,F); calcite (C,E); pyrite (A,D–F) and chalcopyrite (E). The characteristics of mineralization in the context of the Serrinha system, with gradation between the granite basement and venulated deformed zones (hydrothermal schist muscovite layers) have paragenesis defined by $Qtz + Cal + Al + Py > Cpy + Ms-Ser$ and Mgt and Bt trace. Mgt = magnetite; Py = pyrite; Cpy = calcopirite; Ms = muscovite; Ser = sericite; Cal = calcite; Bt = biotite and Qtz = quartz.

Similarly to the *Pau-a-Pique* deposit, the mineralized zones of the Serrinha and Cunha are hosted within a hydrothermal muscovite layer associated with quartz veins and sulfide (Figure 4), developed at the contact between the granite in the footwall and the metasediments in the hangwall. These mineralized zones, formed along subvertical, NNW-oriented shear zones, dipping approximately 75°, with an average thickness of 7 m. The hydrothermal muscovite layer exhibits well-developed schistosity and contains abundant laminated quartz veins that show sigmoidal shapes and are parallel to the foliation. The footwall of the mineralized zones consists of medium- to coarse-grained leucocratic biotite granites with frequent porphyritic texture. These granites are associated with the Pindaituba Intrusive Suite. Occasionally, these rocks exhibit penetrative foliation, sometimes accompanied by mylonitic deformation. The hangwall is composed of intercalations (i.e., fining-upward or coarsening upward sequences) between oligomictic metaconglomerates with quartz and feldspar pebbles up to 5 cm in size. Additionally, it includes metarenites and lithic metarenites as well as conglomerates of the Fortuna Formation, which has quartz and feldspar clasts elongated in the direction of the foliation. These layers show stratification (S_0) parallel to the main foliation (S_{n+1}).

The structural framework of the area where the Target is located is characterized by a complex association of regional-scale structures, resulting from the confluence between the corridor shear zone and the hinge zone of the Caldeirão Syncline (e.g., [5,6,8,9,48,49]) (Figure 3). This is the reason why the target was selected as a case study for this re-search project. In the region of the ABP target, structures associated with two phases of compressional deformation (D1 and D2) and one phase of transpression (D3) have been identified ([7,8,49,51–53]). According to [9], the shear zone was formed during the D2 compression event, which led to the development of mylonitic foliations. However, it is believed that the gold deposition occurred during the D3 phase, during the transition from compressional to transpressional regimes with reactivation of pre-existing structures. The most prominent plane of deformation (S_{n+1}) is consistently parallel to the bedding (S_0).

3. Methods

In this study, magnetic and induced polarization (IP) surveys were conducted along lines intersecting the three gold occurrences of the ABP target.

3.1. Ground Magnetic Survey

The ground magnetic data were acquired by the author with the support of the Aura Minerals Inc. (Road Town, UK) team. The acquisition occurred along lines of approximately 1.5 km in length, oriented NE–SW. A total of 71 lines were surveyed, covering a distance of 107.37 km in total (Figure 6A).

The ground magnetic survey was conducted using two different line spacings (Figure 6A). In the northern portion of the area, where the main gold occurrences of the ABP target are located, the survey grid had a line spacing of 50 m, with readings taken every 25 m along acquisition lines. Conversely, in the southern part, the survey was conducted with a line spacing of 150 m between lines, with readings taken every 25 m along the lines.

The survey configuration was defined based on previously mapped structures in the field, using 1:2500 geological mapping. This approach was important for locating the main structure (corridor shear zone), in the areas of low magnetic anomalies, particularly in the northern portion where a higher level of detail (50 × 25 m) was applied.

The equipment used included of two magnetometers, GSM-19TW and GSM-19W models, manufactured by GEM Systems. To monitor the diurnal variation of the magnetic field, recordings were taken at 30-s intervals at a base station located in a magnetic interference-free area. During the data preprocessing stage, diurnal correction and the removal of the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) were performed. The data were processed using *Oasis Montaj software (Educational Version 2022.1)* [54]. Furthermore, data modelling was conducted to determine the distribution of magnetic susceptibility

values and the direction of the magnetization vector (MVI), which were extracted using VOXI software 2.1. The cell size used was $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 10\text{ m}$ and the default inversion parameters of *Oasis Montaj* were applied for the inversion process.

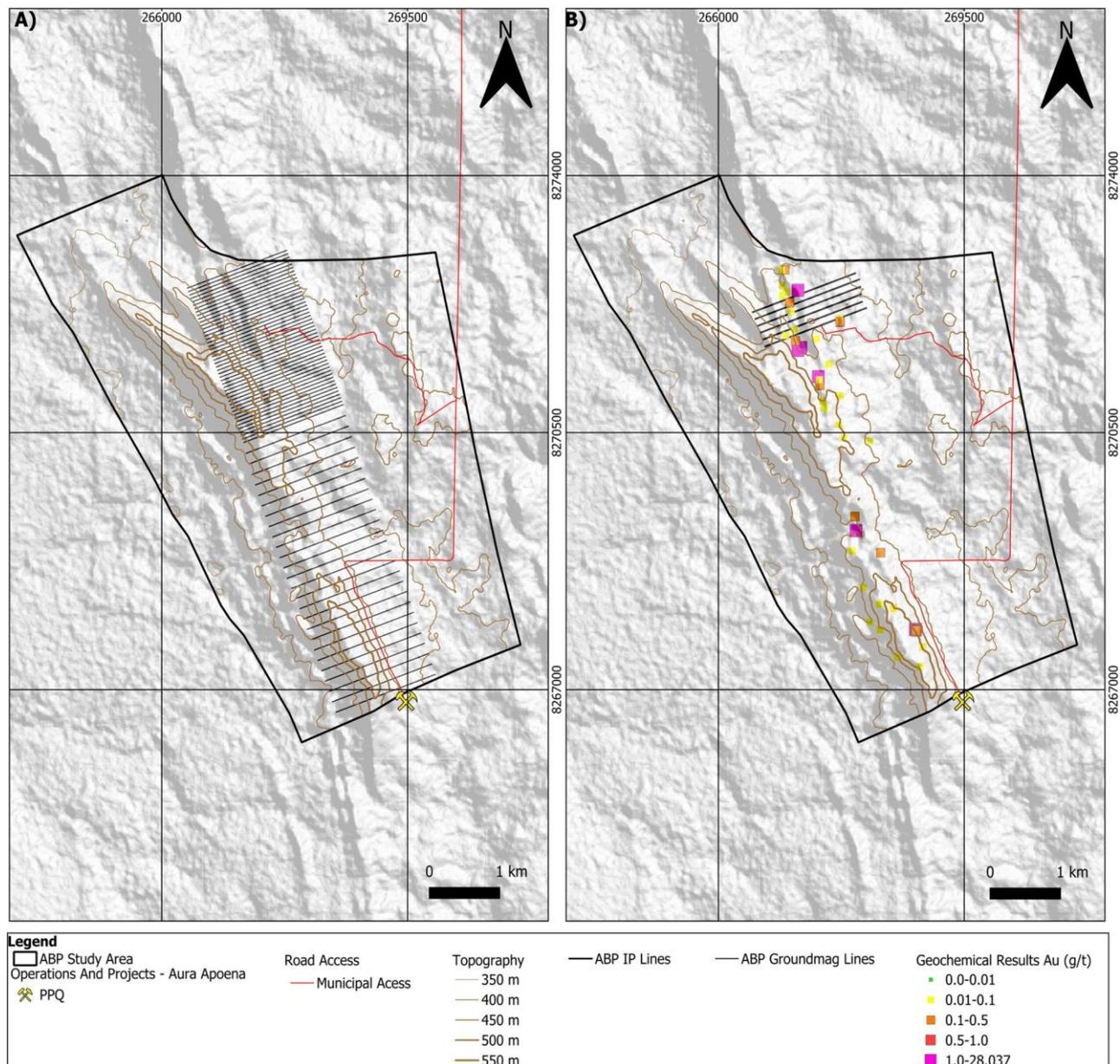


Figure 6. Location map of topographic conditions: (A) magnetic data acquisition lines, (B) induced polarization IP acquisition lines and geochemical anomalies of the area. Digital elevation model (DEM). Source: ALOS PALSAR—radiometric terrain correction. Municipal access points correspond to the red lines. PPQ = Pau-a-Pique and ABP = BP Anomaly.

3.2. Induced Polarization Survey

The induced polarization data were acquired along six lines in the northern portion of the ABP target. These IP survey lines were approximately 1.5 km long (Figure 6B) and oriented NE–SW, perpendicular to the strike of the gold occurrences. The survey grid had a line spacing of 100 m (Figure 6B). Electrodes and dipole lengths (MN and AB) were installed with a spacing of 50 m, except for line 6 (L6), where data acquisition involved two spacings of 25 m and 50 m, respectively. Line 6 was chosen for deploying dipole-dipole

(DD) and pole-dipole (PD) arrays with 10 levels of investigation depth, aiming to select the most suitable for the study area. Line 6 was selected to test different acquisition spacings and arrays, because it covers all the mapped occurrences in the ABP target and exhibits the highest gold grades in both rock geochemical samples and the best intervals in drill holes (Figure 7).

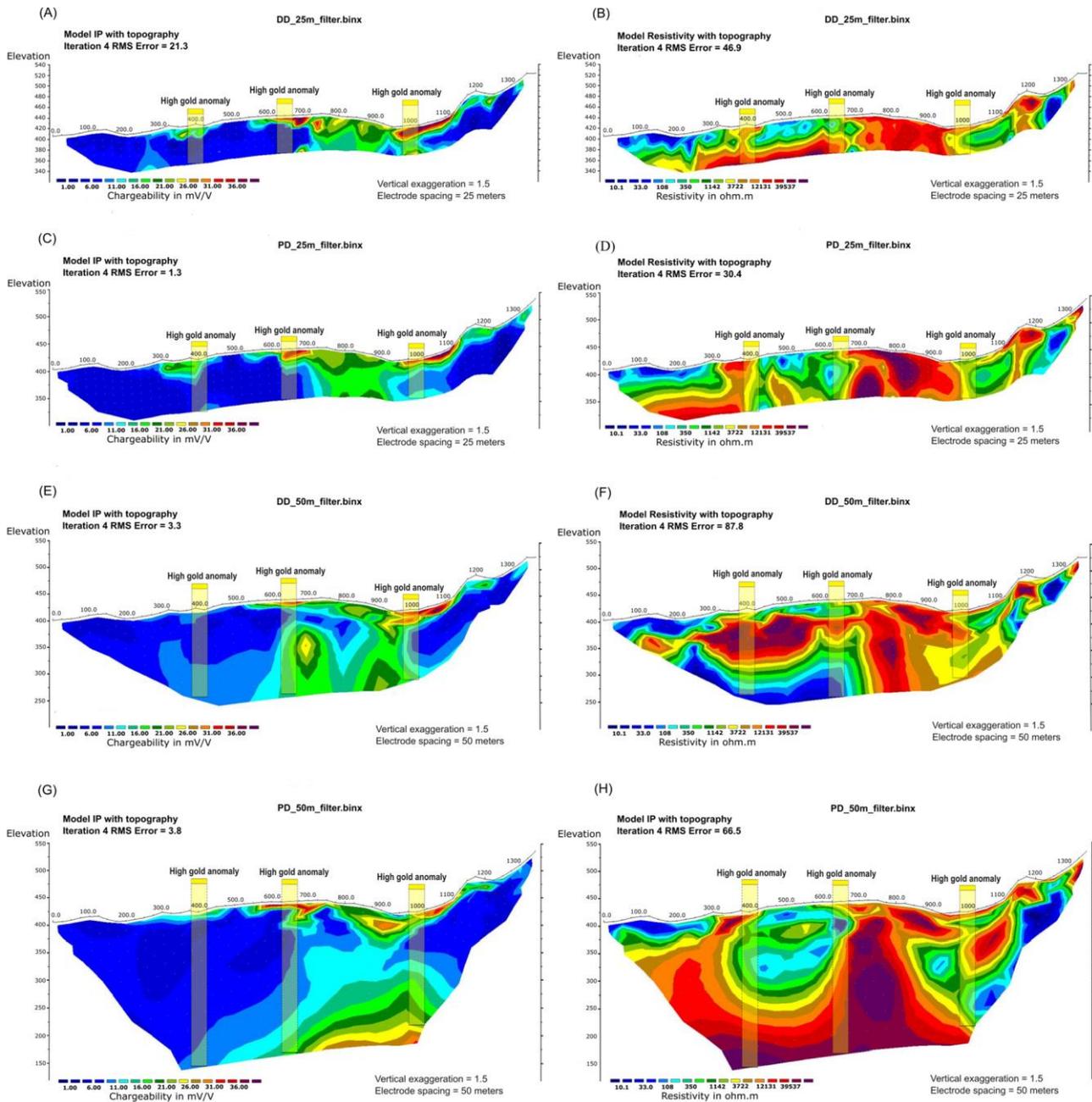


Figure 7. Inverted sections covering the two configurations tested in line 6, dipole–dipole (DD) and pole–dipole (PD) and spacings of 25 and 50 m between the electrodes. In (A–D) sections for line 6 with a spacing of 25 m between the electrodes, with both dipole–dipole and pole–dipole arrangements. (E–H) show sections of the two arrays at 50 m spacing.

In order to facilitate the acquisition of IP data, the following equipment was used: (i) a 10-channel ELREC-PRO receiver and (ii) a VIP 4000 transmitter, both manufactured by Iris Instruments.

The data collection parameters included a current injection and recording cycle of 4000 ms (e.g., 2 s on and 2 s off) and time windows (sampling) of the Cole–Cole potential curve [40]. The electrical current injected by the transmitter ranged from 1 to 3 A, depending on the electrical contact resistance between the current electrode and the ground (e.g., lower currents in areas of outcropping silicified metasediments).

The topography along the IP lines was obtained using a Geodetic GPS model GNSS *Topcon HiPer VR* manufactured by *Topcon Positioning Systems, Inc.* (Livermore, CA, USA).

The data filtering was conducted using the *Prosys III software, version V2.11 (Iris Instruments Inc., Orléans, France)*, based on the following principles: extraction of resistivity records and chargeability outside the log-normal distribution and the identification of chargeability with decay curves that deviate from decreasing exponential functions.

The IP data modeling was performed using the *Res2dinv software, version 2024.1.1 (Seequent)*. In the inverse modeling, the smoothness constrained routine [55] of this program was employed to achieve smoother transitions (e.g., geological materials) and a vertical filter to enhance vertical structures (e.g., shear zones). Subsequently, points with higher RMS errors (spikes) were removed.

The results obtained from the dipole–dipole (DD) array were limited in the study area, at both spacings (25 and 50 m), due to the limited depth of investigation and its low signal-to-noise ratio compared to the pole–dipole (PD) array. Conversely, the PD array offers the benefit of reaching greater depth of investigation. Consequently, the pole–dipole array with 50 m spacing was deemed optimal for continuing the study on the remaining lines, despite the aforementioned limitations. Additionally, when compared to the 25 m spacing, the gains in depth of investigation were significantly greater, considering the larger dimensions of the anomalies observed with the 50 m spacing.

4. Results

4.1. Ground Magnetic Data

The results of the processing of ground magnetic data are presented in maps of residual magnetic field (RMF) and total gradient (GT), Figure 8A,B, respectively, as well as in 3D inversion models of the magnetic data with the recovery of amplitude value of the magnetic vector inversion, which was realized in VOXI (Oasis Montaj).

The analysis of magnetic anomalies on the map, particularly in the total gradient (GT) map (Figure 8B), reveals a linear pattern intertwined with high-frequency magnetic anomalies (0.594–2.591 nT) oriented along a NNW trend. The highest values, both in the total gradient (GT) (Figure 8B) and in the residual magnetic field (RMF) (Figure 8A), are generally associated with exposures of metasedimentary rocks from the Aguapeí Group (metarenites and metaconglomerates) containing iron oxides (magnetite, hematite and ilmenite), while the porphyritic granite of the Pindaituba Intrusive Suite exhibits low magnetic intensity, which contrasts with the metasedimentary rocks amidst a scenario of field variations.

The three-dimensional inversion models (50 × 50 m mesh) of the recovered magnetic bodies (Figure 9) demonstrate that the higher-intensity magnetic anomalies manifest as linear bodies with a NNW trend, which are sub-vertical with a high-angle dip towards the WSW (Figure 9B,C). This pattern is most prominently observed in two regions of the study area: one in the NNW portion, where the most pronounced anomalies are situated, and another in the southeast portion, where a smaller anomaly in terms of area and volume is identified (Figure 9A,B).

In the NNW portion of the study area, a series of open antiforms and synforms with hinge zones oriented in a NNW–SSE direction, folding metasedimentary rocks of the Aguapeí Group are mapped (Figure 5). Regional aeromagnetic surveys ([56,57]) are consistently associated with this orientation pattern and the intensity of total gradient anomalies with the presence of folded Aguapeí Group metasedimentary rocks, especially at the sheared contact between metasediments and basement rocks, typically characterized by subvertical shear zones. In the central–southern part of the belt, these subvertical

shear zones host some of the known gold deposits, such as the Pau-a-Pique mine, where mineralized zones are oriented along NNW trends with a dip to the SW.

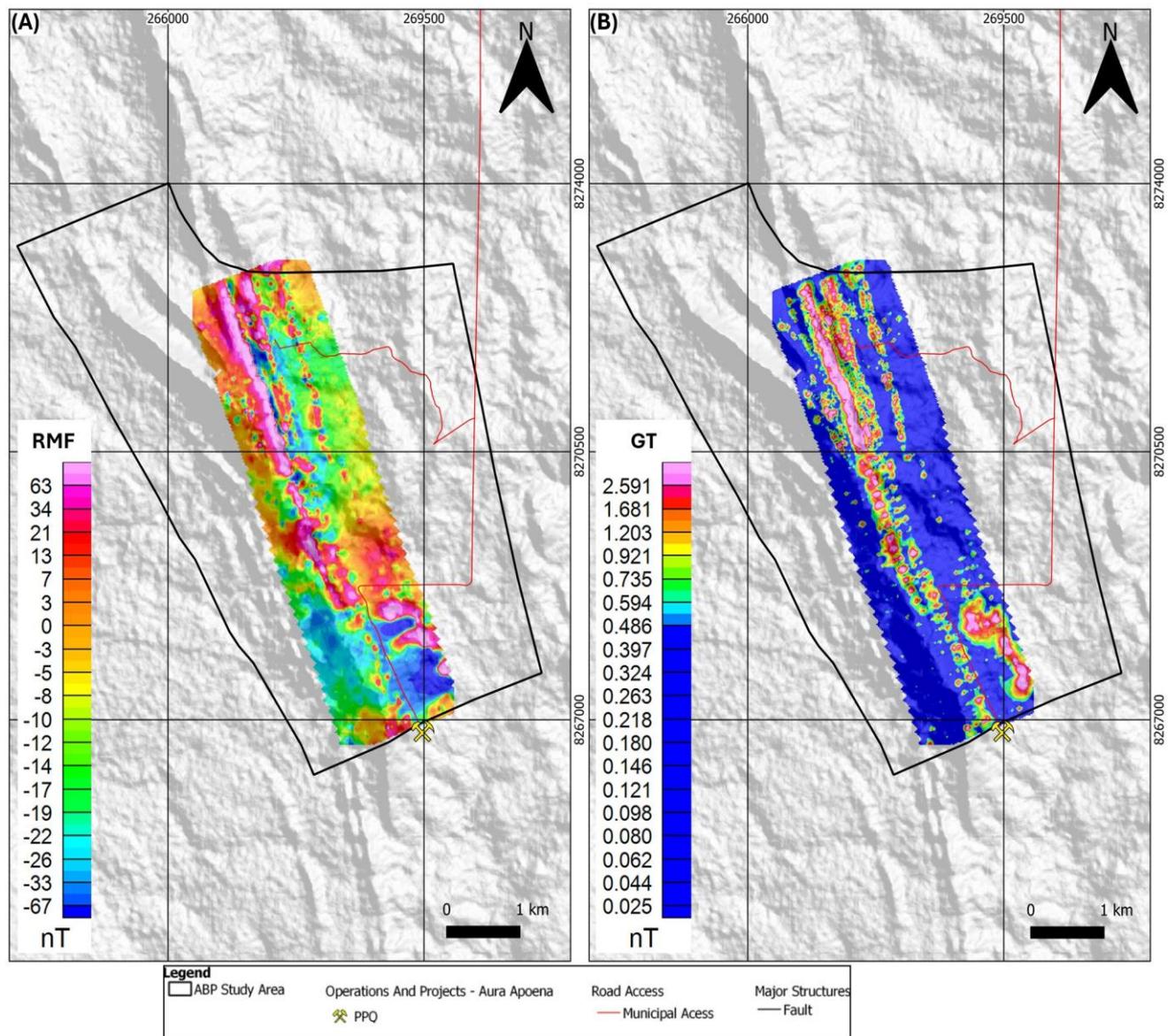


Figure 8. Ground magnetic data: (A) residual and (B) total gradient. Black dashed lines highlight the continuity of the corridor shear zone demarcated by a low magnetic anomaly with orientation NW–SE. Digital elevation model (DEM) Source: ALOS PALSAR—radiometric terrain correction. PPQ = Pau-a-Pique and ABP = BP Anomaly.

It is also probable that high RMF and GT values are also observed in some of the gold deposits along the belt due to the presence of some ferromagnetic minerals (magnetite, hematite, ilmenite and minor pyrrhotite), particularly those situated in the contact between the metasediments and the granite or between the metasediments and the metavolcanosedimentary basement, which typically exhibits GT values < 0.594 nT.

The magnetic anomaly in the southeast corner of the map occurs in an area where intrusive rocks from Pindaituba Suite are mapped (Figure 8). These rocks are typically characterized by low GT and RMF values. The anomaly is interpreted as a lithological unit oriented approximately NW–SE, which is not identified in surface exposures and has a magnetic signature distinct from that of the porphyritic granites forming the basement of the area.

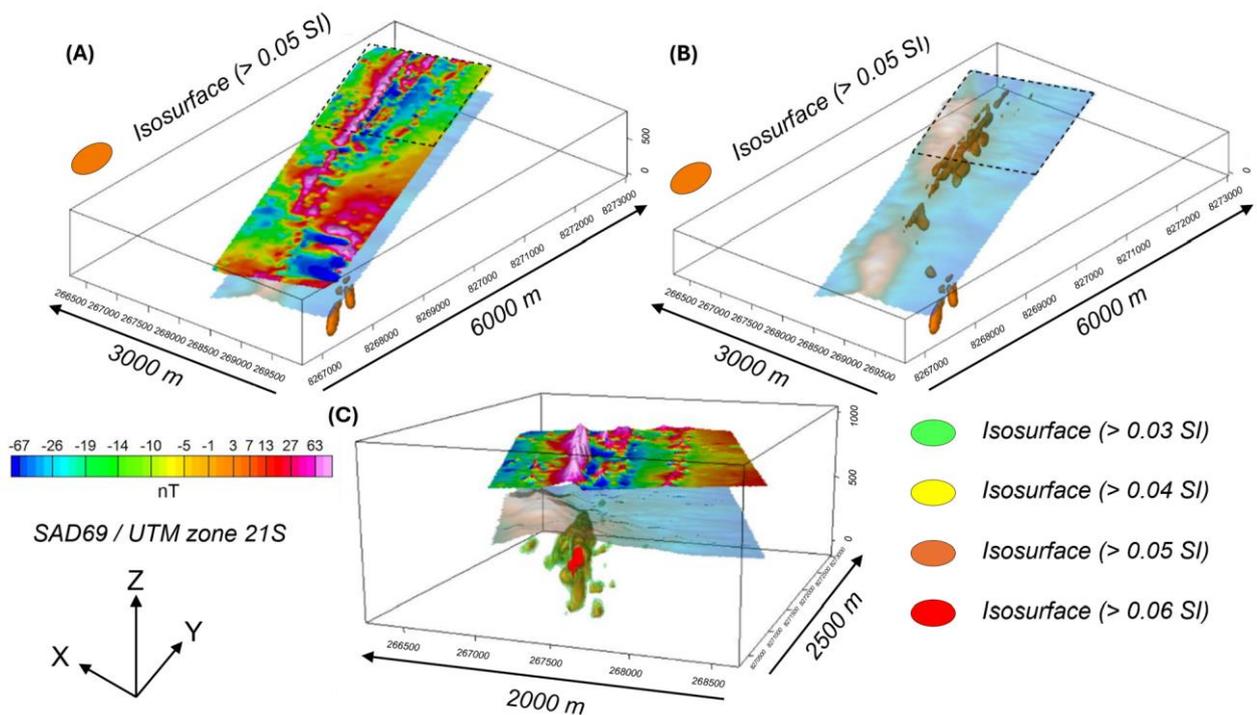


Figure 9. Three-dimensional mosaic with the shape of the magnetic bodies in depth recovered by inversion of magnetic data anomalies, with dashed lines delimiting the area of greater detail (C) and DEM topographic layout of the area. (A) Residual magnetic field (RMF) relief (view to NW). (B) Recovered magnetic model overlaid by DEM topography (view to NW), same results with 50×50 and 150×150 m mesh. (C) Representation of the northernmost portion of the detail with a 50×50 m mesh, from a different viewing angle (from N to S).

Another linear anomaly with a NNW direction, clearly highlighted on the map (GT and RMF) (Figure 8A,B), is observed in the northeastern part of the study area. This anomaly coincides with the presence of oxidized metasediment lenses, tectonically wedged into the porphyritic granite and whose contact is marked by the presence of hydrothermal alteration hosting mineralized zones with grades of up to 8.7 g/t Au (Serrinha occurrence). In this case, both the geological context and the pattern of magnetic anomalies (GT and RMF) are very similar to those observed at the Pau-a-Pique mine with the presence of magnetite, ilmenite, hematite and pyrrhotite locally.

Some shorter-wavelength dipole anomalies are visible in the southwestern portion of the RMF map (Figure 8A) and correspond to exposures of meta volcano–sedimentary sequences from the Rio Alegre Terrane. The absence of reversed polarities in the area indicates that residual effects or demagnetization have had a lesser influence.

The 3D magnetic amplitude data inversion with recovery of magnetic susceptibility bodies demonstrates zones of contrast between positive and negative anomalies, characterized by protrusions and depressions in RMF (Figure 9A), which mark the contact between metasediments and granitic basement. These zones are linked to low magnetic shear zones.

It can also be observed that the recovered values of magnetic susceptibility from positive anomalies often occur at the edges of shear zones related to magnetic hydrothermal alteration in the context and the correspondence of structural attitudes with a southwest dip, as well as the presence of folds associated with the SW–NE thrust.

4.2. Geoelectrical Survey

The cross-sectional resistivity (Figure 10) and chargeability (Figure 11) profiles were generated from the induced polarization (IP) surveys performed in the northern part of the area, reaching depths of ~ 350 m.

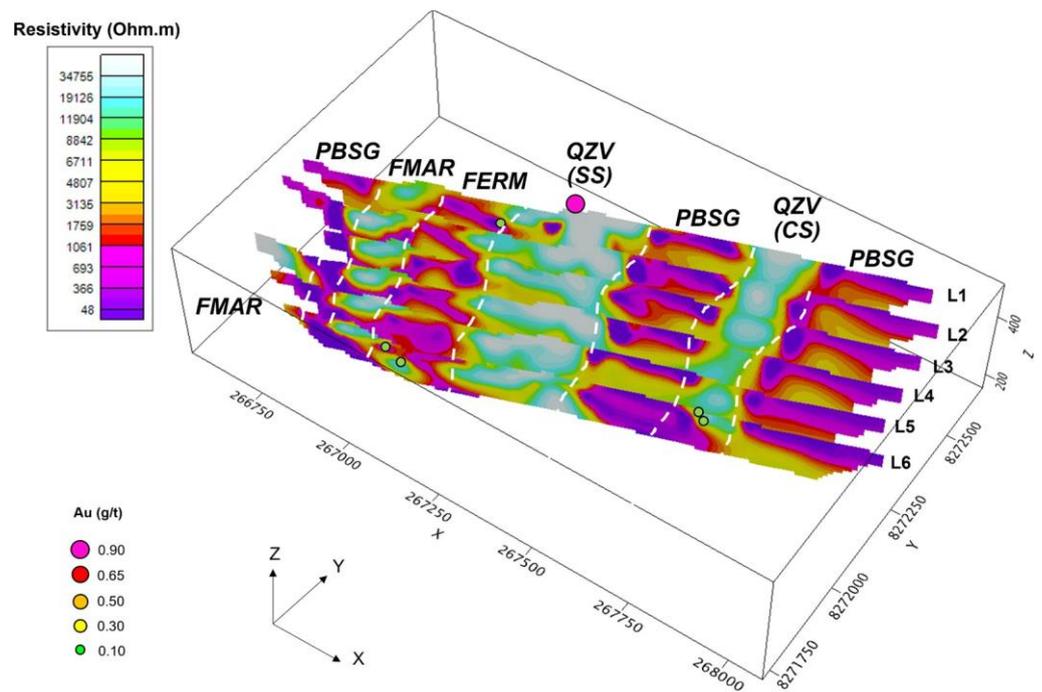


Figure 10. 3D view of geoelectric resistivity profiles, correlated with surface geochemical anomalies. White dashed lines highlight the contacts of units mapped in the field. FMAR = feldspatic metarenite; PBSG = porphyritic biotite sieno-granite; FERM = ferruginous metarenite; QZV (SS) = quartz vein (Serrinha system) and QZV (CS) = quartz vein (Cunha system).

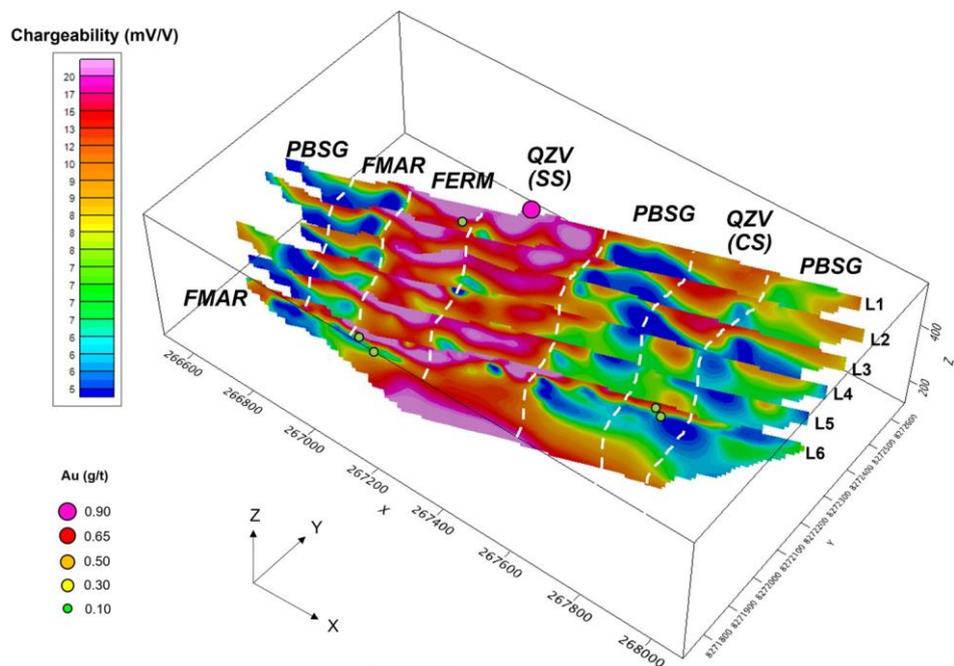


Figure 11. 3D view of geoelectric chargeability acquisition lines, associated with surface geochemical anomalies. White dashed lines highlight the contacts of units mapped in the field. FMAR = feldspatic metarenite; PBSG = porphyritic biotite sieno-granite; FERM = ferruginous metarenite; QZV (SS) = quartz vein (Serrinha system) and QZV (CS) = quartz vein (Cunha System).

4.2.1. Resistivity

As illustrated in Figure 10, the resistivity exhibits a range of values between 178 and 64,426 ohm.m, encompassing both high and low electrical resistivity regions. The bound-

aries between these regions are abrupt and sub-vertical, with a NNW–SSE orientation. Correlating the resistivity sections with the geological map (Figure 3) reveals that the regions with lower apparent resistivity background (<16,240 ohm.m) are mainly associated with the occurrence of the porphyritic granite basement or hydrothermally altered metasediments, specifically where hydrothermal alteration is marked primarily by the frequent presence of iron oxides (ferruginous metarenite with magnetite and hematite). Zones of higher electrical resistivity (>16,240 ohm.m) are associated with exposures of metasediments from the Aguapeí Group represented by quartz–feldspar metarenites. These zones also exhibit strong hydrothermal alteration, characterized by the presence of swarms of quartz veins. These regions exhibit the highest gold concentrations within the area.

In the sections of Figures 10 and 12B, a zone of high resistivity with a thickness of approximately 100 m is observed in the eastern portion of the area, with resistivity values ranging from 16,240 to 24,271 ohm.m (Figure 12B). This zone of high resistivity is associated with the presence of metarenites and mylonites (contact zone with basement) with quartz veins + oxidized sulfides + specularite and dissemination of magnetite in the sericitization matrix of the Cunha occurrence. The region between 800 and 1100 m, with an average elevation of 350 m, exhibits elevated resistivity values up to 64,426 ohm.m. These values may represent potential continuations and/or down-dip influences for the metasediment layer of the Cunha System, as well as a portion of the granitic basement with hydrothermal alteration (i.e., silicification).

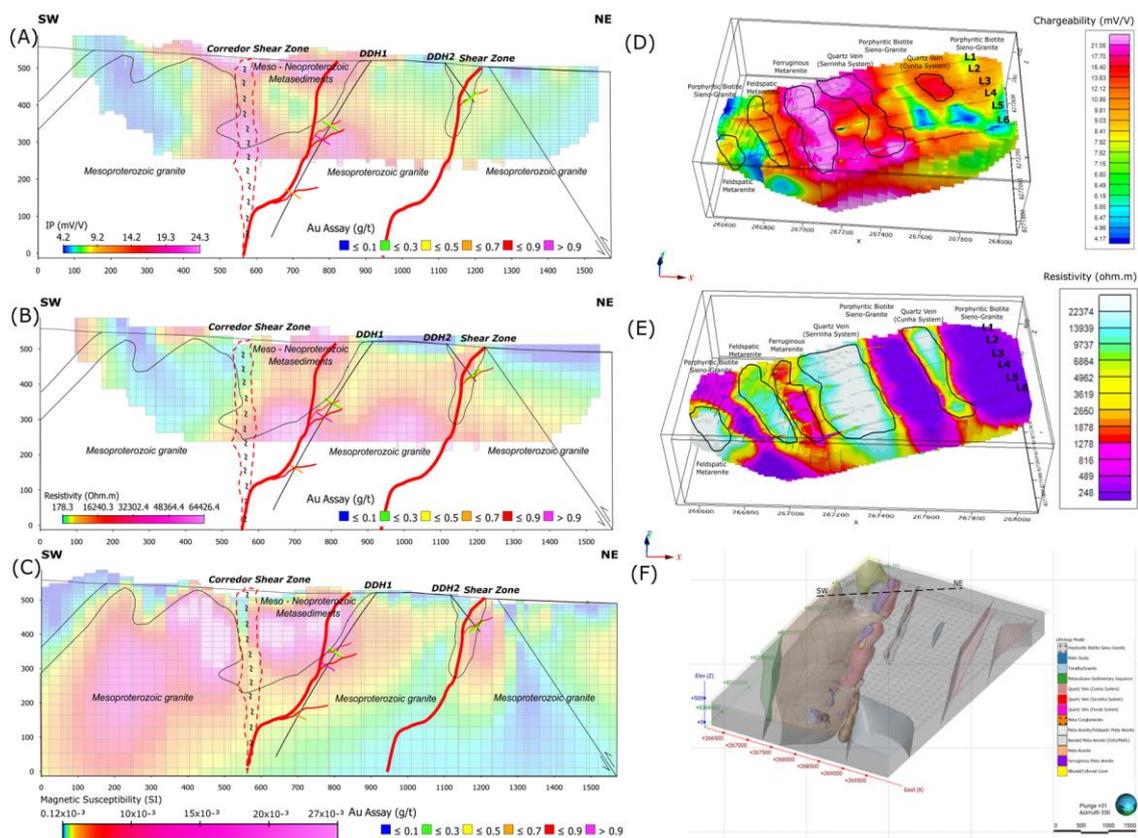


Figure 12. Geophysical–geological interpretative model (geolectric–magnetic) for gold deposits in AGGP. (A) Chargeability and (B) resistivity inverted sections of line 5. (C) Vertical section in 3D model of the MVI (magnetic vector inversion) along line 5 (IP). (D,E) 3D voxel products of IP data (chargeability and resistivity respectively). (F) 3D geological model. In thinner dashed lines (A–C), geological interpretation of the sections. DDH = diamond drill hole; L1 = line 1; L2 = line 2; L3 = line 3; L4 = line 4; L5 = line 5 and L6 = line 6.

In the region between 550 and 800 m and average elevations of up to 400 m, the values vary within the range of 16,240–64,426 ohm.m, associated with the Serrinha System, which is defined by metasediments (metarenites/metaconglomerates), with sulfide disseminated in quartz veins and oxidized, sometimes as boxworks associated with specularite + magnetite.

It can be observed that fault structures and shear zones are present between 500 to 600 m and 1250 m (Figure 12), respectively. These are not apparent at the surface, but can be correlated with zones of low resistivity in proximity to intermediate resistivity (i.e., porphyritic granites) and high resistivity (metasediments).

4.2.2. Chargeability

The high chargeability values (>18 mV/V) obtained with the induced polarization method were found to be restricted and only localized in certain sectors (Figures 11 and 12A). This is supported by geochemical rock anomalies with Au grades at the surface (i.e., along the lines) and drill holes.

The maximum values did not exceed 24 mV/V, with the majority located in two areas along the sections: near the Serrinha occurrence (metasediment adjacent to the contact with the basement) and along the “conduit” of the possible extension of the corridor shear zone. The response is situated between 350 to 900 m, initiating its anomaly from the surface to 480 m (Figure 12A). Additionally, between 400 and 250 m (Z-axis) in a tapered aspect, the anomaly appears to follow the morphology of subvertical structures. On the X-axis, at approximately 1200 m, a chargeability of approximately 10 mV/V was observed, with an estimated depth of 100 m. This observation corroborates with the mapped area, where polarizable responses of metasediments with associated pyrite, arranged in the Cunha occurrence, are observed.

Furthermore, in the eastern region adjacent to the Cunha occurrence, approximately 1250 m (X-axis), a structural feature of a fault mapped within the context of the granitic basement is observed. All lines executed, as well as L5 in question, were acquired orthogonally to the target systems in question (Figures 10 and 11) and the polarizable anomalies were restricted to systems of quartz veins with disseminated sulfides. Moreover, anomalies have been identified in the potential extension of the shear zone context. Although the host rock also holds trace Au mineralization (<0.2 g/t) and indications of hydrothermal alterations, including sulfidation, no anomalous signs were detected in these sectors.

5. Discussion

The metallogenic characteristics associated with the deposits of the ABP target and part of the Alto Guaporé Gold Province indicate that these deposits predominantly occur within fault zones that develop along the contacts between metamorphic rocks and granites (as depicted in Figures 8, 9 and 12C). The regions most conducive to gold deposits encompass the extension of the corridor shear zone, specifically during the D3 phase (transpressional) on NE fault planes and intersections of faults with different orientations.

From the inversion of the 3D magnetic data with recovery of the magnetization vector, contrasting zones between positive and negative anomalies can be observed, characterized by protrusions and depressions that mark the contact between metasediments and granitic basement, associated with low magnetic zones. These zones are highly favorable for the identification of deep shear structures that possibly favored the percolation of mineralizing fluids in the area (see Figure 12C). The granite of the Pindaituba Intrusive Suite exhibits low magnetic intensity. In contrast, the metamorphic rocks (metasediments) show high magnetic anomalies (presence of iron oxides such as magnetite and hematite) amidst a field of varying intensity. In addition, it is noteworthy that the values of magnetic susceptibility recovered from positive anomalies often occur at the edges of shear zones related to the magnetic hydrothermal alteration of the context (hematization and sericitization), corresponding to structural attitudes dipping southwestward, as well as the presence of folds associated with SW–NE thrusting.

5.1. Prospective Geological-Geophysical Model for Gold Deposits in the Alto Guaporé Gold Province

The proposed model for the orogenic gold deposits within the AGGP context refers to the tectono-structural configurations proposed by [2], where mineralization is hosted in large-scale crustal structural corridors and/or faults/shear zones cut by accommodation faults; thrust-related anticlines; irregular contacts on faulted granite margins; and architectures of triple-quadruple points in granitic intrusions. In terms of geophysics, the lithological-structural and ore characteristics were utilized as a priori information to enhance correlation with the structural features of the context. Furthermore, the interaction between magnetic and geoelectric methods served as a mechanism to predict the positions and/or mineralized regions.

Subsequently, an interpretative gold prospecting model was constructed based on the geophysical and geochemical signatures of the area with the objective of identifying the ore bodies. In consideration of the geological and geophysical attributes of exploration line “5” of target ABP, which serves as a representative case within the context under discussion, the prospective geological-geophysical parameters are summarized in (Figures 12 and 13).

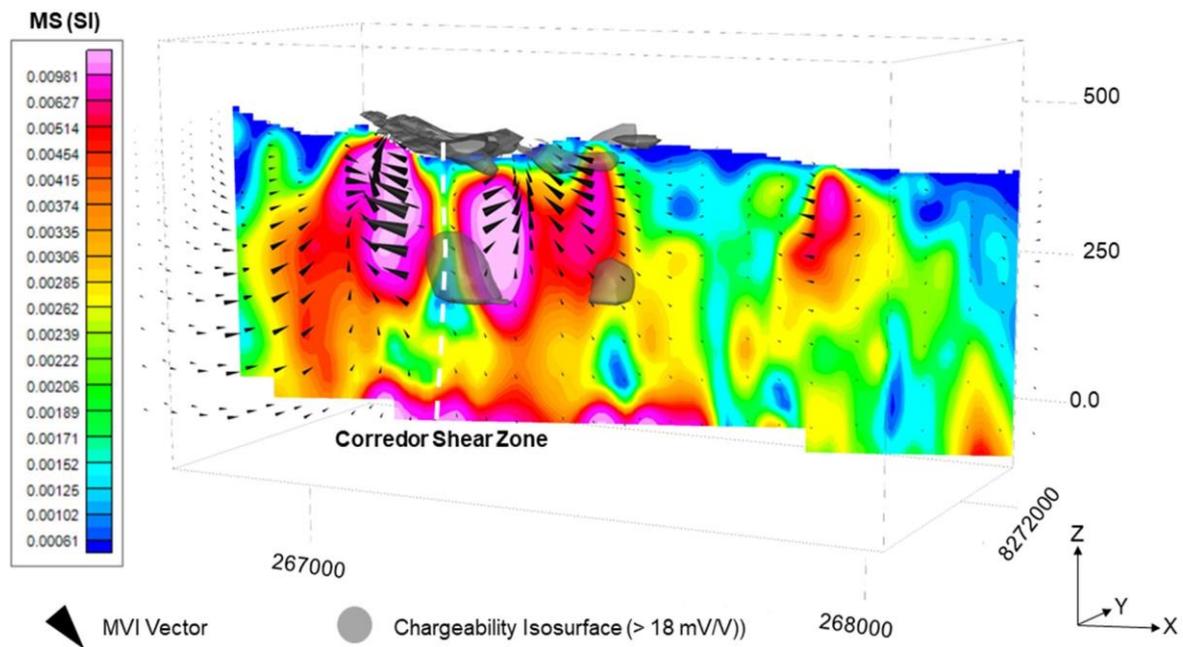


Figure 13. Correlation of magnetic and geoelectric results in line 5, with the magnetic vector inversion and amplitude inversion image section, superimposed by the chargeability isosurface (>18 mV/V). MS = magnetic susceptibility and MVI = magnetic vector inversion.

The results of the MVI in the region (Figures 12C and 13) indicate a high degree of relevance. Through correlation with the electrical (resistivity and chargeability) and geological data, it was determined to be an important prospective indicator in AGGP. Firstly, it can be observed that the low magnetic signature of the silicification hydrothermal zone (i.e., between 500 to 600 m in the 2D section) corresponds to the corridor shear zone and behaves similarly to vectors in a magnetic bar, with magnetic induction vectors in opposite directions emanating from the low magnetic zone, as detected by [58]. Secondly, the electrical resistivity values delineate the bodies of metasediment enclosed in the granite with remarkable precision, thereby facilitating the identification of potential milonitic contact zones. Furthermore, the chargeability isosurface generated (Figure 10) indicates that the mineralizing system is continuous, extending both along the shear zone and at the edges of magnetic bodies associated with the contact of metasediments (i.e., oxidized) with the granite basement. This is corroborated by the Au grades evidenced in Figure 12A–C.

In summary, the results of magnetometric and geoelectric inversion suggest a good correlation between polarizable, resistive and low magnetic values with the potential for mineralization of rocks in the AGGP.

5.2. 3D Geological Features

As illustrated in (Figure 12F), the three mineralizing systems previously described in Section 2.1 are evident in the 3D visualization. Additionally, the arrangement of fault systems between the contacts of the metasediment with the granitic basement is observed, where the faults that control the ore exhibit characteristics of sub-vertical surfaces along their NNW–SSE strike. In the northwest portion, a system of folds in the metasediments is displayed, resembling a “chicken’s foot” pattern, which is associated with the closure of the Caldeirão syncline converging with the corridor shear zone (i.e., the main feeder of mineralization throughout the context). The model was generated using surface structural data as well as geological-hydrothermal mapping data (Aura Minerals Inc., internal report 2022) within the *Leapfrog Geo software, version 2023.1.1*, from *Seequent (Bentley Systems)*.

6. Conclusions

The advancements observed in this study at the district scale in the AGGP were the result of a convergence between technical and scientific developments and previous studies. In this context, potential prospects can be selected based on long-term practical experience and at more regional scales, thereby supporting the application of exploratory tools in the context. Given the structural architecture of the known deposits and mines in the province, a target for detailed geophysical application was selected for the purpose of investigating possible continuities (e.g., strike and depth) of mineralization in shear zones hosted near contacts between the granitic basement of the Pindaituba Intrusive Suite and metasediments of the Aguapeí Group. The establishment and application of a prospective geological–geophysical model can contribute as a guide for future research regarding exploration in the Alto Guaporé Gold Province. The following conclusions were drawn from this study:

The methods and prospective ideals developed are part of traditional superficial and relatively deep prospecting methods. In contrast to gold prospecting in the Alto Guaporé Gold Province, which primarily employs techniques for identifying magnetic anomalies and mapping mineralized structures, the district-scale scope of this study enabled us to delineate the footprints of polarizable and resistive anomalies, as well as their distinctions in magnetic properties. These differences are determined by low magnetic anomalies (e.g., silicified zones), in comparison to mineralized gold zones with the presence of hydrothermal magnetite, as is the case with other targets and/or deposits in the AGGP region. Furthermore, this approach enabled the mapping of potential continuities in ore-controlling fault zone systems in both deep and near-surface areas.

The gold deposits in the Alto Guaporé Gold Province (AGGP) are controlled by large-scale regional faults and shear zones that are associated with the contact between metasedimentary rocks and a granitic basement. The ore shoots in the ABP target area are primarily attributed to deformed zones associated with mylonites and/or schists in structures secondary to the main feeder. The faults that host the ore developed along the contact interfaces between Mesoproterozoic metasedimentary rocks and Mesoproterozoic granites. These exhibit a subvertical metallogenic model that is parallel to the regional structure and has a preferential N20-50W direction. This model offers a promising technical premise, particularly for targets in the southern region of the province.

The indicative footprints in the integrated geological–geophysical prospecting model include a subvertical metallogenic model, low magnetic zones (main conduits), low resistivity and high chargeability in metasediments and contact zones.

The geophysical exploration of gold deposits in the target area demonstrated the feasibility of characterizing and identifying metallogenic footprints and mineralized zones

at varying depths between 100 and 350 m, a finding that was subsequently validated through drilling.

Author Contributions: J.E., R.M. and M.L.-S. conceived and designed the research ideas; J.E., T.M., R.M. and M.L.-S. participated in field activities; J.E., T.M. and M.L.-S. conducted data analysis; J.E., R.M., T.M., M.L.-S. and W.B. reviewed and edited the drafts. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The geophysical and geochemical data are confidential.

Acknowledgments: The authors would like to express their gratitude to the “Graduate Program in Applied Geosciences and Geodynamics” for providing the necessary infrastructure (laboratories, study environment and equipment) to conduct this research. Additionally, they extend their appreciation to the Institute of Geosciences at the University of Brasília. Furthermore, the authors would like to express their gratitude to the company “Aura Minerals Inc. (Unit Aura Apoena)” for providing the private data that was acquired and collected by them and for granting the publication of this information as an article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Groves, D.I.; Santosh, M. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: Implications for mineral exploration. *Geosci. Front.* **2015**, *6*, 389–399. [\[CrossRef\]](#)
- Groves, D.I.; Santosh, M.; Zhang, L. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach. *Geosci. Front.* **2020**, *11*, 719–738. [\[CrossRef\]](#)
- Roshanravan, B.; Kreuzer, O.P.; Buckingham, A.; Keykhay-Hosseinpoor, M.; Keys, E. Mineral potential modelling of orogenic gold systems in the granites-tanami Orogen, Northern Territory, Australia: A multi-technique approach. *Ore Geol. Rev.* **2023**, *152*, 105224. [\[CrossRef\]](#)
- Costa Neto, M.C. Estudo Da Interação Fluido-Rocha Nos Depósitos Da Lavrinha, Distrito Aurífero de Pontes E Lacerda-MT. Master’s Thesis, Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil, 1998.
- Fernandes, C.J.; Kuyumjian, R.M.; Moura, M.A.; Barboza, E.d.S.; Pulz, M.G. Tipologia dos veios de quartzo e estudo de inclusões fluidas nos depósitos de ouro da Faixa Móvel Aguapeí–Cráton Amazonico–Mina de São Vicente, Região da Lavrinha e Pau-a-Pique. *Rev. Bras. Geociências* **2006**, *36* (Suppl. S1), 59–70.
- Fernandes, C.J.; Kuyumjian, R.M.; Pulz, G.M.; Gerald, M.C.; Pinho, F.E.C. Geologia Estrutural e Idade $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do depósito Pau a Pique, Faixa Móvel Aguapeí, Sudoeste do estado de Mato Grosso. *Rev. Bras. Geociências* **2006**, *36* (Suppl. S1), 13.
- Fernandes, C.J.; Pulz, G.M.; Kuyumjian, R.M.; Pinho, F.E.C. Diferenças Entre os Depósitos Auríferos do Grupo Aguapeí (Estado de Mato Grosso) e os Clássicos Exemplos de Ouro em Conglomerados. *Pesqui. Em Geociências-UFRGS* **2005**, *32*, 10. [\[CrossRef\]](#)
- Fernandes, C.J.; Ruiz, A.S.; Kuyumjian, R.M.; Pinho, F.E. Geologia e Controle Estrutural dos Depósitos de Ouro do Grupo Aguapeí–Região da Lavrinha, Sudoeste do Cráton Amazônico. *Rev. Bras. Geociências* **2005**, *35*, 13–22. [\[CrossRef\]](#)
- Melo, R.P.d.; Oliveira, M.A.F.d.; Goldfarb, R.J.; Johnson, C.A.; Marsh, E.E.; Xavier, R.P.; de Oliveira, L.R.; Morgan, L.E. Early Neoproterozoic Gold Deposits of the Alto Guaporé Province, Southwestern Amazon Craton, Western Brazil. *Econ. Geol.* **2022**, *117*, 127–163. [\[CrossRef\]](#)
- Scabora, J.A.; Duarte, C.L. A Jazida de Ouro de São Vicente–Município de Nova Lacerda–MT. *A Terra Em Rev.* **1998**, *4*, 32–42.
- Don Mario Reserves/Resources. 2020. Available online: <https://www.orvana.com/English/operations/don-mario-district/reserves-resources/default.aspx> (accessed on 7 June 2023).
- Pinho, F.E.C. The Origin of the Cabacal Cu-Au Deposit, Alto Jauru Greenstone Belt, Brazil. Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario, London, ON, Canada, 1996.
- Pinho, F.E.C.; Fyfe, W.S. Isotopic Studies of the Carbonate Veins of the Cabaçal Mine, Mato Grosso, Brazil. *Rev. Bras. De Geociências* **1999**, *29*, 327–330. [\[CrossRef\]](#)
- Litherland, M.; Annells, R.N.; Darbyshire, D.P.F.; Fletcher, C.J.N.; Hawkins, M.P.; Klinck, B.A.; Mitchell, W.I.; Oconnor, E.A.; Pitfield, P.E.J.; Power, G.; et al. The proterozoic of eastern Bolivia and its relationship to the Andean mobile belt. *Precambrian Res.* **1989**, *43*, 157–174. [\[CrossRef\]](#)
- Litherland, M.; Bloomfield, K. The Proterozoic History of eastern Bolivia. *Precambrian Res.* **1981**, *15*, 157–179. [\[CrossRef\]](#)
- Ruiz, A.S.; Simões, L.S.A.; Araujo, L.M.B.d.; Matos, J.B.d.; Souza, M.Z.A. Cinturão Orogênico Aguapeí (1025-900Ma): Um exemplo de Faixa Móvel Intracontinental no SW do Cráton Amazônico. *An. Do XI Simp. Nac. De Estud. Tectonicos* **2007**, 116–118.
- Teixeira, W.; Gerald, M.C.; Matos, R.; Ruiz, A.S.; Saes, G.; Vargas-Mattos, G. A review of the tectonic evolution of the Sunsás belt, SW Amazonian Craton. *J. S. Am. Earth Sci.* **2010**, *29*, 47–60. [\[CrossRef\]](#)
- Melo, R.P.d. Caracterização do metamorfismo da Faixa Móvel Aguapeí e sua relação com a gênese dos depósitos de ouro da região de Pontes e Lacerda-MT. Ph.D. Thesis, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Brazil, 2016.

19. D'Agrella-Filho, M.S.; Tohver, E.; Santos, J.O.S.; Elming, S.A.; Trindade, R.I.F.; Pacca, I.I.G.; Geraldès, M.C. Direct dating of paleomagnetic results from Precambrian sediments in the Amazon craton: Evidence for Grenvillian emplacement of exotic crust in SE Appalachians of North America. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2008**, *267*, 188–199. [CrossRef]
20. Geraldès, M.C.; Nogueira, C.; Vargas-Mattos, G.; Matos, R.; Teixeira, W.; Valencia, V.; Ruiz, J. U–Pb detrital zircon ages from the Aguapeí Group (Brazil): Implications for the geological evolution of the SW border of the Amazonian Craton. *Precambrian Res.* **2014**, *244*, 306–316. [CrossRef]
21. Leite, J.A.D.; Saes, G.S. Geology of the southern Amazon craton in southwestern Mato Grosso, Brazil: A review. *Rev. Bras. De Geociências* **2000**, *30*, 91–94. [CrossRef]
22. Saes, G.S. Evolução Tectônica E Paleogeográfica Do Aulacógeno Aguapeí (1.2–1.0 GA) E Dos Terrenos Do Seu Embasamento NA Porção Sul Do Craton Amazônico. Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1999.
23. Saes, G.S.; Leite, J.A.D. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Aguapeí, Proterozoico médio na porção meridional do Cráton Amazônico: Mato Grosso e oriente boliviano. *Rev. Bras. De Geociências* **1993**, *23*, 31–37. [CrossRef]
24. Rizzotto, G.J.; Santos, J.O.S.; Hartmann, L.A.; Tohver, E.; Pimentel, M.M.; McNaughton, N.J. The Mesoproterozoic Guaporé suture in the SW Amazonian Craton: Geotectonic implications based on field geology, zircon geochronology and Nd–Sr isotope geochemistry. *J. S. Am. Earth Sci.* **2013**, *48*, 271–295. [CrossRef]
25. Ruiz, A.S. *Evolução Geológica do Sudoeste do Cráton Amazônico Região Limítrofe Brasil Bolívia-Mato Grosso*; Tese (Doutorado em Geociências)–Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista: Rio Claro, Brazil, 2005; 289p.
26. Bettencourt, J.S.; Leite, W.B.; Ruiz, A.S.; Matos, R.; Payolla, B.L.; Tosdal, R.M. The Rondonian-San Ignacio Province in the SW Amazonian Craton: An overview. *J. S. Am. Earth Sci.* **2010**, *29*, 28–46. [CrossRef]
27. Menezes, R.G.; Silva, L.C.; Takahashi, A.T.; Lopes, L., Jr.; Bezerra, J.R.L. *Folha Pontes e Lacerda, SD.21-Y-C-II*; CPRM: Brasília, Brazil, 1993.
28. Mitchinson, D.E. Targeting Archean Orogenic Gold Mineralization Using Physical Properties and Integrated Geophysical Methods. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2009.
29. Morais, D.S.F. *Estudo da Crosta no Sudoeste do Cráton Amazônico Utilizando Técnicas Sismológicas*; Tese (Doutorado em Geociências)–Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista: Rio Claro, Brazil, 2018; 119p.
30. Aisengart, T.; Barbosa, D.; Pithawala, T.; Pereira, J.; Porto, C.; Ando, J.L.; Rechand, M.; Johnson, A. High resolution inversion of the magnetization vector in the Pontes e Lacerda area of southwestern Mato Grosso, Brazil. *J. Geophys.* **2017**, *38*, 159–164.
31. MacKenzie, D.; Craw, D. Geophysical Signals and Exploration for Orogenic Gold on the Low-grade Margins of the Otago Schist. In Proceedings of the Gold'17 Conference, Rotorua, New Zealand, 17 August 2017. Extended Abstracts: 62–65.
32. Niiranen, T.; Nykänen, V.; Lahti, I. Scalability of the Mineral Prospectivity Modelling—An orogenic gold case study from northern Finland. *Ore Geol. Rev.* **2019**, *109*, 11–25. [CrossRef]
33. Song, M.; Xue, G.; Liu, H.; Li, Y.; He, C.; Wang, H.; Wang, B.; Song, Y.; Li, S. A Geological Geophysical Prospecting Model for Deep-Seated Gold Deposits in the Jiaodong Peninsula, China. *Minerals* **2021**, *11*, 1393. [CrossRef]
34. Adetunji, A.Q.; Launay, G.; Ferguson, I.J.; Simmons, J.M.; Ma, C.; Ayer, J.; Lafrance, B. Crustal conductivity footprint of the orogenic gold district in the Red Lake greenstone belt, western Superior craton, Canada. *Geology* **2023**, *51*, 377–382. [CrossRef]
35. Seigel, H.O.; Johnson, I.; Hennessey, J. Different methodology: Geophysical aids to gold exploration. *Lead. Edge* **1984**, *3*, 32–35. [CrossRef]
36. Li, Y.; Oldenburg, D.W. 3D inversion of magnetic data. *Geophysics* **1996**, *61*, 32–35. [CrossRef]
37. Doyle, H.A. Geophysical exploration for gold—A review. *Geophysics* **1990**, *55*, 134–146. [CrossRef]
38. Halloff, P.G.; Yamashita, M. The use of the IP method to locate gold-bearing sulfide mineralization. In *Induced Polarization: Applications and Case Histories*, Society of Exploration Geophysicists; Fink, J.B., Sternberg, B.K., McAlister, E.O., Weiduwilt, W.G., Ward, S.H., Eds.; SEG or Society of Exploration Geophysicists: Tulsa, OK, USA, 1990; pp. 227–279.
39. Ribeiro, V.B.; Mantovani, M.S.M.; Louro, V.H.A. Geophysical study of the Sertãozinho, Rio Aguapeí and Nova anomalies (SW of Mato Grosso, Brasil). In Proceedings of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGF), Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013.
40. Cole, K.S.; Cole, R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. I. alternating current characteristics. *J. Chem. Phys.* **1941**, *9*, 341–351. [CrossRef]
41. Rizzotto, G.J.; Hartmann, L.; Santos, J.O.S.; McNaughton, N. Tectonic evolution of the southern margin of the Amazonian craton in the late Mesoproterozoic based on field relationships and zircon U–Pb geochronology. *Ann. Braz. Acad. Sci.* **2014**, *86*, 57–84. [CrossRef]
42. Cordani, U.G.; Teixeira, W. Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. In *4-D Framework of Continental Crust: Geological Society of America Memoir 200*; Hatcher, R.D., Jr., Carlson, M.P., McBride, J.H., Martínez Catalán, J.R., Eds.; 2007; pp. 297–320. Available online: https://www.researchgate.net/publication/236016478_Proterozoic_accretionary_belts_in_the_Amazonian_Craton (accessed on 21 January 2024).
43. Schobbenhaus, C.; Bellizzia, G. Geologic map of South America. 2001. Available online: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2542> (accessed on 12 November 2023).
44. Tassinari, C.G.; Macambira, M.J.B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes* **1999**, *22*, 174–182. [CrossRef]

45. Litherland, M. Mapa Geológico del Área del Proyecto Precámbrico (1976–1983), 1:1,000,000 Map Sheet. *Br. Geol. Surv.* **1984**. Available online: <https://colecoes.igc.usp.br/colecao/mapoteca/bolivia-mapa-geologico-del-area-del-proyecto-precambrico-1976-83> (accessed on 12 November 2023).
46. Rizzotto, G.J. Petrologia e Geotectônica do Grupo Nova Brasilândia, Rondônia. Master's Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1999.
47. Souza, E.P.; Hildred, P.R. Contribuição ao estudo da geologia do Grupo Aguapeí, oeste de Mato Grosso Congresso Brasileiro de Geologia. *Camboriú Soc. Bras. De Geol.* **1980**, *2*, 813–825.
48. Matos, J.B.D.; Schorscher, J.H.D.; Geraldles, M.C.; Souza, M.Z.A.D.; Ruiz, A.S. Petrografia, Geoquímica e Geocronologia das Rochas do Orógeno Rio Alegre, Mato Grosso: Um Registro de Crosta Oceânica Mesoproterozóica no SW do Cráton Amazônico. *Rev. Inst. Geociências-USP* **2004**, *4*, 75–90. [[CrossRef](#)]
49. Pulz, G.M.; Barbosa, E.S.; Pinho, F.E.C.; Ronchi, L.H.; Jelinek, A.R.; Duarte, L.d.C. Inclusiones fluidas en venas auríferas del yacimiento Pau-a-Pique, suroeste del craton Amazónico, Brasil. *Boletín De La Soc. Española De Mineral.* **2003**, *26*, 79–92.
50. Geraldles, M.C.; Van Schmus, W.R.; Condie, K.C.; Bell, S.; Teixeira, W.; Babinski, M. Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian craton in Mato Grosso state, Brazil. *Precambrian Res.* **2001**, *111*, 91–128. [[CrossRef](#)]
51. Cezar, P.A. *Caracterização Deformacional e Metamórfica do Cinturão Móvel Aguapeí nas Serras do Caramujo e Salto do Aguapeí-SW de Mato Grosso*; Undergraduate Report; Universidade Estadual Paulista: Rio Claro, Brazil, 2004; 117p.
52. Fernandes, C.J.; Pulz, G.M.; Oliveira, A.S.; Cunha, M.C.L.; Barbosa, E.S.; Pinho, F.E.; Quadros, A.P. Diferenças químicas e texturais entre os veios de quartzo férteis e estéreis no depósito Pau-a-Pique. *Pesqui. Em Geociências* **1999**, *26*, 91–101. [[CrossRef](#)]
53. Baia, F.H. *Caracterização Litológica e Estrutural da Área "Cava Principal", Alvo Aurífero Pau-a-Pique, na Faixa Aguapeí, Pontes e Lacerda-MT*; Undergraduate Report; Universidade Estadual Paulista: Rio Claro, Brazil, 2007; 62p.
54. Available online: <https://my.seequent.com/products/oasis-montaj/oasis-montaj-2022-1> (accessed on 17 September 2022).
55. Sasaki, Y. Resolution of Resistivity Tomography Inferred from Numerical Simulation. *Geophys. Prospect.* **1992**, *40*, 453–464. [[CrossRef](#)]
56. Folha SD.21-Y-C-II-Sinal Analítico. 2008. Projeto Aerogeofísico Mato Grosso-Área 2. Programa Geologia do Brasil (PGB) Consórcio Lasa Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. Serviço Geológico do Brasil. Available online: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10497> (accessed on 12 November 2023).
57. Folha SD.21-Y-C-V-Sinal Analítico. 2008. Projeto Aerogeofísico Mato Grosso-Área 2. Programa Geologia do Brasil (PGB) Consórcio Lasa Engenharia e Prospecções S.A./Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. Serviço Geológico do Brasil. Available online: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10497> (accessed on 12 November 2023).
58. Mendes, T.L.; Leão-Santos, M.H.; Tabosa, L.F.C.; Borges, W.R.; dos Santos Alves, C.; de Freitas Suita, M.T. Airborne geophysics, petrophysics, geochemistry and geology of Ni-Cu (Co-Au-PGE) footprints to define exploration targets in mafic-ultramafic rocks. *J. S. Am. Earth Sci.* **2024**, *133*, 104716. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.