



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E GEOELÉTRICA DA BRECHA
DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL SULFETADA ASSOCIADA A
INTRUSÃO COMPLEXO FAZENDA BURITI**

Marcos Felipe da Costa Ferreira

Brasília – DF

2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E GEOELÉTRICA DA BRECHA
DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL SULFETADA ASSOCIADA A
INTRUSÃO COMPLEXO FAZENDA BURITI**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências da
Universidade de Brasília como requisito à
obtenção do título de bacharel em
Geofísica

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues
Borges

Brasília – DF

2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E GEOELÉTRICA DA BRECHA
DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL SULFETADA ASSOCIADA A
INTRUSÃO COMPLEXO FAZENDA BURITI**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges
(Instituto de Geociências/UnB – Orientador)

Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos
(Instituto de Geociências/UnB)

Me. Maria Cristina Souza Alagia
(Instituto de Geociências/UnB)

Brasília – DF

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me motivaram e fizeram parte desta caminhada e que contribuíram para a realização de uma grande etapa da minha vida.

À minha família que sempre me apoiou e sempre me deu liberdade pra seguir o caminho que eu escolhesse, José Lincon Ferreira (pai), Rosana Maria da Costa Ferreira (mãe), Gabriel da Costa Ferreira (irmão) e Raquel da Costa Ferreira, por sempre pensar no futuro e incentivar meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Às minhas Avós, tios e primos pelo carinho e incentivo.

Aos meus amigos e companheiros de graduação por todo apoio e incentivo. Em especial aos meus companheiros da geologia e da geofísica, Aline Jardim, Ana Livia Coelho, Lucas Fonseca, Yuri Tenenblat, Lucas Scarpa, Genesson Delmondes, Lucas Lopes, Andrew Josengler, por compartilharem comigo vários momentos incríveis dessa caminhada.

Aos meus veteranos, Amanda Neuhauss, Celso Guerra, Moara Matos, Thiago Lima, Marcelo Pellicano, Pedro Brayner, Raissa Lima, Daniela Schmitz. Por toda ajuda, indicação, orientação e companheirismo sempre dispostos ajudar e compartilhar um pouco de seu conhecimento.

Aos Professores que me orientaram ao longo da graduação. À Professora Dra. Adalene por ser minha primeira orientadora e me mostrar um pouco da experiência de pesquisador. À Professora Dra. Roberta Vidotti pelas conversas e por me agregar tanto como geofísico e como pessoa. Ao Professor Dr. Welitom Borges por estimular minha curiosidade, pela confiança, por toda orientação e por todo conhecimento que me fez crescer como geofísico.

Ao Professor Dr. Elder Yokoyama por todas as conversas, direcionamentos e por toda ajuda durante essa etapa, sinceramente muito obrigado, não só por mim, mas também por todos meus colegas de graduação.

À Phygeo por fazer parte dessa caminhada desde o primeiro momento, onde tive a oportunidade de vivenciar momentos incríveis que influenciaram diretamente na pessoa que sou hoje.

Ao Laboratório de Geofísica Aplicada da UnB, pela disponibilidade do equipamento para que o projeto pudesse ser realizado.

Ao Técnico Pericles por antes da atividade de campo se dispor a me ajudar a revisar o equipamento para que a aquisição fosse realizada em boas condições.

Aos amigos do trabalho, Kayque, Guilherme, João Hugo, João Marcus, Miguel, Diogo, Lineide, Lucas, Robertinho, Jonas, Giovanni, Erick, por sempre me apoiarem e permitirem

aprender com eles um pouco de várias áreas.

A Mineradora Az 125 e todos os seus colaboradores por viabilizar a realização do projeto e pelo suporte durante as atividades de campo. Em especial ao Mestrando em Geociências Fabrício, por me permitir participar de seu projeto de forma conjunta, por se esforçar cuidando para que tudo desse certo, além de ser uma das principais pessoas para que tudo fosse possível.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Estrutura da Monografia	13
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
2.1	Geologia Regional	15
2.2	Geologia Local	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1	Métodos Elétricos	23
3.1.1	<i>Resistividade</i>	23
3.1.2	<i>Arranjos Eletródicos</i>	25
3.1.3	<i>Polarização Induzida</i>	27
3.2	Magnetometria	30
3.2.1	<i>Campo Magnético Terrestre</i>	30
3.2.2	<i>Anomalias Magnéticas</i>	31
3.2.3	<i>Filtros Espaciais</i>	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Eletrorresistividade/IP Frequência	34
4.2	Magnetometria	36
5	ARTIGO CIENTÍFICO	38
5.1	Introdução	40
5.2	Contexto Geológico	40
5.3	Metodologia	44
5.3.1	<i>Aquisição de dados</i>	44

5.3.2	<i>Processamento dos dados</i>	46
5.4	Resultados e análise de dados	51
5.4.1	<i>Delimitação da zona de Brecha</i>	51
5.4.2	<i>Caracterização Geofísica</i>	57
5.5	Conclusão	69
5.6	Referências	71
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	73
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

Lista de Figuras

Figura 2-1 Compartimento da Faixa Brasília (modificado de Fuck et al.,1994, Dardenne 2000, Fuck et al., 2014).	16
Figura 2-2 Evolução tectônica da Faixa Brasília com a ocorrência das principais tipologias intrusivas (modificado de Marques 2017).	18
Figura 2-3 Compartimentação geofísica do Arco Magmático de Goiás (extraído de Martins, 2021). Magnitude sísmica de acordo com o Assumpção et al. (2004, 2013); Cordani et al. (2013); Rocha et al. (2011, 2016); Soares et al. (2006).	19
Figura 2-4 Mapa geológico simplificado da área do Complexo Fazenda Buriti (Extraído de Feitoza, 2011, Cerqueira, 1995).	21
Figura 2-5 Imagem de satélite com a localização dos furos de sondagem usados no trabalho, bem como as observações geológicas realizadas durante a aquisição de dados geofísicos.	22
Figura 3-1 Eletrodos de Corrente e potencial. (a) Medição do potencial com eletrodos de corrente isolados e o campo elétrico em sub-superfície. (b) Configuração geral dos eletrodos dispostos em linha para medição de resistividade (Dendith & Mudge, 2014).	23
Figura 3-2 Configuração dos principais arranjos eletródicos, e seus respectivos fatores geométricos. (Alagia, 2018, modificado de Loke, 2004).	26
Figura 3-3 Representação esquemática do fenômeno da Polarização de Eletrodo (Dendith & Mudge, 2014).	27
Figura 3-4 Curva de decaimento de potencial com a identificação das áreas onde registram-se as cargabilidades (a) M_i (parcial) e (b) M (global; Reynolds, 1997).	28
Figura 3-5 Representação esquemática do aumento do efeito de Polarização Induzida (V_{Pa} para V_{Pc}) com o acréscimo do tempo de carga (modificado de Reynolds, 1997).	29
Figura 3-6 (a) Representação esquemática idealizada para o campo geomagnético da Terra. (b) Elementos vetoriais que definem o campo magnético da Terra (Dendith & Mudge, 2014).	31
Figura 3-7 Esquema da resposta induzida do campo magnético da terra em um alvo esférico. (a) Altas Latitudes. (b) Latitudes intermediárias (c) Baixas Latitudes. (Dendith & Mudge, 2014)	32
Figura 4-1 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica efetuados com o equipamento <i>SuperSting R8</i> na área da pesquisa.	36

Figura 4-2 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de magnetometria terrestre com o magnetômetro GSM19 na área de pesquisa.	37
Figura 5-1 Compartimentação geofísica-geológica do Arco Magmático de Goiás (extraído de Martins, 2021). Magnitude sísmica de acordo com o Assumpção et al. (2004, 2013); Cordani et al. (2013); Rocha et al. (2011, 2016); Soares et al. (2006).....	41
Figura 5-2 (a) Mapa geológico simplificado da área do Complexo Fazenda Buriti (Modificado de Feitoza, 2011). (b) Modelo esquemático da área de estudo.....	43
Figura 5-3 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica efetuados com o equipamento <i>SuperSting R8</i> na área da pesquisa.....	44
Figura 5-4 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de magnetometria terrestre com o magnetômetro GSM19 na área de pesquisa.	45
Figura 5-5 Disposição das aquisições das seções geoeletricas e dos perfis magnéticos.	46
Figura 5-6 Diagrama de blocos do processamento dos dados de resistividade, PFE e MF.	47
Figura 5-7 Diagrama de blocos do processamento dos dados magnetométricos.	48
Figura 5-8 (a) Campo Magnético Anômalo. (b) Campo Magnético Anômalo com continuação ascendente (15 m).....	51
Figura 5-9 (a) Primeira derivada vertical (Dz). (b) Gradiente Horizontal Total (GHT).	52
Figura 5-10 Gradiente Total (Amplitude do Sinal Analítico, ASA) com classificação da magnetização e interpretação dos limites e estruturas associados a brecha.	53
Figura 5-11 Comparação da magnetização e dos limites associados a brecha com os dados de resistividade. (a) Anomalia ASA. (b) Eletorresistividade da seção L1. (c) Eletorresistividade da seção L2. (d) Eletorresistividade da seção L3.....	55
Figura 5-12 Seção L1. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c) Eletorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA (g) Furo de Sondagem F1 (Figura 5-13).....	58
Figura 5-13 Furo de sondagem F1 com sobreposição aos dados elétricos.....	60
Figura 5-14 Interpretação e modelo simplificado da seção L1. (a) Imagem Ternaria RGB (Condutividade, PFE, MF). (b) Divisão de blocos da estatística. (c) Modelo geológico simplificado.	63
Figura 5-15 Seção L2. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c) Eletorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA.	64
Figura 5-16 Seção L3. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c) Eletorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA.	66
Figura 5-17 Mapa geológico simplificado. (a) Granitoides da encaixante. (b) Associação máfica hidrotermalizada.	68

FERREIRA, MFC. Caracterização Magnética e Geoelétrica da Brecha de Alteração Hidrotermal Sulfetada Associada a Intrusão Complexo Fazenda Buriti. Curso de Graduação em Geofísica (Trabalho de Conclusão de Curso), Instituto de Geociências, UnB, 82p.

RESUMO

A área de estudo localiza-se na auréola de fenitização da intrusão do Complexo Máfico Alcalino Fazenda Buriti. Acredita-se que a região seja composta por dois eventos tectônicos distintos, o primeiro no cretáceo inferior com a intrusão do complexo máfico alcalino e o segundo no cretáceo superior com a reativação do sistema de falhas, com alocação de diques de diferentes tipologias associadas as estruturas do primeiro evento e eventos anteriores. A evidência de mineralizações sulfetadas, assim como a interação com o Granito Iporá direcionaram a aplicação dos métodos geofísicos com o intuito de caracterizar a estrutura de alteração de gênese pouco conhecida, possivelmente associada ao segundo evento local. Para a realização do estudo foram realizados levantamentos magnetométricos e de eletrorresistividade. A utilização de dois períodos de injeção de corrente possibilitou a análise da resposta de cargabilidade da estrutura alvo a partir dos cálculos de Porcentagem de Efeito Frequência (PFE) e Fator Metal (MF). Com base nos dados magnéticos foi delimitado o possível limite da zona de alteração, assim como a identificação de lineamentos coerentes as direções das estruturas regionais, EW e N40°E. As estruturas condutivas do dado de resistividade são similares aos limites definidos na magnetometria, e foram utilizados para a caracterização geofísica da brecha hidrotermal de filiação máfica alcalina. A estrutura definida foi caracterizada com base nos perfis magnéticos, na inversão de susceptibilidade aparente (MVI), nos valores de resistividade e nas respostas de PFE e MF. A estrutura associada a alteração possui magnetização intermediária a alta, com valores de susceptibilidade aparente coerentes aos perfis magnéticos. As feições condutivas tem similaridade aos limites definidos, assim como os dados de cargabilidade, com a identificação de anomalias de alta magnitude na estrutura principal e a delimitação de possíveis estruturas secundárias. Os dados geofísicos foram utilizados de maneira conjunta à descrição litológica para confecção de um modelo geológico simplificado.

FERREIRA, MFC. Magnetic and Geoelectrical Characterization of the Sulphide Hydrothermal Alteration Breccia Associated with the Fazenda Buriti Complex Intrusion. Undergraduate Course in Geophysics (Final work), Institute of Geosciences, UnB, 82p.

ABSTRACT

The study area is located in the phenitization halo of the intrusion of the Fazenda Buriti Alkaline Mafic Complex. That the region is composed of two distinct tectonic events, the first in the lower Cretaceous with the intrusion of the alkaline mafic complex and the second in the upper Cretaceous with the reactivation of the fault system, resulting in the allocation of dikes of different typologies associated with the structures. of the first event and previous events. The evidence of sulphide mineralizations, as well as the interaction with the Iporá Granite, guided the application of geophysical methods in order to characterize the alteration structure that basically unknown genesis, possibly associated with the second local event. The magnetometric and electroresistivity surveys were carried out to analyse the area response. Using two periods of current injection was possible to analyze the loadability response of the target structure from the calculations of Frequency Effect Percentage (PFE) and Metal Factor (MF). Based on the magnetic data, the possible limit of the alteration zone was delimited as well as the identification of lineaments consistent with the directions of the regional structures EW and N40°E. The conductive structures of the resistivity data were compared to the limits defined in the magnetometry showing similarity and these limits were used to carry out the geophysical characterization of the hydrothermal breccia of alkaline mafic filiation. The defined structure was characterized based on magnetic profiles, apparent susceptibility inversion (MVI), resistivity values and PFE and MF responses. The structure associated with the alteration showed intermediate to high magnetization, with apparent susceptibility values consistent with the magnetic profiles. The conductive features showed similarity to the defined limits as well as the loadability data with the identification of high magnitude anomalies in the main structure and the delimitation of possible secondary structures. The geophysical data were used together the lithological description to create a simplified geological model.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A mineração é um dos setores que possui maior risco, quanto ao retorno do capital investido, de modo que, os métodos geofísicos passaram a ser amplamente aplicados por propiciar uma redução de custos e tempo na execução dos trabalhos de pesquisa mineral, permitindo maior precisão na tomada de decisão do planejamento de lavra (Da Costa Martins, 2017).

A localização de possíveis alvos mineralizados, com a geofísica consiste em analisar um contraste de propriedades físicas do meio, que variam de acordo com a composição, granulometria/cristalografia e estruturação geológica (Ribeiro; Molina 2018). Portanto, assinaturas geofísicas de ocorrências minerais podem ser alinhadas a métodos diretos de investigação (sondagens e/ou escavações) com o objetivo de direcionar os estudos prospectivos.

A área de estudo, localizada no Oeste de Goiás no Arco Magmático de Arenópolis, mais especificamente na Província Alcalina de Goiás, antes denominada Grupo Iporá (Guimarães et al, 1968), compreende variadas intrusões de corpos semicirculares de filiação alcalina (Dani et al., 1992), consequência de um evento extensional da abertura do Atlântico Sul (Almeida et al, 1973).

Diversos projetos de análise geológica já foram realizados na Província Alcalina de Goiás (PAGO), principalmente com o intuito de avaliar o potencial econômico da área. Os projetos Alcalinas (Pena & Figueiredo 1972) e Goiânia (Pena 1974) foram alguns dos principais projetos realizados na PAGO.

As intrusões desenvolveram contatos térmicos com as encaixantes evidenciadas por auréolas de recozimento, fenitização e intenso fraturamento (Feitoza, 2011). Tais dados permitem deduzir que, tanto as intrusões alcalinas destes locais (fonte), quanto as estruturas que as cortam e os fluidos hidrotermais inerentes, constituem ambientes promissores para a ocorrência de depósitos minerais.

Os métodos geoeletricos, possuem historicamente uma grande influência nas aplicações na hidrogeologia e exploração mineral. Com origem no século XVIII, são consequência da descoberta da resistividade das rochas. As medidas são realizadas com base nas propriedades elétricas do meio, com relação a configuração geométrica do sistema, de modo que, tais propriedades variem de acordo com as características geológicas do ambiente.

A assinatura geofísica das rochas da área é fortemente magnética, o que define o magnetismo como propriedade física relevante. O estudo e medição das propriedades físicas do meio por métodos indiretos podem levar a discriminar domínios, identificar estruturas e localizar bens minerais (Feitoza, 2011).

1.1 Objetivo Geral

Caracterização geofísica da brecha de alteração sulfetada na região de Iporá relacionadas às rochas máficas alcalinas, que compõem o complexo Fazenda Buriti, localizada na área de requerimento mineral da mineradora Az 125 LTDA.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar a assinatura geofísica da brecha sulfetada;
- Elaborar um modelo geofísico-geológico simplificado da estrutura alterada;
- Entender a continuidade das estruturas em profundidade;
- Orientar zonas de favorabilidade para mineralizações;
- Comparação qualitativa e quantitativa entre os métodos de Resistividade Elétrica, Efeito Frequência e Magnetometria.
- Orientar futuros estudos prospectivos na área utilizando geofísica.

1.3 Estrutura da Monografia

A presente monografia está estruturada em 6 capítulos, que contém:

Capítulo 1: Introdução ao tema e objetivos;

Capítulo 2: Geologia regional e local, e caracterização do depósito mineral;

Capítulo 3: Fundamentação teórica dos métodos geofísicos utilizados no trabalho;

Capítulo 4: Material e métodos utilizados na aquisição dos dados em campo;

Capítulo 5: Artigo Científico;

Capítulo 6: Conclusão do trabalho e recomendações;

Referências Bibliográficas

Apêndice: Contém os itens que não foram contemplados no artigo científico.

1.4 Campanhas anteriores na área de estudo

A área de estudo foi delimitada a partir da inconvergência dos dados de Gamaespectrometria aérea realizada pela CPRM no Projeto Aerogeofísico de Arenópolis e os estudos de mapeamento anteriores.

A localização da área apresenta valores anômalos para as duas litologias nos contatos mapeados entre o Complexo Máfico Alcalino Fazenda Buriti e o Granito Iporá constituinte da Suíte Serra Negra.

A resposta Gamaespectrométrica da área apresenta diferenças entre o complexo máfico, com baixa contração para os três radioelementos, e o granito encaixante, com concentração de alta a intermediária, principalmente por conta das respostas de alto Tório, em contraste aos baixos valores de Potássio e Urânio.

Após a realização dos furos de sondagem a área foi recoberta por um levantamento magnetométrico com linhas espaçadas 200 metros e com os pontos de medição a cada 50 metros ao longo das linhas planejadas.

Estas evidências foram utilizadas em parte para guiar o presente trabalho. As descrições detalhadas dos furos de sondagem, assim como a magnetometria como menor resolução e maior recobrimento não foram apresentadas por conta da sigilosidade de dados e por fazerem parte do projeto de mestrado desenvolvido na área, que visa avaliar o potencial exploratório do Complexo Fazenda Buriti e de suas encaixantes.

CAPÍTULO 2

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Geologia regional

A área de estudo é abrangida pelo sistema orogênico Neoproterozoico denominado Província Tocantins, situado entre os crátons Amazônico, São Francisco e Paranapanema (Almeida *et al.* 1981), compreendendo um contexto colisional que deu origem e forma a placa Sul-América (Figura 2.1). A província localizada na porção central do território brasileiro abrange principalmente os estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso.

A Província do Tocantins é subdividida por Fuck *et al.* (1994) em Maciço de Goiás, Arco Magmático de Goiás e as Faixas Araguaia e Paraguaia, estando o Arco Magmático de Goiás localizado a oeste do limite do Cratón do São Francisco.

A Faixa Brasília é definida como um sistema orogênico completo, com grau de metamorfismo crescente de leste para Oeste. O Arco Magmático de Goiás (AMG) situado na porção Oeste da Faixa Brasília é limitado com o Maciço de Goiás pelas Falhas Rio dos Bois, Mandinópolis e Moiporá-Novo Brasil. Segundo Pimentel *et al.* (2000) o AMG é o resultado da acreção de sistemas de arcos de ilhas associados a margem ocidental do Cratón São Francisco entre 890 e 600 M.a (Figura 2-1).

O AMG é composto por uma crosta Neoproterozóica juvenil, sendo um dos indicativos da fase pré-colisional, na qual os componentes da litosfera oceânica desenvolveram-se em ortognaisses, associados à demais filiações vulcano-metassedimentares. Subdividido em dois segmentos distintos, estando o Arco de Mara Rosa localizado a norte e o Arco de Arenópolis localizado a sul (Figura 2-1; Fuck *et al.* 1994).

A geocronologia do Arco Magmático de Goiás indica a evolução do sistema composto por quatro principais eventos magmáticos. O primeiro entre 900 e 820 Ma compreende tonalitos, dioritos e dacitos, formados a partir de controles intra-oceânicos. O segundo episódio representado por arcos vulcânicos (670 a 600 Ma; Laux *et al.* 2004); o terceiro episódio formado

pelo domínio tonalítico com filiações geoquímicas à arcs continentais; e o quarto composto por intrusões sin-orogênicas e pós-orogênicas representadas por um magmatismo alcalino (Pimentel et al., 1991).

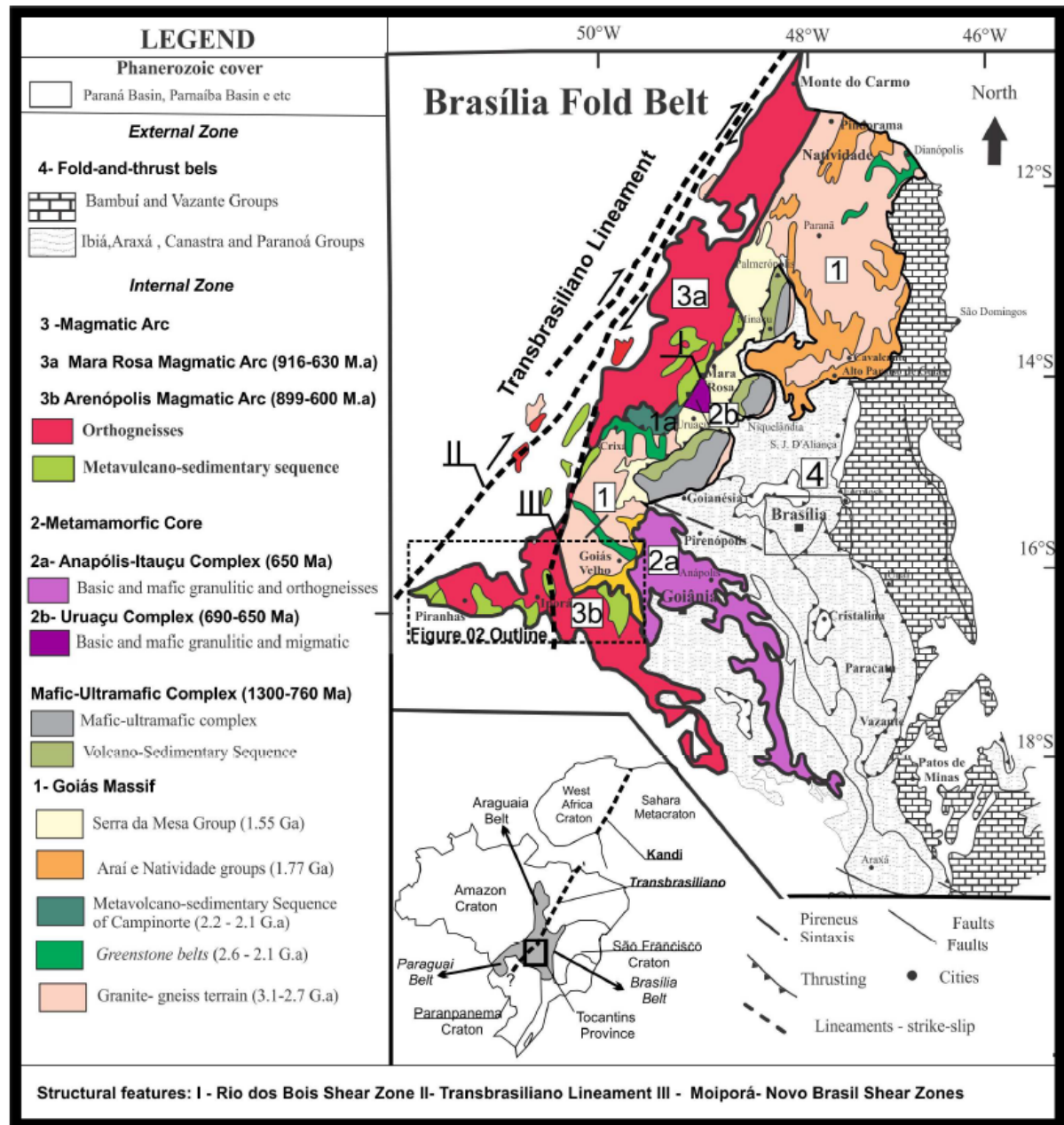


Figura 2-1 Compartimento da Faixa Brasília (modificado de Fuck et al.,1994, Dardenne 2000, Fuck et al., 2014).

O Arco magmático de Arenópolis estende-se desde Bom Jardim de Goiás (oeste) até a cidade de Buriti alegre (sudeste), formado principalmente por ortognaisses cálcicos a cálcico-

alcalinos, unidades supracrustais e granitos, tardi a pós-orogênicos associados a corpos máficos e ultramáficos expostos com direções entre NNW a NNE (Pimentel & Fuck, 1992). O arco é limitado a oeste pelo Lineamento Transbrasiliano e a Leste por granulitos do complexo Anápolis-Itaçu.

O episódio Neoproterozoico de acreção do Gondwana Oeste é representado principalmente pelo AMG, formado durante a colisão entre os blocos cratônicos São Francisco, Paranapanema e Amazônico. Após o evento colisional deu-se a formação já no estágio pós-orogênico de sistemas de falhas e cisalhamentos intracontinentais, representados coletivamente pelo Lineamento Transbrasiliano com tendências direcionais NE (Pimentel et al., 1991, Pimentel and Fuck 1992, Pimentel et al., 2000, Kroner and Cordani 2003, Laux et al., 2005, Cordani et al., 2013a, Brito Neves et al., 2014).

O Jaupaci Belt é uma das melhores sequências preservadas do AMG, hospedeira de uma série de intrusões Pré-Orogênicas, Sin-Orogênicas e Pós-Orogênicas. O Granito Iporá no qual foi realizado o estudo, é incluído na Suite Serra Negra, e está localizado na borda oeste do Cinturão Jaupaci (Marques, 2017).

Marques (2017) descreve o magmatismo do Cinturão Jaupaci definido por 5 períodos de magmatismo. O primeiro em aproximadamente 770 Ma representado por Ilmenita-Granitos tipo 1, gerados no ambiente de arco de ilha juvenil, o segundo em 750 Ma representado pelo magnetita-granito tipo 2 formado com controles de arco continental, o terceiro evento entre 597 e 585 Ma compreende a ocorrência de granitos do tipo 1 e granitos do tipo A com características intrusivas pré-cinemáticas; o quarto entre 577 e 539 foi desenvolvido em escala crustal intracontinental associada a zonas de falhas de empurrão e cisalhamento com a acomodação de granitos do tipo A sin-cinemáticos; por último entre 511 e 506 Ma houve a ocorrência de granitos pós-cinemáticos do tipo A (Figura 2-2).

A Província Alcalina de Goiás (PAGO), localizada na borda norte da bacia do Paraná, compreende uma associação diversa de rochas alcalinas, resultantes de eventos que afetaram Plataforma Brasileira durante o Mesozoico (Almeida, 1972), a presença de rochas alcalinas está associada a reativação da plataforma Brasileira, causada pela flexurização das bordas da bacia do Paraná (Hasui, 1971).

A Província Alcalina, antes denominada Grupo Iporá (Guimarães et al., 1968), compreende variedades intrusivas de corpos semicirculares aflorantes de filiação alcalina (Dani et al., 1992), tais intrusões se alocam em rochas do Pré-cambriano e do Paleozoico na região de Iporá, constituindo unidades litológicas com rochas vulcânicas, dominantes na porção sul da província, e rochas sub-vulcânicas e plutônicas na porção Norte (Danni 1978; Gaspar & Fanni

1981; Brod et al. 2005).

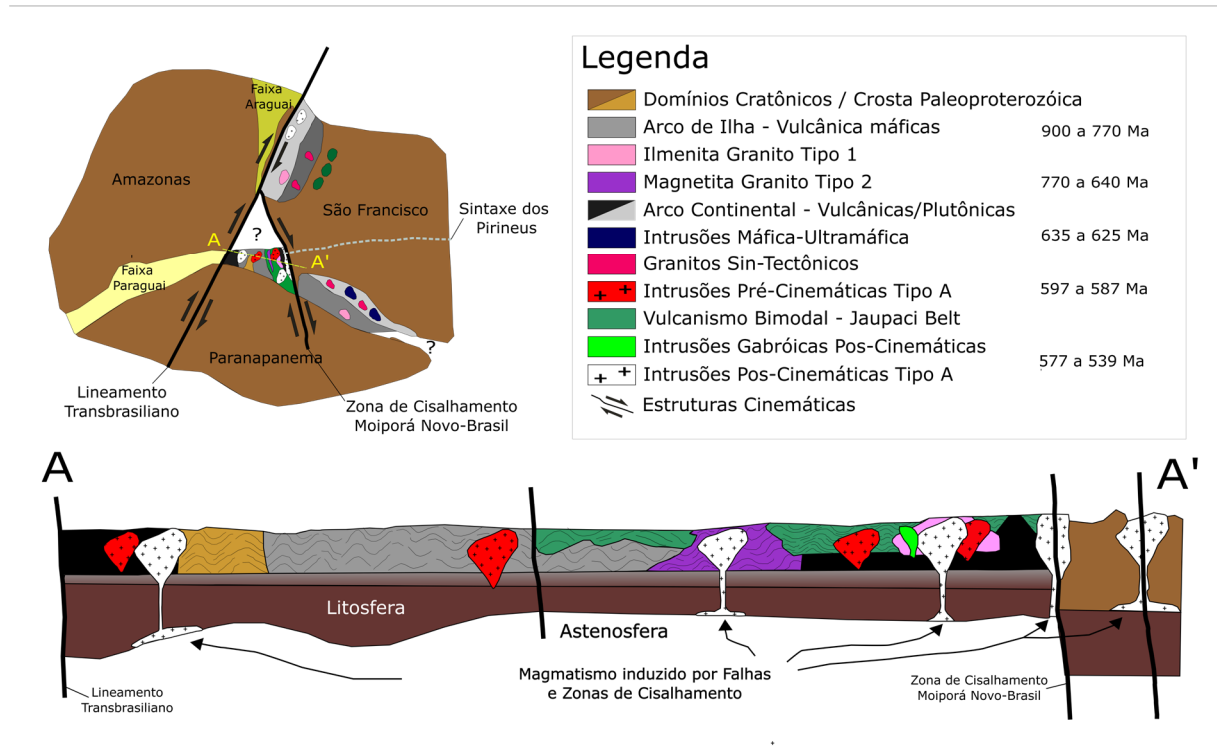


Figura 2-2 Evolução tectônica da Faixa Brasília com a ocorrência das principais tipologias intrusivas (modificado de Marques 2017).

As estruturas orogênicas Neoproterozoicas apresentam relação ao magmatismo mesozoico da Província Alcalina de Goiás, associado as estruturas tectônicas contínuas de grande porte como as Falhas Rio Maranhão, Baliza-Hidrolina e o lineamento Guaraíta-Palmeirópolis (Figura 2-3) que apresentam aproximadamente 20 km de profundidade com base em estudos geofísicos (Martins, 2021).

Segundo Martins (2021), a alocação da Província alcalina de goiás ocorreu durante o rompimento do Gondwana, preferencialmente em estruturas com direções NW-SE e NE-SW, geradas no final da orogenia brasileira e em estruturas Mesozoicas, em que as ocorrências das rochas alcalinas não estão preferencialmente associadas ao Azimuth 125.

Localmente o Azimuth 125 possui deslocamento dextral de N-S resultado da interação com a zona de cisalhamento Moiporá-Fazenda Nova, Lineamento Heitorai-Araguaçu e a Falha Rio Maranhão (Martins, 2021).

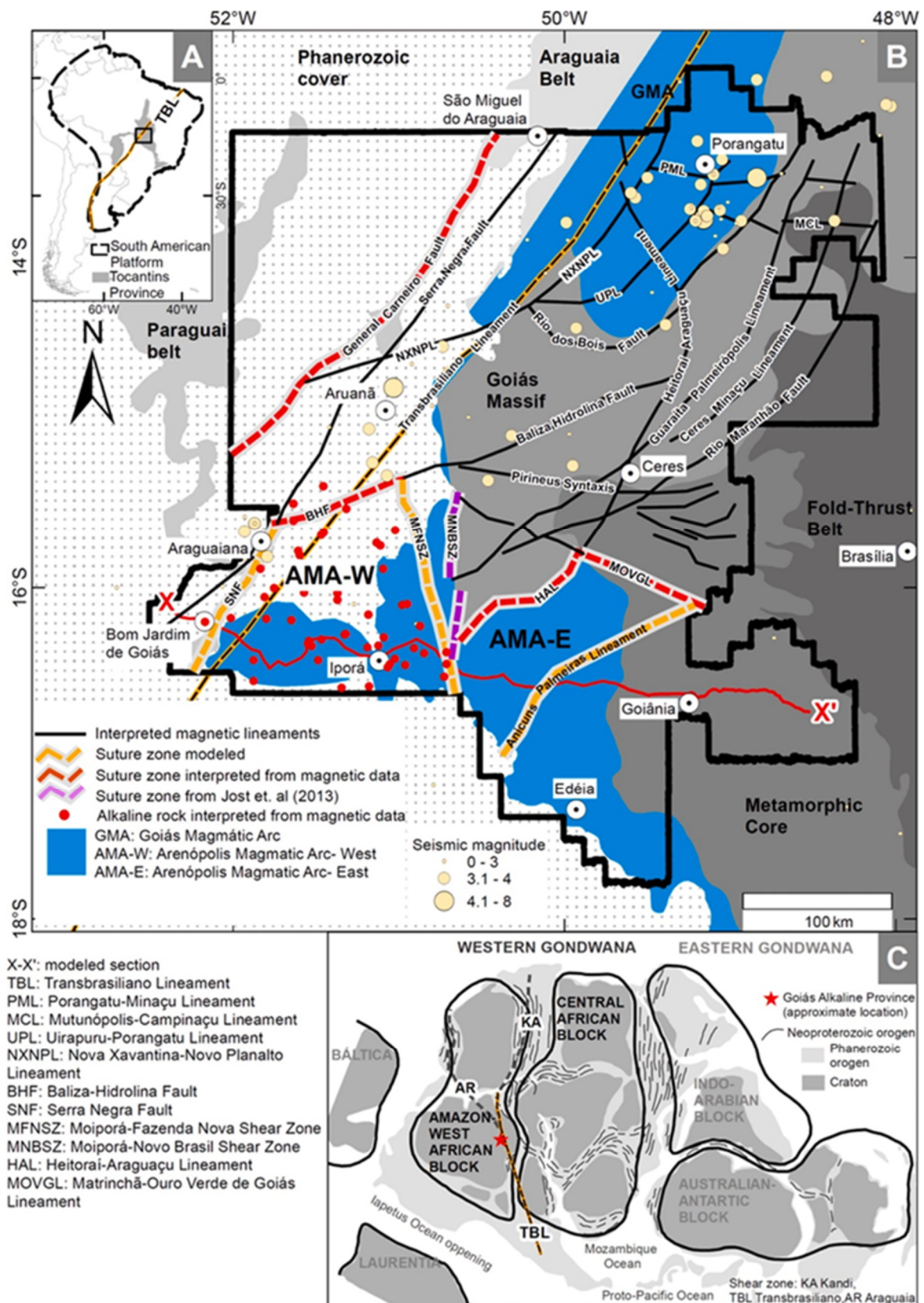


Figura 2-3 Compartimentação geofísica do Arco Magmático de Goiás (extraído de Martins, 2021). Magnitude sísmica de acordo com o Assumpção et al. (2004, 2013); Cordani et al. (2013); Rocha et al. (2011, 2016); Soares et al. (2006).

2.2 Geologia Local

O Granito Iporá é um dos corpos intrusivos que compõem o AMG, sendo um corpo de grandes dimensões (batólito), de caráter pós-tectônico. A rocha que melhor representa a intrusão granítica é a biotita granito vermelho a róseo, granulação média a grossa, equigranular a localmente porfirítico, rico em feldspato potássico (Fuck & Pimentel et al. 1985).

O Granito Iporá é o último representante do magmatismo brasileiro (Rodrigues, 1996), e constitui uma das hospedeiras das rochas da associação máfica alcalina que compõem a Província Alcalina de Goiás (Feitoza 2011).

Segundo Feitoza (2011) na área estudada, o Granito Iporá aflora em áreas aplainadas na forma de blocos e lajedos. Neste caso, o granito apresenta descoloração, com uma cor branca acinzentada por conta dos processos de fenitização.

A fenitização ocorre comumente no contato com as rochas alcalinas do Complexo Buriti, atinge até cerca de 300 metros de largura. Esse processo é caracterizado pela descoloração das rochas graníticas em direção ao contato (Feitoza, 2011) e a presença de fenocristais subédricos de feldspato (Cerqueira, 1996).

A área de estudo está localizada na borda do Complexo Fazenda Buriti, situado próximo à cidade de Iporá. O complexo ocupa uma área próxima a 35 km². As rochas alcalinas presentes na região são compostas por clinopiroxenitos, melagabros, sieno-gabros, olivina sienitos, dunitos, peridotitos, piroxenitos e produtos de processos de fenitização (Dani 1974; Feitoza 2011) datados entre 88-90 Ma (Almeida, 1983; Brod et al., 2005; Danni et al., 1990,1994).

Segundo Danni (1978) na região de Iporá consta a existência de dois eventos magmáticos distintos. O primeiro evento relacionado a intrusões com zona bem definida do tipo central, caracterizada pela série de diferenciação magmática. O segundo evento está associado a reativação dos sistemas de falhas, relacionadas ao primeiro evento magmático, sendo caracterizada por uma série de intrusões sub-vulcanicas no Cretáceo superior (Danni 1974).

O mapa da Figura 2-4, foi elaborado por Feitoza (2011), a partir dos dados geológicos, geoquímicos e aerogeofísicos.

Feitoza (2011) descreve a presença de diques com duas tipologias na área, compostos pelas ocorrências de Basanito e diques de sieno-diorito que se estendem ao longo do complexo máfico e compreendem também suas encaixantes. Os diques são caracterizados pelo preenchimento de zonas de fraqueza, e apresentam direções N80°E, N40°E e NS. Se estendem por centenas de metros e sua largura varia na ordem de 1 metro. Tais corpos de pequena magnitude possuem magnetização distinta (Feitoza 2011).

Assim como, os diques pressupõem-se que a brecha, alvo do presente estudo, esteja relacionada à percolação de fluidos do segundo evento tectônico da região de Iporá. Os diques possuem caráter máfico-alkalino, e representam o possível processo de somatização entre os fluidos mineralizados e as porções do Granito Iporá.

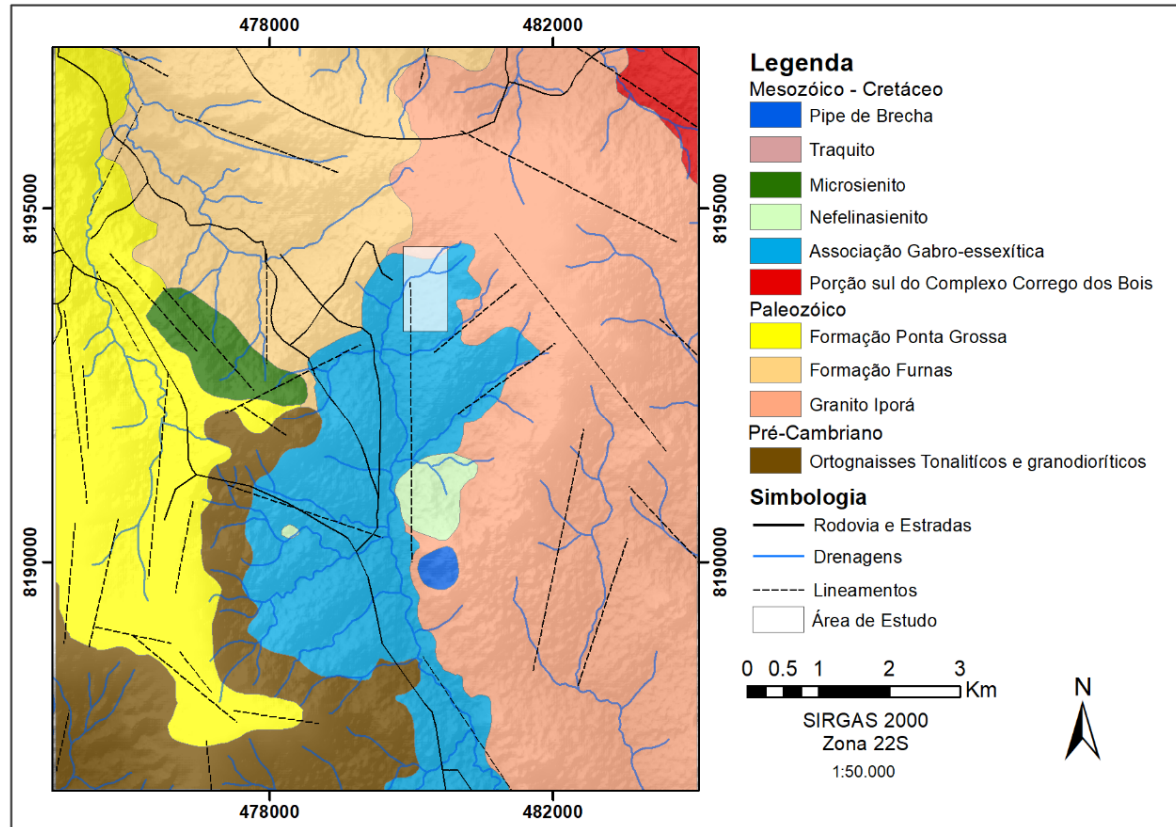


Figura 2-4 Mapa geológico simplificado da área do Complexo Fazenda Buriti (Extraído de Feitoza, 2011, Cerqueira, 1995).

2.2.1 Descrição da Área de Estudo

Previamente ao estudo foram realizados inúmeros furos de sondagem na área de pesquisa. Nesse trabalho somente 3 furos de sondagem foram disponibilizados pela responsável da área, sendo nomeados como F1, F2, F3.

No furo F1 observaram-se um conjunto de associações de rochas máficas, descritas como, brechas, gabros não alterados e gabros brechados, além da ocorrência de níveis de sulfetos.

Os furos 3 e 2 apresentaram apenas litologias associadas às rochas félsicas sendo descritos como granitos/granodioritos, intemperizados à não alterados com poucas ocorrências

de veios e diques máficos.

As informações geológicas dos furos de sondagens não coincidem com as descrições geológicas presentes nos mapas geológicos de referências bibliográficas disponíveis por conta da escala de mapeamento, de modo que foi indicado em imagem aérea a posição dos furos e as observações realizadas em campo durante a aquisição para auxílio nas interpretações geofísicas (Figura 2-5).

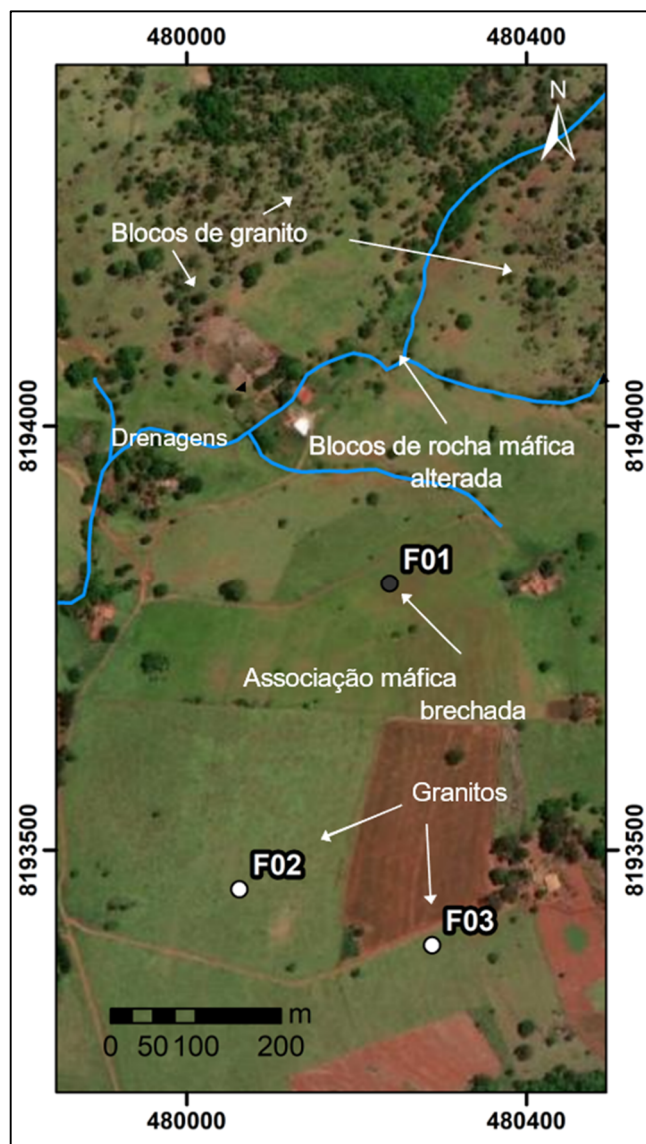


Figura 2-5 Imagem de satélite com a localização dos furos de sondagem usados no trabalho, bem como as observações geológicas realizadas durante a aquisição de dados geofísicos.

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Métodos Elétricos

3.1.1 Resistividade

A eletrorresistividade é um método geofísico que usa o fluxo de corrente artificialmente injetado no solo para verificar o comportamento do potencial elétrico induzido. Como as rochas, fluídos e estruturas presentes no subsolo possuem diferentes composições, estruturas e geometrias, que interferem nos valores de resistividade, o método é usado em investigações geológicas, geotécnicas, prospecção mineral, hidrogeologia e estudos ambientais (TELFORD et al., 1990).

O método funciona com base na injeção de corrente no solo por meio de dois eletrodos (A e B), a diferença de potencial gerada é medida em dois eletrodos de potencial (M e N). Os valores de resistividade aparente são obtidos a partir das diferenças de potencial e da configuração geométrica de 4 eletrodos (Figura 3-1).

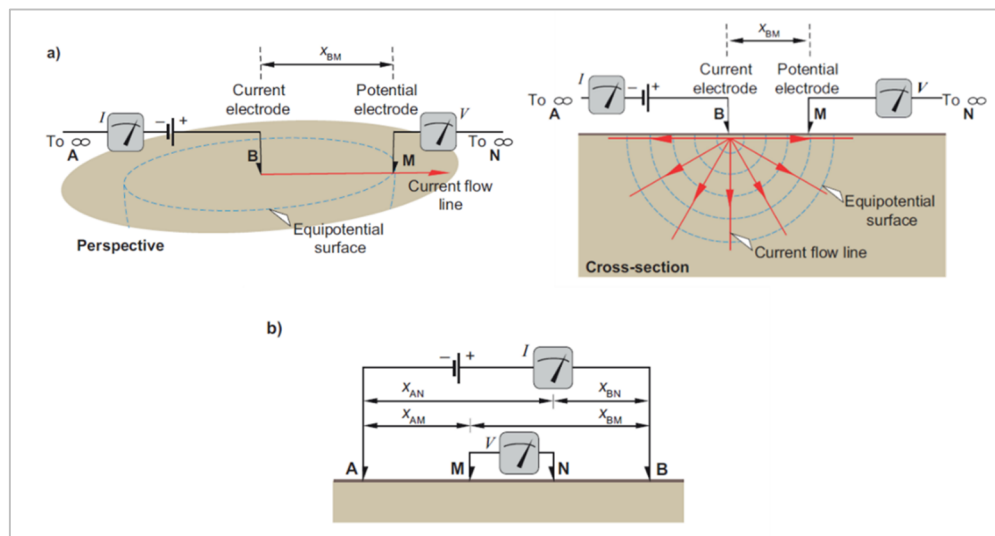


Figura 3-1 Eletrodos de Corrente e potencial. (a) Medição do potencial com eletrodos de

corrente isolados e o campo elétrico em sub-superfície. (b) Configuração geral dos eletrodos dispostos em linha para medição de resistividade (Dendith & Mudge, 2014).

Em sistemas elétricos a força eletromotriz é responsável por gerar um potencial (V) que possibilita o fluxo de corrente (I). A densidade do fluxo de corrente pode ser medida considerando-se a quantificação do fluxo através de uma seção (A/m^2), em um fluxo homogêneo, tanto a variação de cargas como a da área podem modificar a densidade de corrente.

A resistência (R) quanto ao fluxo de cargas no meio é definido como a impedância elétrica. Segundo a Lei de Ohm, condutores perfeitos apresentam resistividade igual a zero. A primeira Lei de Ohm determina que a tensão pode ser obtida a partir do produto da resistência (R) pela corrente (I; Equação 3.1).

$$V = R \cdot I \quad (3.1)$$

A resistividade está associada a resistência elétrica, de modo que a resistividade verdadeira de um material pode ser obtida a partir da aplicação de uma correção geométrica (K_{geom}) aos valores medidos (Equação 3.2).

$$\rho = R K_{geom} \quad (3.2)$$

Substituindo R na Equação (3.1) obtém-se:

$$V = \frac{I \rho}{K_{geom}} \quad (3.3).$$

Discretizando o meio como um cilindro, o fator de correção geométrica pode ser considerado como a área de sua seção transversal. A relação da tensão com a resistividade é definida pela Equação (3.4).

$$\rho = \frac{V}{I} (2\pi X) \quad (3.4)$$

O valor de X é equivalente ao raio do cilindro, de modo que o potencial para qualquer distância é:

$$V = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X} \right) \quad (3.5).$$

Considerando dois eletrodos de corrente, posicionados arbitrariamente, descreve-se a diferença de potencial pela distância entre os eletrodos de potencial e de corrente (Equação 3.6).

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right) \quad (3.6)$$

A resistividade é obtida a partir do rearranjo da equação Equação (3.6) isolando a resistividade e como resultado tem-se a Equação (3.7):

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right)^{-1} \quad (3.7).$$

De acordo com a Equação (3.8) o fator geométrico varia segundo o posicionamento e a distância dos eletrodos de corrente e de potencial, de modo que o fator geométrico depende do acoplamento entre os eletrodos:

$$K_{geom} = 2\pi \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right)^{-1} \quad (3.8).$$

Os arranjos são as múltiplas geometrias de acoplamento em que os eletrodos podem ser utilizados, a relação geométrica entre os eletrodos é o que define a sensibilidade para obter variações verticais ou laterais (Dendith & Mudge, 2014).

3.1.2 Arranjos Eletródicos

O arranjo eletródico define o fator geométrico utilizado no cálculo da resistividade aparente. Os arranjos mais utilizados na eletrorresistividade são o dipolo-dipolo, o polo-dipolo, o Wenner e o Wenner-Schlumberger.

Os arranjos utilizados possuem influência direta nos valores de resistividade aparente obtidos, de modo que o fator geométrico utilizado muda de acordo com o acoplamento dos dipolos formados (Figura 3-2), ou seja, a depender da geometria do alvo alguns arranjos podem ser mais ou menos eficientes (Loke, 2004).

O arranjo dipolo-dipolo é muito usado em levantamentos de eletrorresistividade devido ao baixo acoplamento eletromagnético entre o circuito de corrente e o circuito de potencial (Loke 2004). Além disso, o arranjo é muito sensível a mudanças horizontais, mas pouco sensível a mudanças verticais, constituindo um bom método para mapear estruturas verticais.

O Arranjo polo-polo possui como principal característica as altas profundidades de investigação, uma vez que o espaçamento entre os “polos” de corrente é considerado infinito. Esse arranjo é muito utilizado em investigações geofísicas para mapeamentos regionais, cujo objetivo é atingir grandes profundidades. Possui como desvantagem a baixa resolução devido à baixa razão sinal ruído (Dahlin & Zhou, 2004).

O arranjo Wenner foi um dos pioneiros nas investigações geoeletricas e possui

espaçamento constante entre os eletrodos de corrente e de potencial, aumentando de forma escalar, de acordo com o nível de profundidade investigado. Por fim, o arranjo é sensível às mudanças verticais, constituindo um bom método para investigar os contrastes verticais, mas pouco sensível para as variações laterais (Loke, 2000).

O arranjo Schlumberger é amplamente referenciado na literatura e um dos mais utilizados para a realização de sondagens elétricas. A configuração eletródica constitui uma simetria em relação ao ponto médio do arranjo. O arranjo Wenner-Schlumberger, constitui uma junção entre os arranjos Wenner e Schlumberger (Pazdirek & Blaha, 1996).

O Wenner-Schlumberger é um arranjo alternativo ao Wenner por apresentar maior sensibilidade a variações horizontais e ainda assim delimitar contrastes verticais, apresenta sinal ruído menor que o arranjo Wenner e maior que o arranjo dipolo-dipolo, entretanto geralmente apresenta menor cobertura que dipolo-dipolo (Loke, 2004)

O arranjo polo-dipolo possui maior alcance espacial quando comparado ao dipolo-dipolo e é menos suscetível a ruídos eletrônicos (dipolo-dipolo) e telúricos (polo-polo). Ainda que, o arranjo possua menor resolução e deva ser analisado cuidadosamente, por conta da resposta assimétrica, é uma boa alternativa para limitações de espaço e tensão de corrente injetada pelo equipamento. Para uma mesma intensidade de corrente o sinal recebido pelos eletrodos de potencial é maior que o arranjo dipolo-dipolo, tendo como consequência uma maior razão sinal ruído (Gallas, 2000).

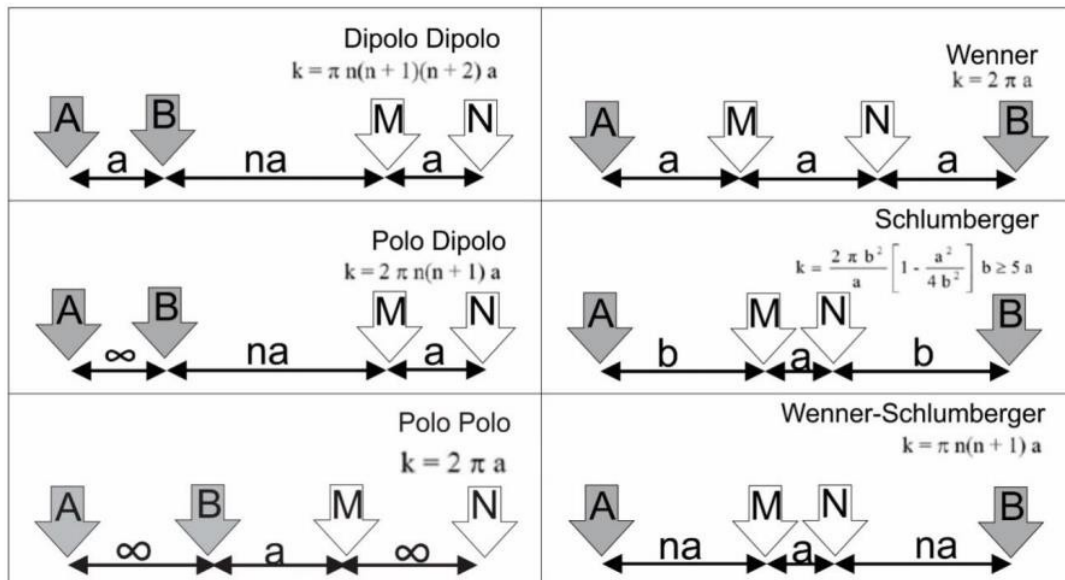


Figura 3-2 Configuração dos principais arranjos eletródicos, e seus respectivos fatores geométricos. (Alagia, 2018, modificado de Loke, 2004).

3.1.3 Polarização Induzida

No método da Polarização Induzida (IP) a medida é realizada com base na diferença de polarização dos materiais. Quando uma corrente elétrica circula pelo meio, alguns minerais possuem a capacidade de polarizarem, aumentando o potencial elétrico e armazenando carga, com a retirada da corrente tais corpos tendem a voltar à situação de equilíbrio. A diferença de potencial pode ser medida, de forma que a integral do potencial elétrico variando no tempo define a capacitância, sendo a capacidade de um material de acumular cargas elétricas (Dendith & Mudge, 2014).

A medida pode ser realizada no domínio do tempo ou da frequência, assemelhando-se a descarga de um capacitor (domínio do tempo) ou a variação impedância de uma corrente alternada (domínio da frequência; Sumner, 1976).

A aplicação de corrente é realizada em frequências menores que 1MHz, de modo que os cinco mecanismos de polarização nessa faixa de frequência são: a polarização de eletrodo, a polarização de membrana, a polarização de camada de Stern, a polarização de camada difusa e a polarização de Maxwell-Wagner (Revil & Florsch, 2010).

No contexto de exploração mineral o tipo de polarização de maior relevância é a polarização de eletrodo (Figura 3-3), por conta de sua forte relação com a presença de minerais metálicos (Pinto, 2019). A polarização ocorre decorrente da transição entre os distintos modos de condução elétrica eletrônica e eletrolítica (Figura 3-3), essa transição consolida uma barreira que deve ser vencida para possibilitar o livre fluxo entre os meios (Marshall & Madden, 1959; Ward, 1988).

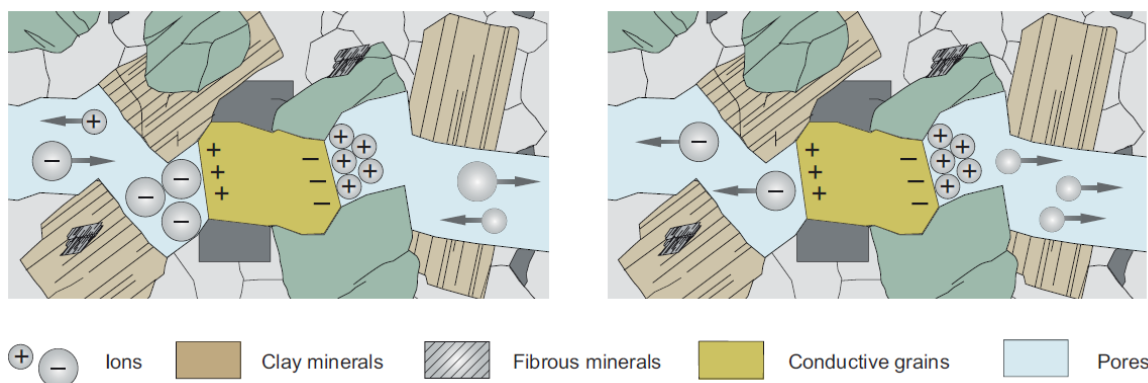


Figura 3-3 Representação esquemática do fenômeno da Polarização de Eletrodo (Dendith & Mudge, 2014).

3.1.3.1 Polarização Induzida Domínio do Tempo

A medida de IP realizada no domínio do tempo consiste em analisar o decaimento

temporal do potencial elétrico após o desligamento da corrente injetada no solo, ou seja, a corrente varia no tempo. Após a retirada de corrente a tensão não cai bruscamente para zero, de modo que, após uma queda brusca, diminui seu valor de forma gradual até chegar no estado de equilíbrio (Reynolds, 1997).

A cargabilidade foi definida por Seigel (1959) como um parâmetro adimensional, resultante da normalização da tensão secundária medida, após a retirada de corrente, pela tensão primária medida na eminência da retirada da corrente elétrica.

Os valores de cargabilidade parcial (M_i) são medidas discretizadas em um intervalo de tempo, em que o decaimento da tensão inicial (V_{on}) em função do tempo, apresentam o comportamento de uma semi-exponencial (

Figura 3-4).

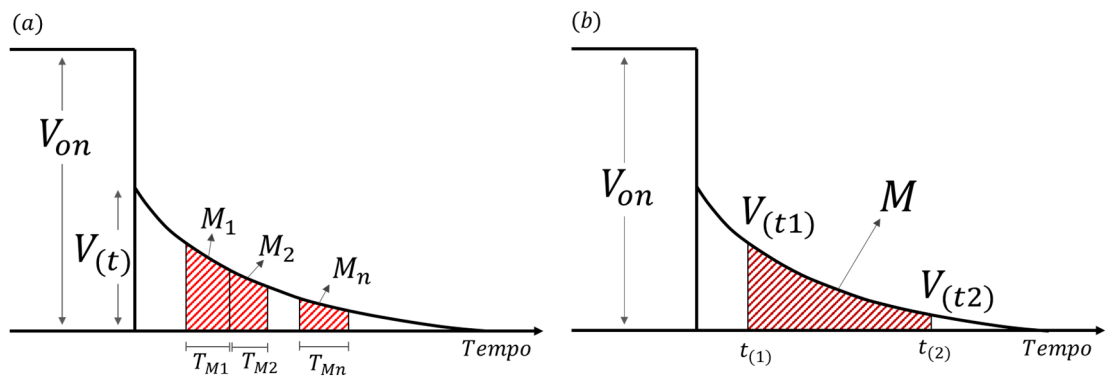


Figura 3-4 Curva de decaimento de potencial com a identificação das áreas onde registram-se as cargabilidades (a) M_i (parcial) e (b) M (global; Reynolds, 1997).

A cargabilidade parcial é quantificada pela área da exponencial definida pelos limites da janela de tempo utilizada na medição (T_{Mi}), de acordo com a equação.

$$M_i = \frac{1}{T_{Mi} V_{on}} \int_{T_{Mi}} V dt \quad (3.9)$$

A cargabilidade integral (M) é resultante do somatório das cargabilidades parciais com relação as janelas de tempo de cada medição.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n M_i T_{Mi}}{\sum_{i=1}^n T_{Mi}} \quad (3.10)$$

3.1.3.2 Polarização Induzida Domínio da Frequência

No IP frequência as medidas são realizadas no domínio de duas frequências distintas, geralmente menores que 10Hz. Esse estudo parte do princípio de que a resistividade elétrica

(impedância elétrica, $Z(\omega)$) varia de acordo com a mudança de frequência da corrente injetada no meio. Essa variação acontece, pois, pequenos tempos de medição acarretam na diminuição do efeito IP e consequentemente da resistividade aparente (Figura 3-5).

A resistividade aparente para uma frequência baixa (ρ_{a0}) é maior que para frequência alta (ρ_{a1}). Para um pequeno período de tempo a sobrevoltagem observada (V_{a0}) é menor que para um longo período de tempo (V_{a1}). O decaimento da tensão é muito curto para ser determinado, de modo que a amplitude da voltagem é medida com base na corrente injetada, resultando no valor de resistência, aplicando-se o fator geométrico, obtém-se o valor de resistividade aparente (Reynolds, 1997).

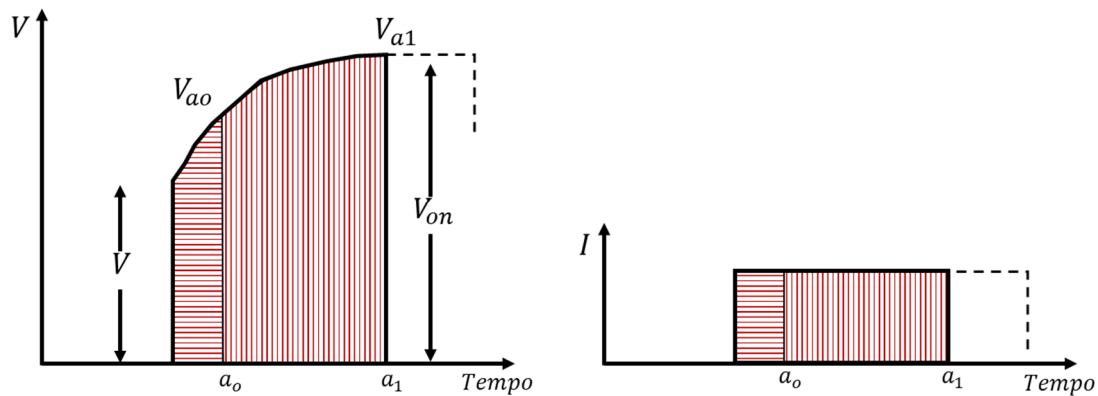


Figura 3-5 Representação esquemática do aumento do efeito de Polarização Induzida (V_{a0} para V_{a1}) com o acréscimo do tempo de carga (modificado de Reynolds, 1997)

O efeito é observado com base no percentual de mudança de resistividade de uma alta frequência e uma baixa, denominada Efeito Percentual de Frequência (PFE; 3.12), descrita pela equação do Efeito Frequência (FE; 3.11).

$$FE = \frac{Z(\omega_{a0}) - Z(\omega_{a1})}{Z(\omega_{a1})} = \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a1}} \quad (3.11)$$

$$PFE = 100 \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a1}} \quad (3.12)$$

Segundo Telford (1990) outro parâmetro para o diagnóstico da presença de metais é o Fator Metal (MF; Equação 3.13). O parâmetro consiste na normalização do PFE com relação a baixa frequência utilizada (ρ_{a0}), em que serão realçadas zonas com menores resistividades e alto PFE. Para isso, é aplicado a consideração observada em realizações práticas, de que a presença de metais na rocha encaixante tende a diminuir os valores de resistividade observados (Hallof, 1964).

$$MF = \frac{PFE}{\rho_{a0}} 2\pi 10^3 \quad (3.13)$$

3.2 Magnetometria

Os métodos geomagnéticos podem ser utilizados em uma variedade de aplicações, desde investigações de pequena escala, como localização de cabos próximos a superfície, investigações para engenharia e para larga escala como o mapeamento geológico para determinar estruturas profundas, como a exploração de hidrocarbonetos e exploração mineral (Reynolds, 1997).

Uma das características importantes do magnetismo é que tal propriedade é intrínseca ao material, podendo apresentar magnetização própria, como ímãs, ou adquirida a partir do efeito de um campo magnético externo que induz a magnetização (magnetização induzida) (Dendith & Mudge, 2014).

O magnetismo pode ser descrito com base em polos magnéticos, em que dois polos de polaridades inversas estão posicionados a uma distância arbitrária, de modo que cada um dos polos tem a tendência a se atrair. O polo magnético com polaridade negativa é denominado sul magnético, enquanto o polo com polaridade positiva é denominado como norte magnético, sendo a composição dos dois chamado de dipolo magnético (Dendith & Mudge, 2014).

O campo magnético é definido como o espaço em que as interações magnéticas entre os dois polos ocorrem, descritos a partir de linhas de fluxo, caracterizadas por vetores que partem do norte magnético em direção ao sul magnético. Tais vetores podem ser medidos, intensidade do fluxo de corrente B, em trabalhos geofísicos é quantificada pela unidade em nanotesla ($nT=10^{-9}T$; Reynolds, 1997).

3.2.1 Campo Magnético Terrestre

O campo magnético da terra está associado ao núcleo da terra, assim como também, as rochas que compõem a litosfera. Fenômeno que é resultado da interação entre o núcleo interno, composto por ferro e níquel sólidos, e o núcleo externo composto por ferro líquido e elementos leves. A teoria do aerodínamo consiste em que os íons livres no núcleo externo geram corrente elétrica, que por sua vez resultam em um campo magnético, o que também explica a teoria da inversão de polaridade magnética da terra (Kearey et al. 2009).

Aproximadamente 90% do campo magnético da terra pode ser aproximado ao comportamento de uma barra magnética localizada no centro da terra (Figura 3-6). A

intensidade total do campo magnético terrestre é denominada campo magnético total (CMT ou TMI), sendo o resultado da soma vetorial de suas três componentes dimensionais (Dendith & Mudge, 2014).

Por convenção a polaridade positiva, sul magnético, está posicionada no norte geográfico, de modo análogo, tem-se o norte magnético, posicionado no sul geográfico. O ângulo entre a componente horizontal H e o campo total T é definida como inclinação magnética, enquanto o ângulo entre a componente horizontal e o norte geográfico é denominada declinação magnética (Figura 3-6).

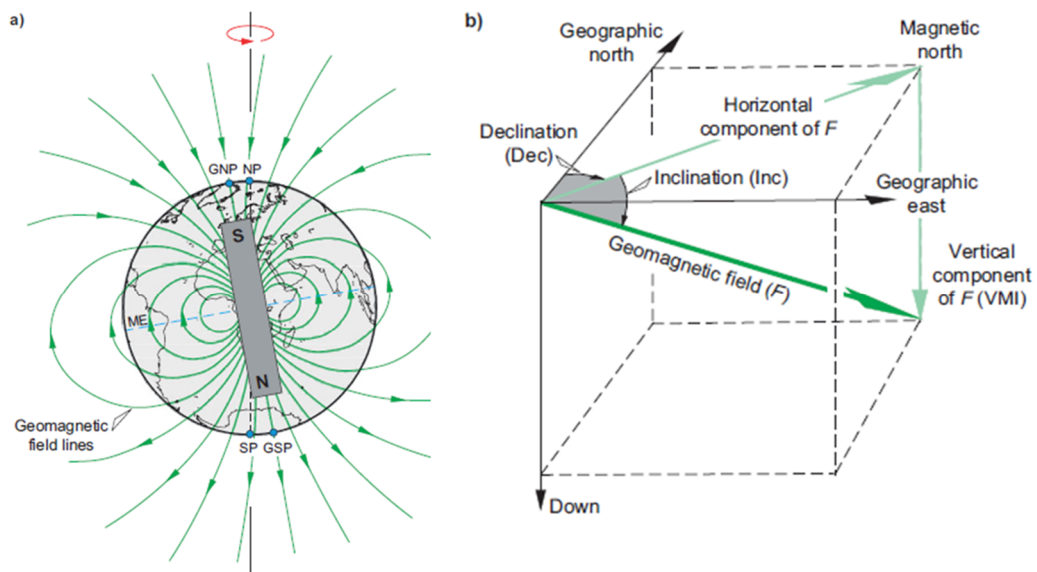


Figura 3-6 (a) Representação esquemática idealizada para o campo geomagnético da Terra. (b) Elementos vetoriais que definem o campo magnético da Terra (Dendith & Mudge, 2014).

O campo magnético da terra pode sofrer contribuições externas importantes para o método magnético, a interação dos campos externos pode resultar em contribuições importantes na intensidade do campo magnético total. Os dois fenômenos são caracterizados como variações temporais e são a variação diurna resultante da interação da radiação eletromagnética solar, e a ocorrência de tempestades magnéticas provenientes de erupções solares em que os íons emitidos interagem com o campo magnético da terra resultando em variações de alta-frequência (Luiz & Silva, 1995).

3.2.2 Anomalias Magnéticas

A intensidade do TMI ao longo de uma seção horizontal varia conforme a direção e

intensidades das variações do campo magnético ao longo da terra, que por sua vez varia de acordo com as rochas que podem ou não conter minerais magnéticos (Luiz & Silva, 1995).

Considerando o campo magnético da terra (H) apenas como induzido, isso resulta em anomalias com diferentes orientações e intensidades magnéticas (Figura 3-7).

A inclinação é resultante do campo magnético em relação a horizontal e a intensidade e resultante da soma dos vetores de magnetização, as medidas magnéticas são realizadas com relação a horizontal, muitas vezes não sendo perpendicular ao campo magnético induzido, de modo que apresentem feições dipolares (Dendith & Mudge, 2014).

A amplitude é composta pela soma vetorial das influências do campo magnético da terra e do campo magnético induzido em um corpo (Mi). A variação de qualquer um dos vetores pode resultar em anomalias de diferentes formas, ainda que o corpo analisado seja o mesmo. É possível expressar a magnetização induzida em um corpo a partir da suscetibilidade magnética (k), sendo relacionada a como o material está sendo magnetizado (Reynolds, 1997).

A relação da suscetibilidade magnética é descrita pela equação:

$$M=kH \quad (3.14).$$

Após à coleta os dados magnéticos passam por uma série de correções com o intuito de reduzir a influência de campos externos, afim de analisar apenas os valores de magnetização induzida adquiridos.

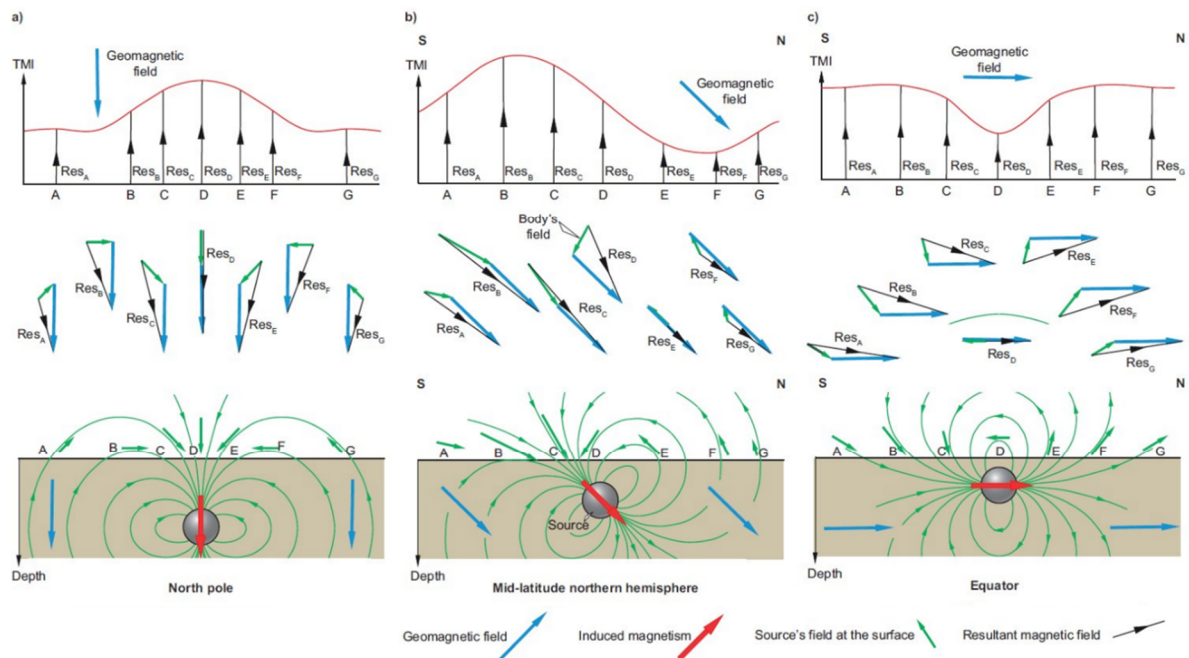


Figura 3-7 Esquema da resposta induzida do campo magnético da terra em um alvo esférico. (a) Altas Latitudes. (b) Latitudes intermediárias (c) Baixas Latitudes. (Dendith & Mudge, 2014)

3.2.3 Filtros Espaciais

A aplicação de filtros aos dados de magnetometria possibilita a recuperação, filtragem e capacidade de realçar anomalias magnéticas de interesse, podem possuir caráter derivativos ou a alteração do aspecto de frequência de acordo com sua finalidade.

Segundo Kearey (2009), podem ser utilizados filtros de análise de frequência como, passa banda, passa alta ou passa baixa para realizar remoções de frequências de ondas específicas, que podem estar relacionadas a fontes magnéticas rasas ou profundas, assim como de ruídos aleatórios conforme seu comprimento de onda.

Os filtros utilizados com base em continuação são a continuação ascendente e descendentes. Funcionam com base na alteração da altura de observação dos dados magnéticos adquiridos. O mais utilizado é a continuação ascendente em que os valores de amplitude e frequência são alterados com base na intensidade das anomalias de alto comprimento de onda, aumentando a distância de observação, resultando em feições suaves proporcionais e suprimindo ruídos de alta frequência (Dendith & Mudge, 2014).

Os filtros derivativos são utilizados para evidenciar variações no campo magnético, geralmente aplicados para identificar feições geométricas como corpos tabulares ou contatos litológicos, em que as manipulações matemáticas com base em gradientes têm como finalidade definir a geometria ou direções de tendência das fontes magnéticas. Os principais filtros derivativos são as derivadas horizontais (D_x e D_y) a derivada vertical (D_z), o gradiente horizontal total (GHT) (Blum, 1999), o Sinal Analítico 3D (Amplitude do Gradiente total) (Li, 2006, Roest et al. 1992) e a derivada tilt (Miller & Singh, 1994).

CAPITULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as etapas de campo, assim como os materiais e métodos utilizados no trabalho.

4.1 Eletrorresistividade/IP Frequência

As aquisições de eletrorresistividade e IP frequência foram realizadas de maneira concomitante (Figura 4-1). Foram realizadas 3 seções geoeletricas na área de interesse, duas seções paralelas com 550 metros de extensão e direção NW/SE e uma seção oblíqua as duas com extensão de 290 metros e direção NE/SW (Figura 5-5). O centro de uma das seções paralelas foi posicionado próximo ao furo F1 realizado pela empresa responsável pelo prospecto. O furo de sondagem é uma evidência direta da zona de brecha, de modo que a seção paralela à esta dista aproximadamente 200 m a Oeste e foi utilizada para verificar uma provável continuidade lateral da região de alteração.

Para as maiores seções foram utilizados 56 eletrodos, e para a menor 30 eletrodos. O eletrorresistivímetro é responsável por injetar a corrente e medir a diferença de potencial a partir de dois eletrodos, em que o posicionamento varia de acordo com o arranjo e o nível de investigação. A aquisição foi realizada no *automatic mode*, em que a utilização do cabo multieletródico possibilita a leitura em sequência dos potenciais de diversos eletrodos alocados ao longo de uma linha. O suprimento de energia é realizado com o auxílio de uma bateria de 12V. Os materiais utilizados para medição e montagem das linhas elétricas foram o resistivímetro (*Super Sting R8/IP*) e cabos multieletródicos, bateria de 12V com 40A, 56 eletrodos de Aço-Inox, Argila (Bentonita), Solução Salina (NaCl diluído em água), Caixa de ferramentas, Marretas e GPS.

Quanto aos parâmetros da geometria foi utilizado o espaçamento de 10 metros entre os

eletrodos, para atingir uma profundidade máxima de aproximadamente 100 metros para as maiores seções. O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo com a técnica de caminhamento elétrico, por apresentar a maior densidade de pontos para seções com a mesma extensão e arranjo distinto.

Quanto aos parâmetros de corrente, a maioria dos resistivímetros do mercado trabalha com a definição do valor de potencial injetado com base para o cálculo da resistividade aparente, entretanto o equipamento utilizado trabalha com a definição do valor máximo de corrente injetada. O manual descreve que o equipamento pode injetar uma corrente máxima de 2 A, e que esse valor deve ser limitado a 1.2 A para manter a integridade do equipamento, com base nisso foi utilizada a corrente máxima de 0.8 A.

Os intervalos de medição de corrente foram definidos em 200 ms, 800 ms e 1200 ms. Tais intervalos permitem a realização do cálculo de IP Espectral a partir do efeito frequência (EF), que parte da premissa de que a resistividade do meio varia com a frequência da corrente injetada de acordo com suas propriedades elétricas simulando o efeito IP.

Ainda que, os cabos tenham sido revisados e ajustados previamente ao trabalho de campo, os três primeiros eletrodos das maiores seções não funcionaram, de modo que a extensão total das seções passou de 550 metros para 520 metros. A extensão total das seções e os períodos de corrente utilizados estão detalhados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Especificações de arranjos, períodos de leitura (pulso) e extensão das seções de resistividade elétrica obtidas em campo.

Perfil	Arranjo	Período de leitura	Extensão
Linha 1	Dipolo-Dipolo	200 ms	520 m
		800 ms	
Linha 2		200 ms	
		800 ms	
Linha 3		200 ms	290 m
		1200 ms	



Figura 4-1 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica efetuados com o equipamento *SuperSting R8* na área da pesquisa.

4.2 Magnetometria

Os dados de magnetometria foram adquiridos posteriormente as aquisições geoeletricas (Figura 4-2). As aquisições ocorreram ao longo de 4 perfis com extensões que variaram entre 830 e 550 metros. A amostragem das estações ocorreu a cada 5 metros, de modo que 3 dos 4 perfis sobrepuassem as seções elétricas realizadas previamente (Figura 5-5), os piquetes utilizados na aquisição prévia serviram de referência para a sobreposição dos dados.

Como primeira etapa de aquisição, um dos magnetômetros foi posicionado próximo aos perfis planejados com o intuito de medir as variações magnéticas provenientes da radiação solar (equipamento base). O equipamento GSM-19 que possui integração com GPS foi utilizado no modo *Rover* para a aquisição dos pontos, enquanto o modelo GSM-19T que não possui integração com GPS foi utilizado como base. A base foi configurada para medir o campo externo a cada 1 min.

Quanto a amostragem dos equipamentos, a apresentada pelos modelos é de 0,022 nT, a resolução (menor variação mensurável) é de 0,01 nT e a acurácia absoluta que garante a integridade do dado é de +/- 0,1 nT.

Os perfis tiveram os comprimentos de 830 m (linhas 1-A e 1-B), 550 m (linhas 2 e 3).



Figura 4-2 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de magnetometria terrestre com o magnetômetro GSM19 na área de pesquisa.

CAPÍTULO 5

5. Artigo Científico

Delimitação e caracterização magnética e geolétrica da sulfetação hidrotermal associada à auréola de fenitização da intrusão Complexo Fazenda Buriti

Resumo

A área de estudo localiza-se na auréola de fenitização da intrusão do Complexo Máfico Alcalino Fazenda Buriti. Acredita-se que a região seja composta por dois eventos tectônicos distintos, o primeiro no cretáceo inferior com a intrusão do complexo máfico alcalino e o segundo no cretáceo superior com a reativação do sistema de falhas, com alocação de diques de diferentes tipologias associadas as estruturas do primeiro evento e eventos anteriores. A evidência de mineralizações sulfetadas, assim como a interação com o Granito Iporá direcionaram a aplicação dos métodos geofísicos com o intuito de caracterizar a estrutura de alteração de gênese pouco conhecida, possivelmente associada ao segundo evento local. Para a realização do estudo foram realizados levantamentos magnetométricos e de eletroresistividade. A utilização de dois períodos de injeção de corrente possibilitou a análise da resposta de cargabilidade da estrutura alvo a partir dos cálculos de Porcentagem de Efeito Frequência (PFE) e Fator Metal (MF). Com base nos dados magnéticos foi delimitado o possível limite da zona de alteração, assim como a identificação de lineamentos coerentes as direções das estruturas regionais, EW e N40°E. As estruturas condutivas do dado de resistividade são similares aos limites definidos na magnetometria, e foram utilizados para a caracterização geofísica da brecha hidrotermal de filiação máfica alcalina. A estrutura definida foi caracterizada com base nos perfis magnéticos, na inversão de susceptibilidade aparente (MVI), nos valores de resistividade e nas respostas de PFE e MF. A estrutura associada a alteração possui magnetização intermediária a alta, com valores de susceptibilidade aparente coerentes aos perfis magnéticos. As feições condutivas tem similaridade aos limites definidos, assim como os dados de cargabilidade, com a identificação de anomalias de alta magnitude na estrutura principal e a delimitação de possíveis estruturas secundárias. Os dados geofísicos foram utilizados de maneira conjunta à descrição litológica para confecção de um modelo geológico simplificado.

Palavras-chave: *Província Alcalina de Goiás; Prospecção geofísica; Magnetometria; Resistividade; IP Frequência.*

Delimitation and magnetic and geoelectrical characterization of the hydrothermal sulfide associated with the phenitization halo of the intrusion Fazenda Buriti Complex

Abstract

The study area is located in the phenitization halo of the intrusion of the Fazenda Buriti Alkaline Mafic Complex. That the region is composed of two distinct tectonic events, the first in the lower Cretaceous with the intrusion of the alkaline mafic complex and the second in the upper Cretaceous with the reactivation of the fault system, resulting in the allocation of dikes of different typologies associated with the structures. of the first event and previous events. The evidence of sulphide mineralizations, as well as the interaction with the Iporá Granite, guided the application of geophysical methods in order to characterize the alteration structure that basically unknown genesis, possibly associated with the second local event. The magnetometric and electroresistivity surveys were carried out to analyse the area response. Using two periods of current injection was possible to analyze the loadability response of the target structure from the calculations of Frequency Effect Percentage (PFE) and Metal Factor (MF). Based on the magnetic data, the possible limit of the alteration zone was delimited as well as the identification of lineaments consistent with the directions of the regional structures EW and N40°E. The conductive structures of the resistivity data were compared to the limits defined in the magnetometry showing similarity and these limits were used to carry out the geophysical characterization of the hydrothermal breccia of alkaline mafic filiation. The defined structure was characterized based on magnetic profiles, apparent susceptibility inversion (MVI), resistivity values and PFE and MF responses. The structure associated with the alteration showed intermediate to high magnetization, with apparent susceptibility values consistent with the magnetic profiles. The conductive features showed similarity to the defined limits as well as the loadability data with the identification of high magnitude anomalies in the main structure and the delimitation of possible secondary structures. The geophysical data were used together the lithological description to create a simplified geological model.

Keywords: *Alkaline Province of Goiás; Geophysical Prospecting; Magnetometry; Resistivity; IP Frequency.*

5.1 Introdução

A localização de possíveis alvos prospectivos, por meio da geofísica consiste em analisar um contraste de propriedades físicas do meio, que variam de acordo com a composição, granulometria e estruturação (RIBEIRO; MOLINA, 2018). Por tanto assinaturas de ocorrências geológicas podem ser alinhadas a métodos diretos com intuito de direcionar estudos prospectivos.

Previamente ao estudo foram realizados três furos de sondagem na área. A indicação de um furo mineralizado com associações máficas e dois furos com a ocorrência de granitos são incoerentes aos estudos de mapeamento geológico anteriores e reforçam a necessidade de mais estudos para identificar mineralizações associadas ao complexo Fazenda Buriti e suas encaixantes.

A mineralização sulfetada é composta por pirita, pirrotita e calcopirita, que ocorrem de maneira disseminada e maciça.

Os sulfetos disseminados estão associados aos halos de alteração hidrotermal na estrutura principal e nas encaixante, enquanto as mineralizações nas regiões brechadas estão associadas as estruturas rúpteis originadas durante os processos de alteração.

Os halos de alteração possuem modificação parcial ou total das texturas das rochas encaixantes, gabros e granitoides, proporcional ao grau de alteração. A porosidades nos halos é resultante do escape de gases de porções voláteis e a dissolução de minerais substituídos por calcita.

A utilização dos métodos geofísicos próximos ao furo de sondagem tem como objetivo delimitar a área de influência da alteração, com a evidência direta do furo de sondagem, além de caracterizar a zona de alteração conforme as propriedades físicas, afim de entender quais as áreas favoráveis para as maiores concentrações de mineralizações.

5.2 Contexto Geológico

A área de estudo deste trabalho localiza-se na borda do Complexo Máfico-Alcalino Fazenda Buriti (Figura 5-2), mais especificamente no contato intrusivo com Granito Iporá.

O Granito Iporá, último representante do magmatismo brasileiro (Rodrigues 1996), é uma das hospedeiras das rochas de associação máfica alcalina que compõem a Província Alcalina de Goiás (Feitoza 2011), representado principalmente por biotita granito vermelho a róseo de granulação média a grossa, equigranular a localmente porfirítico, rico em feldspato

potássico (Fuck & Pimentel et al. 1985).

Segundo Martins (2021), a alocação da Província alcalina de Goiás ocorreu durante o rompimento do Gondwana, preferencialmente em estruturas com direções NW-SE e NE-SW, geradas no final da orogenia brasileira e em estruturas Mesozoicas, em que as ocorrências das rochas alcalinas não estão preferencialmente associadas ao Azimuth 125 (Figura 5-1).

Localmente o Azimuth 125 possui deslocamento dextral de N-S resultado da interação com a zona de cisalhamento Moiporá-Fazenda Nova, Lineamento Heitorai-Araguaçu e a Falha Rio Maranhão (Martins, 2021).

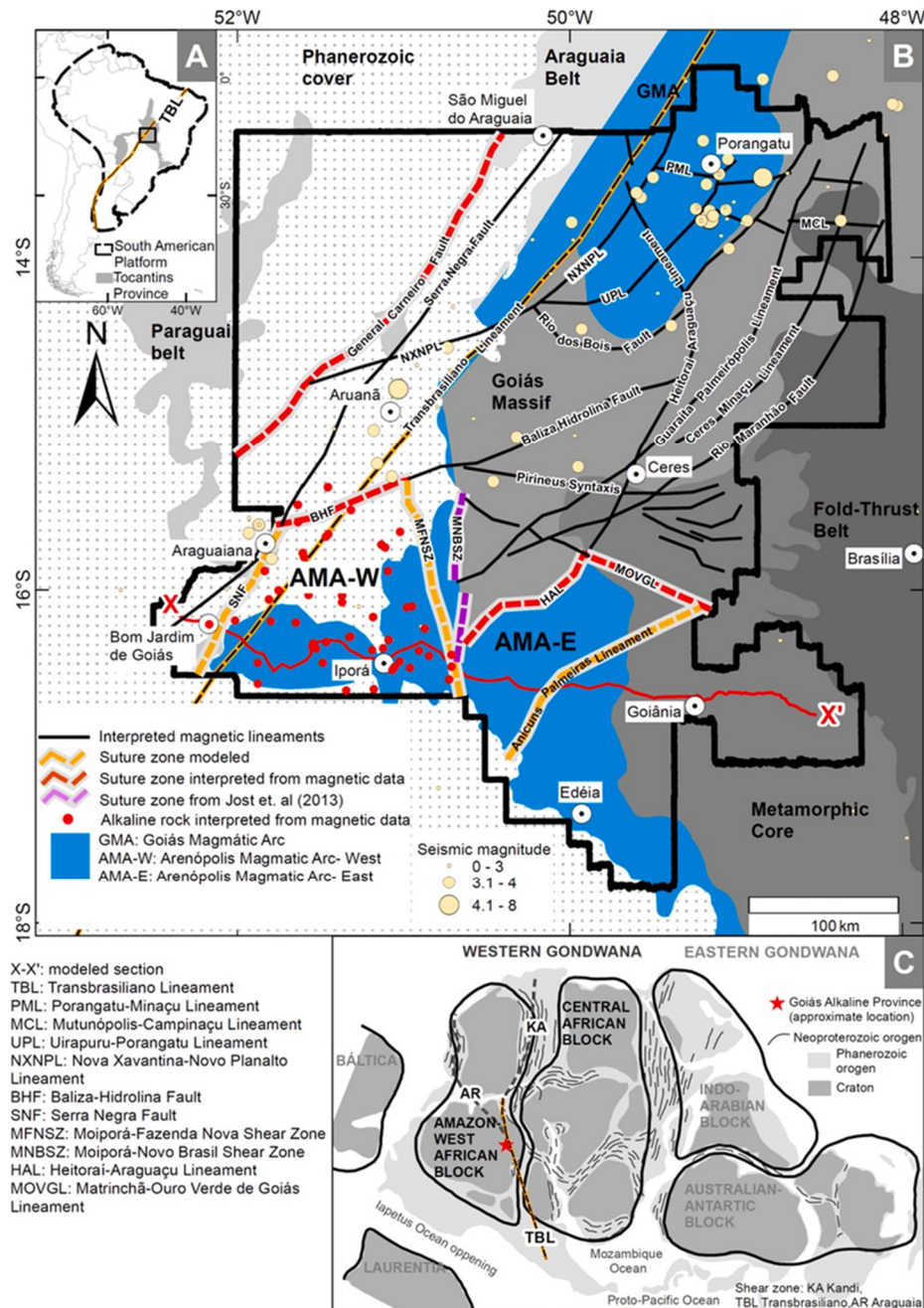


Figura 5-1 Compartimentação geofísica-geológica do Arco Magmático de Goiás (extraído de Martins, 2021). Magnitude sísmica de acordo com o Assumpção et al. (2004, 2013); Cordani et al. (2013); Rocha et al. (2011, 2016); Soares et al. (2006).

Segundo Danni (1978) na região de Iporá consta a existência de dois eventos magmáticos distintos. O primeiro evento relacionado às intrusões com zona bem definida do tipo central, caracterizada pela série de diferenciação magmática. O segundo evento está associado a reativação dos sistemas de falhas, relacionadas ao primeiro evento magmático, sendo caracterizada por uma série de intrusões sub-vulcânicas no Cretáceo superior (Danni, 1974).

Diques com duas tipologias são observados na área, compostos pelas ocorrências de basanitos e diques de sieno-dioritos que se estendem ao longo do complexo máfico e compreendem também suas encaixantes. Caracterizados pelo preenchimento de zonas de fraqueza, apresentam direções N80°E, N40°E e NS. Se estendem por centenas de metros e sua largura varia na ordem de 1 metro. Tais corpos de pequena magnitude possuem magnetização distinta (Feitoza, 2011).

Assim como, os diques pressupõem-se que a brecha, alvos do presente estudo, esteja relacionada à percolação de fluidos enriquecidos no segundo evento tectônico da região de Iporá ou um evento posterior, apresentando caráter máfico-alcálico, representando o possível processo de somatização entre os fluidos enriquecidos e porções do Granito Iporá.

Previamente ao estudo foram realizados inúmeros furos de sondagem na área de pesquisa. Nesse trabalho somente 3 furos de sondagem foram disponibilizados pela responsável da área, sendo nomeados como F1, F2, F3.

No furo F1 observaram-se um conjunto de associações de rochas máficas, descritas como, brechas, gabros não alterados e gabros brechados, além da ocorrência de níveis de sulfetos. Os furos 3 e 2 apresentaram apenas litologias associadas às rochas félsicas sendo descritos como granitos/granodioritos, intemperizados à não alterados com poucas ocorrências de veios e diques máficos.

A brecha de alteração alvo do estudo encontra-se na aréola de fenitização resultante do metamorfismo de contato entre o Granito Iporá e o Complexo Fazenda Buriti. As zonas fraturadas são preenchidas por pirita, calcopirita e pirrotita em forma de veios com evidências de ocorrência de esfarelita, além da presença destes sulfetos disseminados nas encaixantes.

As informações geológicas dos furos de sondagens não coincidem com as descrições geológicas presentes nos mapas geológicos de referências bibliográficas disponíveis.

Foi indicado em imagem aérea a posição dos furos e as observações realizadas em campo durante a aquisição para auxílio nas interpretações geofísicas (Figura 5-2b).

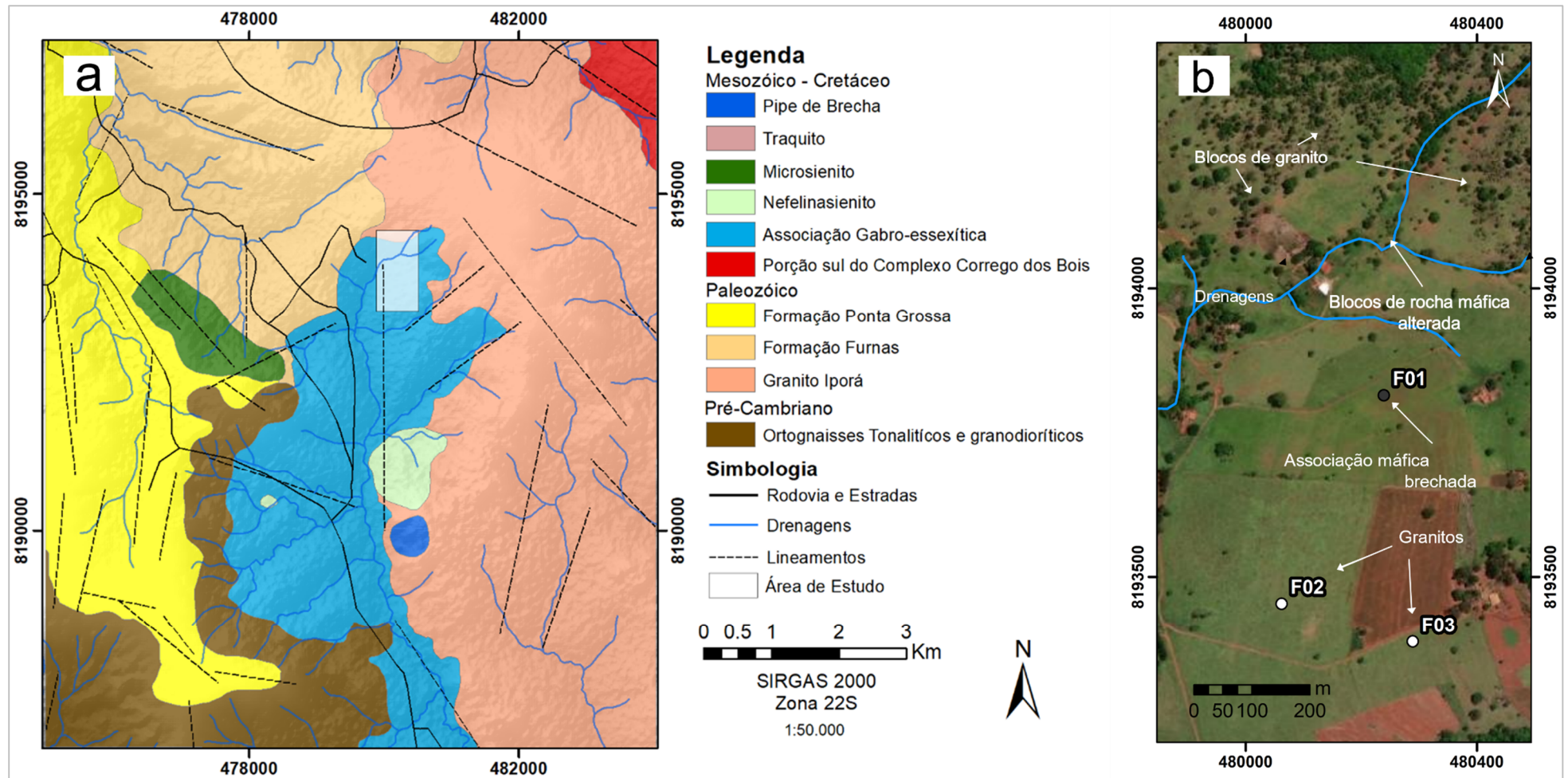


Figura 5-2 (a) Mapa geológico simplificado da área do Complexo Fazenda Buriti (Modificado de Feitoza, 2011). (b) Modelo esquemático da área de estudo.

5.3 Metodologia

Para realizar a caracterização da área de estudo foram utilizados os métodos da eletrorresistividade, o IP Frequência e a Magnetometria terrestre. Os dados elétricos foram processados no programa *Res2Dinv* e exportados para o *Software OasisMontaj*. Os dados magnéticos foram processados nos programas *Magmap* e *OasisMontaj*.

5.3.1 Aquisição de dados



Figura 5-3 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica efetuados com o equipamento *SuperSting R8* na área da pesquisa.

5.3.1.1 Eletorresistividade

As aquisições de eletrorresistividade e IP frequência (Figura 5-3) foram realizadas de maneira concomitante. Foram adquiridas 3 seções geoeletricas na área de interesse, duas seções paralelas com 550 metros de extensão e direção NW/SE e uma seção obliqua as duas com extensão de 290 metros e direção NE/SW (Figura 5-5).

O centro de uma das seções paralelas foi posicionado próximo ao furo F1 realizado pela empresa responsável pelo prospecto. O furo de sondagem é uma evidência direta da zona de brecha, de modo que a seção paralela à esta dista aproximadamente 200 m a Oeste e foi utilizada para verificar uma provável continuidade lateral da região de alteração

O espaçamento entre os eletrodos utilizado foi de 10 metros, a corrente máxima utilizada para realizar as medições foi de 0.8 A e as seções foram adquiridas com três períodos de injeção, com 200 ms, 800 ms e 1200 ms, para realizar os cálculos da Porcentagem de Efeito Frequência (PFE) e Fator Metal (MF).

Por conta de falhas durante a aquisição os 3 primeiros eletrodos das maiores seções não funcionaram resultando em seções com extensão total de 520 metros.



Figura 5-4 Fotografias evidenciam a aquisição de dados de magnetometria terrestre com o magnetômetro GSM19 na área de pesquisa.

5.3.1.2 Magnetometria

Os dados de magnetometria foram adquiridos posteriormente as aquisições geoeletricas (Figura 5-4). Foram levantados 4 perfis magnético com extensões que variaram entre 830 e 550 metros, o espaçamento definido para cada uma das estações foi de 5 metros, de modo que 3 dos 4 perfis sobrepussem as seções elétricas realizadas previamente (Figura 5-5), os piquetes utilizados na aquisição prévia serviram de referência para a sobreposição dos dados.

Foram utilizados dois magnetômetros, um para realizar as medições dos perfis e o segundo utilizado para medir a variação diurna, o qual a amostragem para a correção da variação diurna foi de 1 minuto.

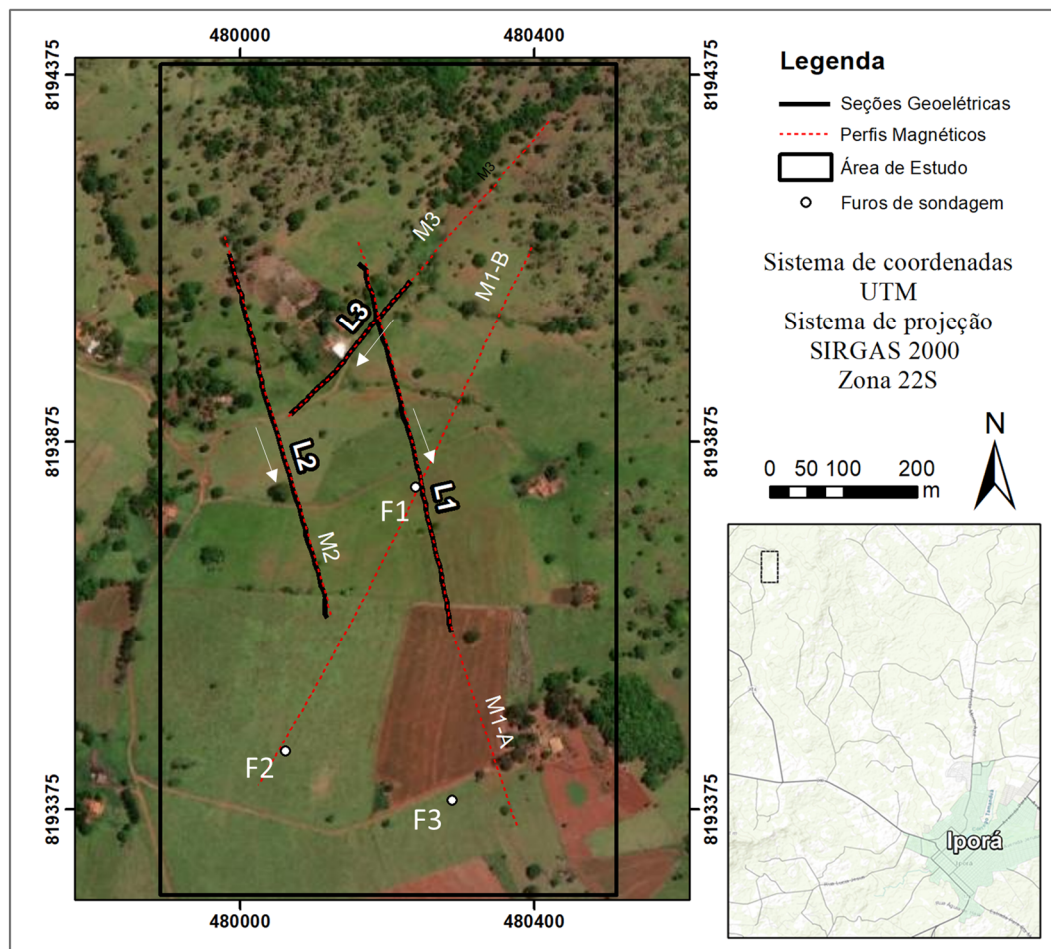


Figura 5-5 Disposição das aquisições das seções geoeletricas e dos perfis magnéticos.

5.3.2 Processamento dos dados

5.3.2.1 Eletorresistividade

O diagrama de blocos com respeito ao processamento dos dados de eletorresistividade consta na Figura 5-6.

Os dados de eletorresistividade nas frequências de 1.25 Hz e 5 Hz, para as seções L1 e L2, e de 0.8 Hz e 5 Hz para a seção L3, foram submetidos a análise quantitativa com o intuito de filtrar possíveis amostras que não refletem o comportamento do meio (*spikes*).

Durante a importação foi aplicado um filtro de range de resistividade com valor mínimo de 0.1 Ohm.m e valor máximo de 10000 Ohm.m.

Em seguida passaram por uma filtragem qualitativa (*Datum points*), realizada com o plot dos valores de resistividade, correlacionados a cada um dos níveis de investigação. Após primeira inversão, foi aplicado o filtro de erro RMS de acordo com o padrão da distribuição normal associada à diferença de adequação dos pontos ao dado adquirido e ao modelo

calculado.

Para realização da inversão dos dados de resistividade foi utilizada a inversão por mínimos quadrados, além da aplicação de um filtro vertical com razão de 1.5. Tendo em vista que a área de estudo consiste uma zona de alteração associada a estruturas geológicas verticalizadas e apresenta contato lateral gradativo, por conta dos níveis de alteração nas encaixantes (Corrêa Neto, 2012).

Os dados foram exportados para realização da integração de dados no *Software Oasis Montaj* da provedora *Segueent*.

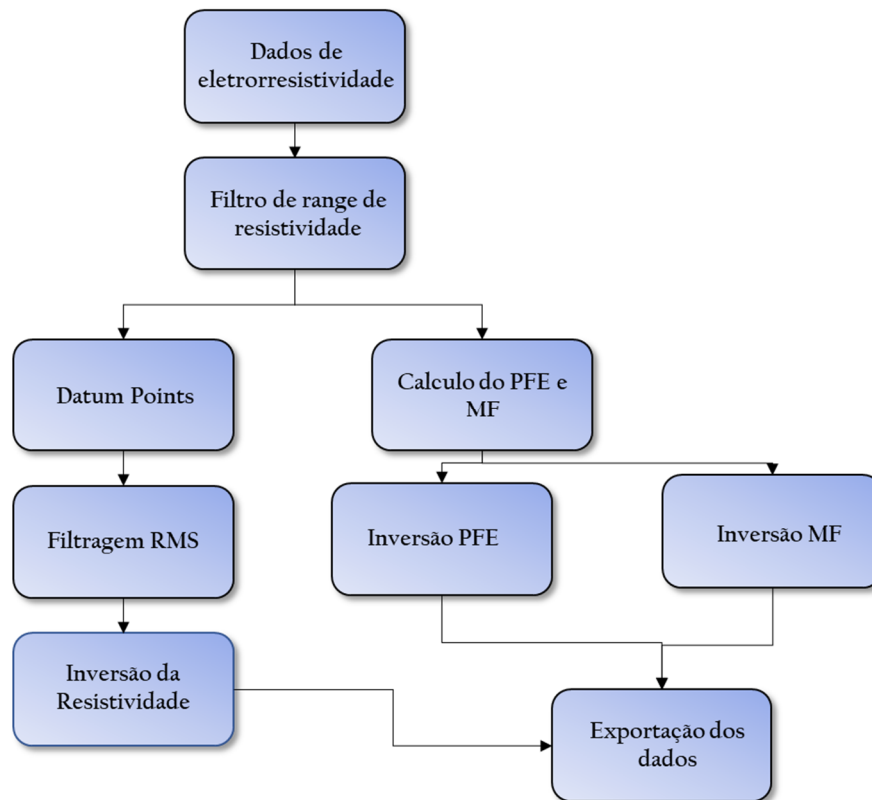


Figura 5-6 Diagrama de blocos do processamento dos dados de resistividade, PFE e MF.

5.3.2.2 PFE e MF

A porcentagem do efeito frequência foi calculada com os dos dados de resistividade com frequências distintas a partir da aplicação da equação (5.1) (Hallof, 1964). Os dados não passaram por outro processo de filtragem além da filtragem de range de resistividade.

$$PFE = 100 \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a1}} \quad (5.1)$$

O efeito frequência é um método de abstração do IP Tempo. Como minerais específicos apresentam frequência de polarização específica, podem ser associados erros altos a este

método.

Para a realização das inversões foi utilizado um filtro vertical com razão de 1.5 similar a resistividade.

Assim como, o PFE o Fator Metal (MF) não passou por mais processos de filtragem, sendo calculado a partir da normalização dos dados de PFE pela frequência baixa, a partir da equação (5.2) (Telford, 1990), a inversão foi realizada com os mesmos parâmetros utilizados para o PFE.

$$MF = \frac{PFE}{\rho_{a0}} 2\pi 10^3 \quad (5.2)$$

5.3.2.3 Magnetometria

Os Perfis magnéticos adquiridos com espaçamento de 5 metros foram exportados e processados, para realizar as análises 1D, 2D e a inversão magnética (VOXI). As etapas de processamento realizadas nos dados estão representadas no fluxo de processamento na Figura 5-7.

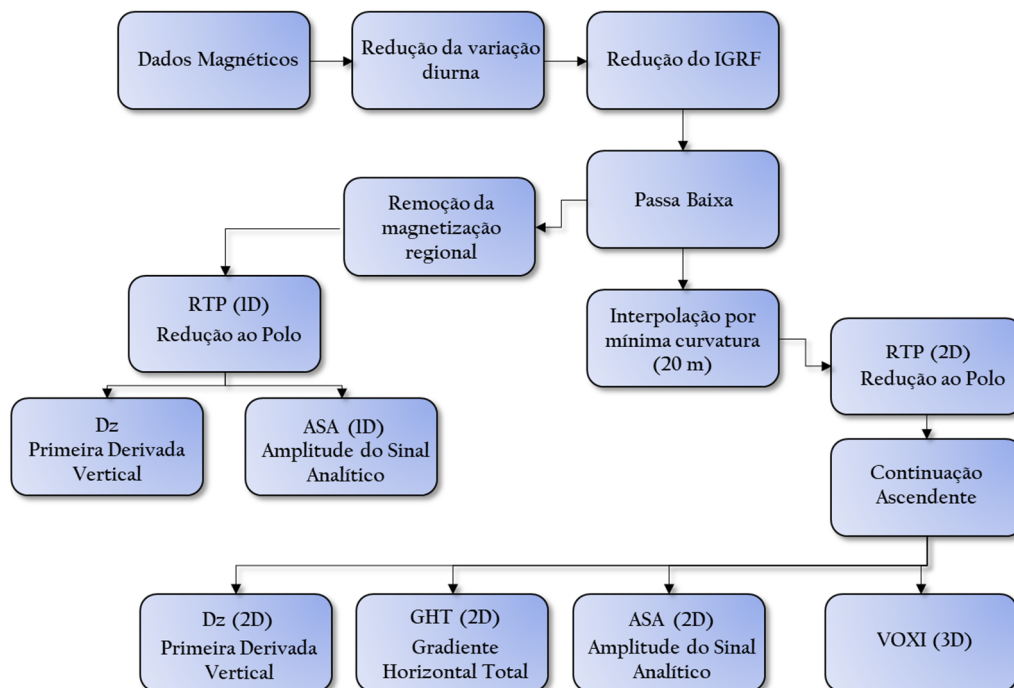


Figura 5-7 Diagrama de blocos do processamento dos dados magnetométricos.

A primeira etapa de processamento consiste nos processos de redução dos dados magnéticos. A variação diurna medida com o magnetômetro base, com amostragem de 1 min, foi retirada dos perfis adquiridos. O Software livre Magmap foi utilizado para realizar a redução da variação diurna.

As demais etapas de processamento foram realizadas no software Oasis Montaj da provedora Sequeent.

Ao dado reduzido da variação diurna aplicou-se a redução do campo geomagnético terrestre (IGRF), tendo como produto o Campo Magnético Total (CMT). Com o intuito de suprimir possíveis dados espúrios foi aplicado um filtro Passa Baixa com comprimento do dobro do espaçamento entre os pontos amostrados (10 m).

Os dados utilizados nas análises 1D e 2D, passaram por diferentes etapas de processamento, com o intuito de evidenciar as anomalias.

5.3.2.4 Perfis Magnéticos

Os perfis magnéticos adquiridos apresentaram grande influência da magnetização regional, causa pela proximidade da área da brecha com a borda do complexo principal, apresentando variações de magnetização crescente, em direção a borda do complexo, caracterizado por um baixo comprimento de onda.

Um filtro residual (Regional) foi aplicado aos dados, a partir da remoção da diferença da regressão linear dos valores do CMT, com relação a distância do início dos perfis (CMT_Residual).

A última redução aplicada aos perfis foi a redução ao polo (RTP), em que se busca recuperar o aspecto de anomalias dipolares para mono-polos, com intuito de diminuir o efeito da inclinação do Campo Magnético Total. Foram aplicados os filtros derivativos, ASA (2D) e Dz, para realização da análise dos perfis.

5.3.2.5 Mapas magnéticos

Por conta da disposição não regular das amostras magnéticas foi utilizado o método de mínima curvatura na interpolação dos dados, o tamanho da cédula utilizada foi de 20 metros.

Após a interpolação dos dados foi aplicado a continuação ascendente à malha, com o objetivo de reduzir possíveis artefatos de alta frequência, resultante do processo de interpolação. Seguindo com aplicação da RTP (CMA), para reduzir os efeitos das anomalias dipolares em planta.

Para a realização da análise 2D o produto da RTP foi submetido a filtros derivativos, para realçar os gradientes apresentados no mapa magnético. Os filtros derivativos utilizados foram a Dz, GHT (Blum, 1999) e o ASA (Li, 2006, Roest et al. 1992). Como os produtos dos filtros aplicados a CMA e a anomalia reduzida ao polo optou-se por utilizar as anomalias reduzidas para a realização das análises.

5.3.2.6 Inversão do Vetor de Indução Magnética

Para a obtenção de um modelo tridimensional das fontes magnéticas o CMA foi utilizado com a aplicação da ferramenta VOXI Earth Modelling, no programa Oasis Montaj, no qual foram extraídas os *slices* em profundidade.

A ferramenta é utilizada para obter um modelo de inversão com base nos vetores de magnetização induzida (MVI – Inversão de susceptibilidade magnética), possibilitando a delimitação de um modelo tridimensional das fontes magnéticas a partir dos dados 2D (MacLeod & Ellis, 2013), na qual foram extraídas as seções na mesma posição do caminhamento elétrico para a realização das interpretações.

A utilização do modelo tridimensional das fontes magnéticas com a integração das seções elétricas pode auxiliar no entendimento da área, assim como na delimitação geométrica dos contatos de alteração. O produto do VOXI utilizado foi o AMP, sendo a amplitude total do vetor de magnetização, o AMP pode ser decomposto em duas componentes, a perpendicular (EPERP) e a componente projetada (EPROJ). As duas componentes são utilizadas para compreender os efeitos da magnetização induzida e da magnetização remanente de alvos em subsuperfície (MacLeod & Ellis, 2013; Coelho, 2021), mas não foram realizadas no presente trabalho.

Para a realização da inversão foi utilizado um modelo de resolução com 25 metros, com valor de cédulas em X, Y e Z de 20, 26 e 13 respectivamente. Quanto aos parâmetros de regularização foi utilizado o método de coeficiente fixo com valor de 400.

5.4 Resultados e análise de dados

5.4.1 Delimitação da zona de Brecha

5.4.1.1 Mapas magnéticos

Com a evidência do furo de sondagem que indica a presença disseminada e maciça de sulfetos, assim como, a presença de magnetita, também observada no complexo máfico alcalino, os mapas magnéticos foram utilizados para realizar a interpretação qualitativa da área, com o intuito de delimitar a área de alcance do processo hidrotermal como primeira etapa de caracterização da brecha.

As anomalias magnéticas reduzidas e não reduzidas ao polo apresentam um alto gradiente magnéticos em direção a intrusão principal (Figura 5-8). Feitoza (2011) descreve a intrusão principal com uma geometria elípticas em que os contatos com a encaixante são delimitados por variações magnéticas de intermediárias a baixas.

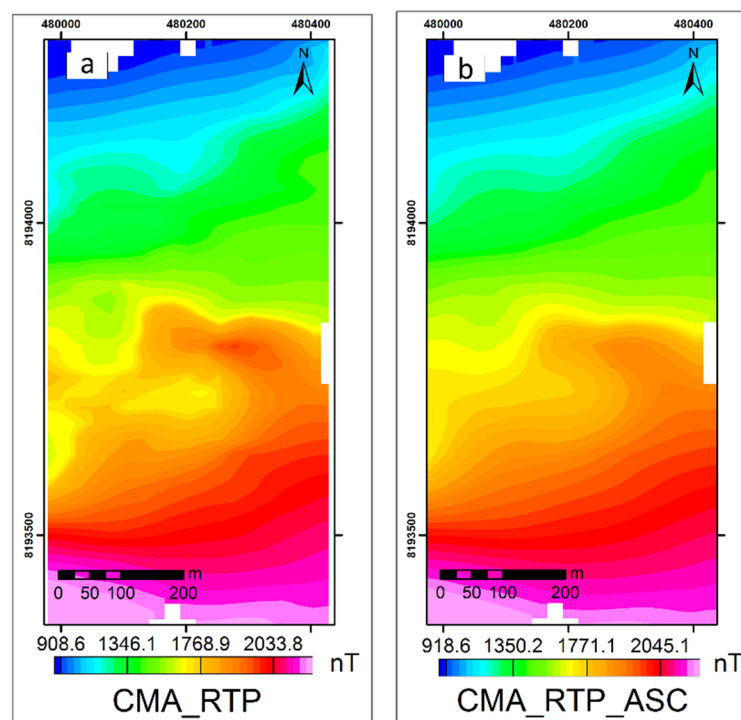


Figura 5-8 (a) Campo Magnético Anômalo. (b) Campo Magnético Anômalo com continuação ascendente (15 m).

Ainda que, não seja identificado visualmente pelas anomalias acredita-se, que assim como a intrusão principal a brecha possua magnetização remanente, de modo que a inversão de

polaridade esperada não seja identificada por conta da contribuição da magnetização do complexo principal.

Para a realização da análise qualitativa e a delimitação da geometria do alvo em planta foram considerados o Gradiente Horizontal Total (GHT), a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), também chamada de Gradiente Total e a primeira derivada vertical (Dz).

A primeira derivada vertical apresentou variações de alta frequência, individualizando as feições, mas apresentando alta correlação aos ruídos de interpolação do dado magnético, além de evidenciar variações próximas as bordas da área, que podem ser considerados possíveis efeitos de borda, ainda que também evidenciem a alta magnetização na parte central. O filtro apresentou baixa regularidade nas anomalias apresentadas dificulta a delimitação de fontes magnéticas contínuas (Figura 5-9 - a).

O Gradiente horizontal total delimitou geometrias coerentes ao gradiente total (ASA), apresentando uma região de alta magnetização na porção central. As estruturas E-W associadas as mesmas direções da zona de maior magnetização não foram suavizadas, entretanto possuem deslocamento com relação as maiores magnetizações observadas nos perfis magnéticos (Figura 5-9 - b).

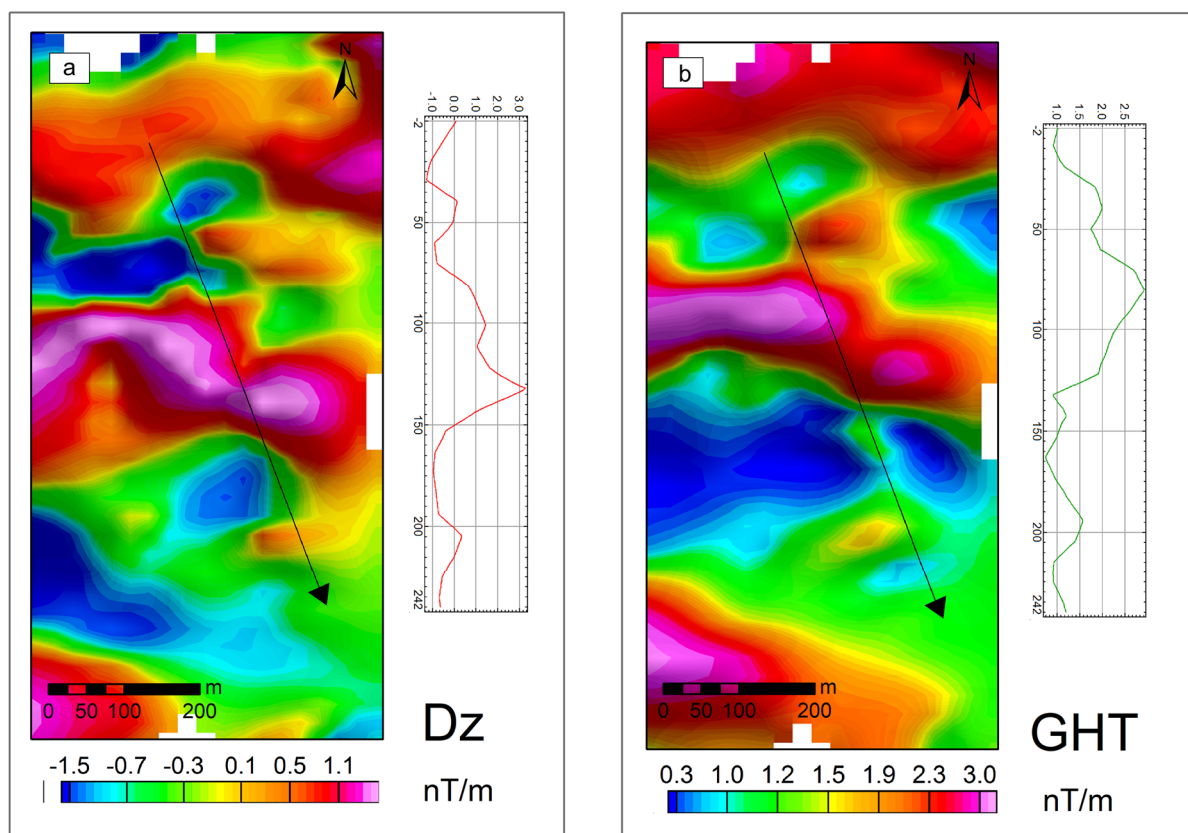


Figura 5-9 (a) Primeira derivada vertical (Dz). (b) Gradiente Horizontal Total (GHT).

O Gradiente Total (ASA) muito utilizado para definir domínios magnéticos por conta da regularização do pacote de frequência com relação a amplitude (Li, 2006), não evidenciou os altos gradiente nas bordas da área de estudo. O produto apresentou uma alta magnetização na porção central, entretanto houve o agrupamento e suavização de possíveis estruturas externas a área de magnetização principal. Ainda assim com a evidência do furo de sondagem, que apresenta litologias brechadas, foi utilizado como indicativo de melhor precisão para definir os limites de magnetização.

A individualização das altas frequências em corpos isolados observado na primeira derivada vertical, também não foi identificada, apresentando um comportamento gradativo da região central para as quebras de valores baixos, com quebras de magnetização suaves nas porções internas a estrutura principal.

As interpretações foram realizadas de forma integrada, porém com peso maior para o Gradiente Total, uma vez que, a anomalia apresentou coerência as altas frequências identificadas, além de preservar possíveis feições estruturais associadas ao eixo principal e apresentar geometria similar para a região de maior magnetização com estruturas coerentes ao GHT (Figura 5-10).

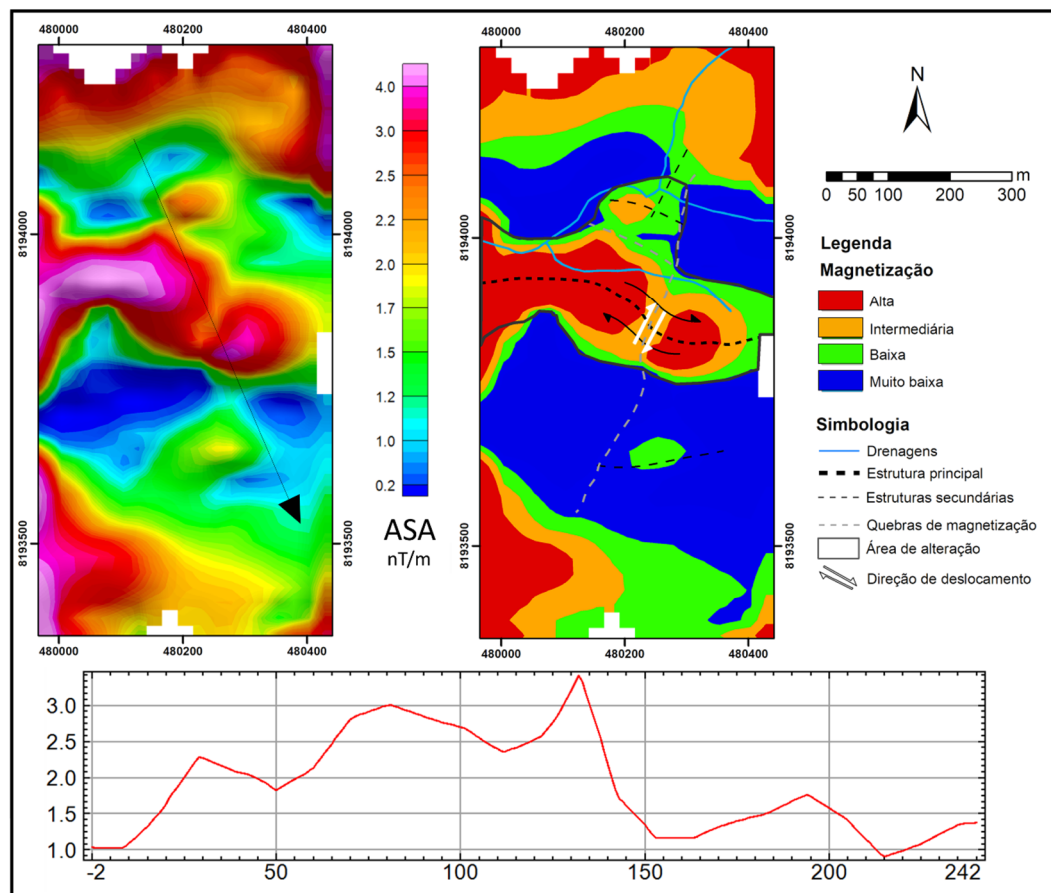


Figura 5-10 Gradiente Total (Amplitude do Sinal Analítico, ASA) com classificação da

magnetização e interpretação dos limites e estruturas associados a brecha.

Na realização da interpretação foi definido o eixo principal da estrutura de magnetização, assim como estruturas secundárias de menor amplitude. Quebras do padrão de magnetização também foram identificadas, apresentando uma feição em destaque associada ao deslocamento do eixo da estrutura alterada.

O eixo principal assim como as estruturas secundárias apresentaram direções com tendências EW e N40°E coerentes as estruturas da área (Feitoza, 2011, Cerqueira, 1996, Martins, 2021), quebras de magnetização também foram identificadas nessas direções, o que pode sugerir a individualização da geometria como fontes magnéticas distintas, ou com conexão em profundidade.

As drenagens presentes na área apresentam coerência as estruturas identificadas com *trends* preferências na mesma direção das estruturas mapeadas (Feitoza, 2011, Cerqueira, 1996, Martins, 2021), o que indica que, ainda que a área seja escassa em afloramentos existe um controle estrutural associados a rede de drenagens.

A presença dos lineamentos com direção EW e N40°E reforçam a hipótese de que a brecha de alteração hidrotermal esteja relacionada ao segundo evento tectônico da área, ou evento posterior.

Os diques são encontrados seccionando as rochas dos Complexos Alcalinos Fazenda Buriti e Diorama, e no Granito Iporá com Direções N80°E, N40°E, NS, caracterizando zonas de fraqueza ocorrentes do alojamento dos complexos (Feitoza, 2011). Porém os diques de diabasito e microsienito descritos por Feitoza (2011) apresentam largura geralmente métrica, diferindo da estrutura de alteração principal que ainda que possua direção similar apresenta largura máxima de aproximadamente 250 metros.

5.4.1.2 Magnetização e resistividade

A comparação entre o mapa da anomalia ASA com as seções de resistividade tem como foco relacionar as variações de resistividade em profundidade às variações laterais observadas no mapa magnético, além de comparar os limites de alteração definidos.

A anomalia magnética foi subdividida de acordo com a amplitude e distribuição em faixas de magnetização alta, magnetização baixa e magnetização intermediária. As faixas definidas como quebras de magnetização possuem comportamento transicional caracterizado pela variação suave para valores menores que as áreas adjacentes e podem representar variações de profundidade da zona de alteração, assim como a interseção por estruturas não magnéticas (Figura 5-11).

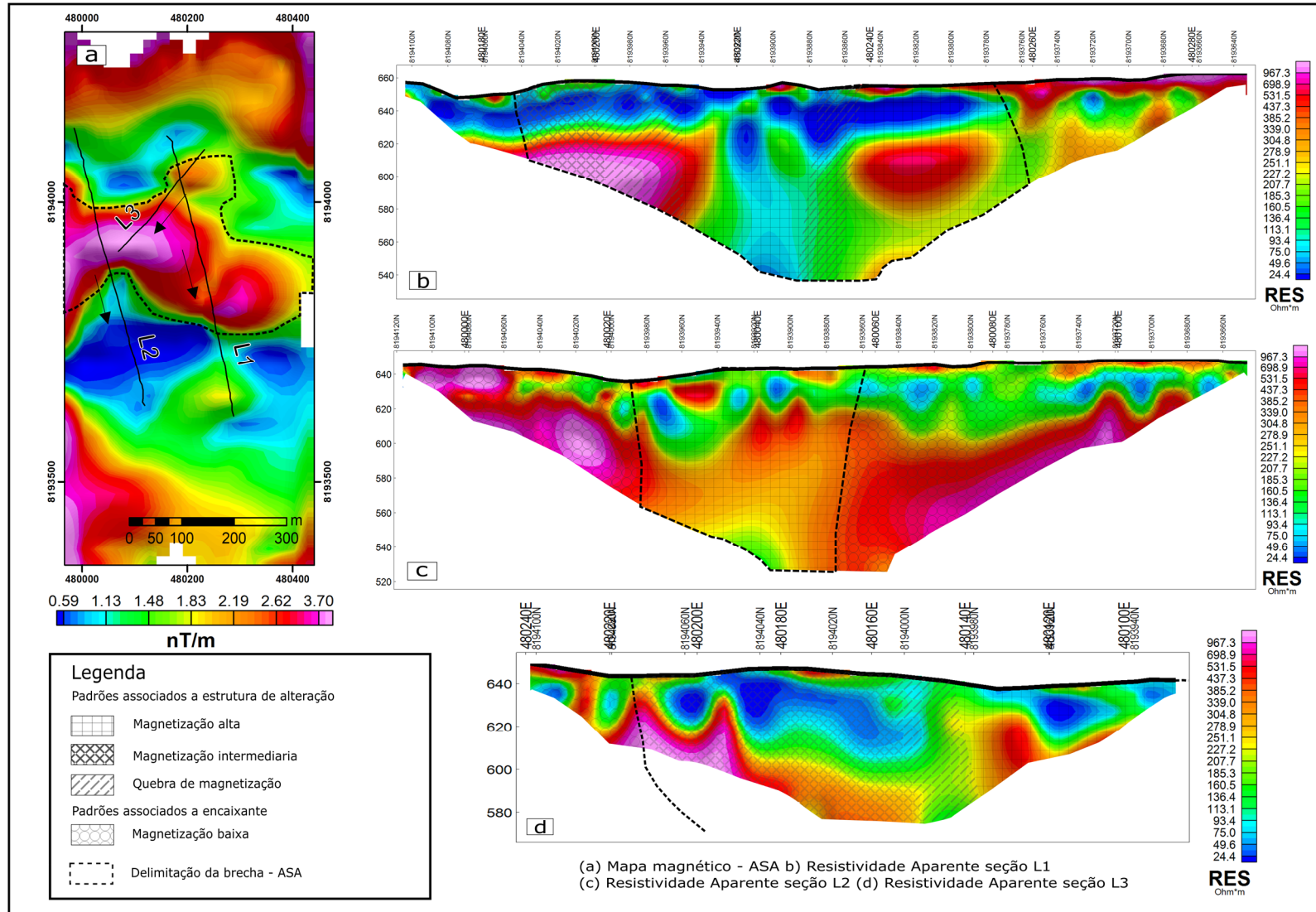


Figura 5-11 Comparação da magnetização e dos limites associados a brecha com os dados de resistividade. (a) Anomalia ASA. (b) Eletroresistividade da seção L1. (c) Eletroresistividade da seção L2. (d) Eletroresistividade da seção L3.

A similaridade dos limites de magnetização com as variações laterais de resistividade reforça a ideia de que a área de alteração ocorra com relação a um eixo central em que a presença de sulfetos disseminados e maciço, assim como a presença de magnetita possibilitem a delimitação da zona de alteração com base na eletrorresistividade e na magnetometria (Alagia, 2018).

A seção L1 é a que apresenta maior interseção com a área delimitada da estrutura. A seção apresenta baixa magnetização nas extremidades e magnetização alta e intermediária na porção central. Os menores valores de resistividade coincidem as regiões que apresentam diminuição da magnetização. A porção com magnetização intermediária e alta apresenta quebra de magnetização na parte central separando regiões com alta e baixa resistividade, de modo que, ainda que a magnetização na seção tenha sido bem definida pelas estruturas condutivas, as estruturas resistivas internas ao limite definido também possuem magnetização.

A seção L2 intersecciona a região de alta amplitude em uma região, que não apresenta deformação da anomalia magnética quando comparada a seção L1. As extremidades da seção apresentam baixa magnetização, enquanto a parte central apresenta limites bem definidos, coerente às principais estruturas condutivas em profundidade.

A seção L3 está localizada na borda da anomalia de maior amplitude, o início da seção apresenta baixos valores de magnetização o final possui alta magnetização. As porções centrais da seção apresentam magnetização intermediária em que a principal feição condutiva em profundidade está localizada em uma faixa de quebra de magnetização, enquanto as anomalias condutivas mais superficiais apresentam magnetização intermediária.

Para as três seções o mapa magnético apresentou coerência para as estruturas em profundidade, sendo que os valores de magnetização altos e intermediários estão associados as principais estruturas condutivas. As baixas magnetizações observadas nas bordas das seções com localização similar as feições resistivas reforçam a ideia de que a rocha encaixante seja composta majoritariamente pelo Granito Iporá que possui baixa magnetização, contudo as porções resistivas de magnetização intermediária a alta pode ser associada a presença de gabros menos alterados, assim como, porções brechadas do Granito Iporá.

5.4.2 Caracterização Geofísica

Para a realização da caracterização da brecha foram utilizados os perfis magnéticos processados e a inversão de suscetibilidade magnética nas mesmas áreas nas quais foram adquiridas as seções geoeletricas.

Os valores de resistividade foram descritos de forma sistemática para cada uma das seções. Os valores de PFE considerados anômalos foram maiores que 28 e os valores de MF considerados anômalos foram maiores que 2000. A suscetibilidade magnética aparente foi subdividida em baixa (-0.0450 a 0.0003 SI), intermediária (0.0003 a 0.1000 SI) e alta (maior que 0.1) de acordo com os resultados da inversão.

5.4.2.1 L1

A seção L1 intercepta a anomalia magnética na região em que a estrutura apresenta a maior largura, a deformação da anomalia apresenta tendência nas direções NE-SW similar a quebra de magnetização que corta a estrutura principal e delimita o deslocamento dos maiores valores de magnetização na mesma direção da deformação (Figura 5-12).

O perfil magnético da seção apresenta padrões de baixa magnetização nas bordas, enquanto são delimitadas estruturas com magnetização intermediária e alta na porção central, os filtros ASA e Dz apresentam coerência por delimitar de maneira aproximada as mesmas estruturas, entretanto a derivada vertical realça as variações associadas às altas frequências sugerindo quebras de magnetização em feições agrupadas no ASA.

A inversão de suscetibilidade magnética aparente possibilita a visualização da distribuição de fontes magnéticas em profundidade, diferenciando estruturas com baixa e alta magnetização além de evidenciar possíveis conexões à estrutura de magnetização principal.

Assim como esperado a seção apresenta baixos valores de suscetibilidade nas extremidades, associadas a encaixante, entre a distância de 200 m a 390 m é observado uma anomalia de alta suscetibilidade que delimita a estrutura principal associada a alteração hidrotermal, valores intermediários de suscetibilidade também são observados entre as distâncias de 100 a 170 metros com conexão em profundidade com a estrutura de maior suscetibilidade magnética. A suscetibilidade intermediária próxima à estrutura principal com conectividade em profundidade sugere estruturas de percolação secundárias.

Quanto a distribuição de resistividade na pseudoseção é possível observar a diferenciação de unidades geoeletricas com contraste vertical e horizontal sendo a seção L1 a que apresentou maior complexidade das estruturas resistivas.

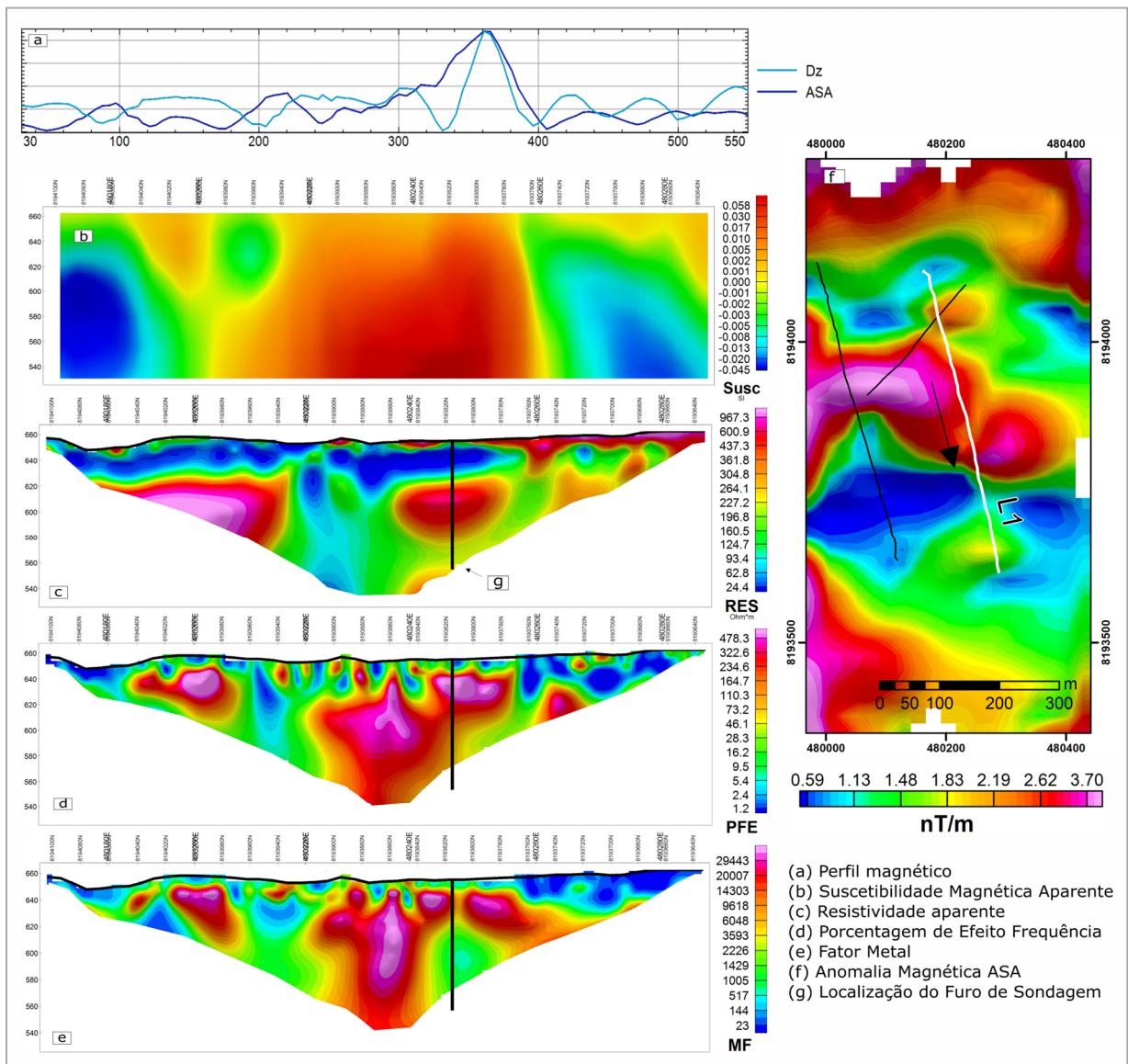


Figura 5-12 Seção L1. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c) Eletrorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA (g) Furo de Sondagem F1 (Figura 5-13).

A seção apresenta uma camada superficial, que se estende desde o início da seção até a distância de 400 metros, apresentando espessura contínua com profundidade máxima de até 620 metros, sendo a unidade mais condutiva identificada com resistividades menores que 50 Ohm.m.

A região de maior resistividade é apresentada na porção esquerda da seção com profundidade abaixo de 610 metros, observada até a distância de 210 metros, os valores de resistividade na unidade são maiores que 300 Ohm.m.

A principal estrutural vertical condutiva é observada entre a distância 210 m e 300 metros, seu limite superior é definido pela camada condutiva mais superficial (620 metros) e é observada até o limite inferior da seção apresentando valores de resistividade entre 30 Ohm.m

e 210 Ohm.m.

Ao lado da principal estrutura condutiva, a área com limites superior e inferior similares a unidade anterior, porém ocorrendo entre as distâncias de 300 a 400 metros é delimitada por uma feição circular resistiva na parte central que apresenta valores de resistividade máximos de 550 Ohm.m, as porções externas à estrutura circular são caracterizadas por um gradiente condutivo de resistividade que possui valores entre 110 Ohm.m a 250 Ohm.m.

A região da seção a partir da distância de 400 metros até o final da seção apresenta alta resistividade até 640 metros de profundidade com resistividade maior que 340 Ohm.m enquanto a porção inferior a mesma unidade apresenta resistividade intermediária entre 90 Ohm.m a 300 Ohm.m.

A Porcentagem do Efeito Frequência é relacionada principalmente as regiões que apresentam maior cargabilidade. A seção apresentou duas anomalias de alto PFE, a primeira de menor magnitude foi observada em uma região de borda, entre as distancias de 100 a 180 metros, enquanto a segunda anomalia foi identificada entre as distancias de 230 a 390 metros.

O Fator Metal por sua vez apresenta a relação de alta cargabilidade com a resposta condutiva do meio e evidencia regiões com alta cargabilidade e baixa resistividade, que podem estar associadas às concentrações de minerais metálicos (Telford, 1964).

As anomalias identificadas foram similares em localização quando comparadas as anomalias de PFE, entretanto a principal diferença é o baixo valor de MF na distância de 340 metros, que pode ser resultado da feição de alta resistividade com localização aproximada aos baixos valores.

As anomalias de alta suscetibilidade magnética, as principais estruturas condutivas, as anomalias de alto PFE e Alto MF foram identificadas nas mesmas faixas de distância apresentando geometria similar, de modo que a limitação da profundidade de investigação não possibilitou o reconhecimento da conexão da menor anomalia de PFE à estrutura principal, porem essa estrutura pode ser identificada na inversão de susceptibilidade magnética.

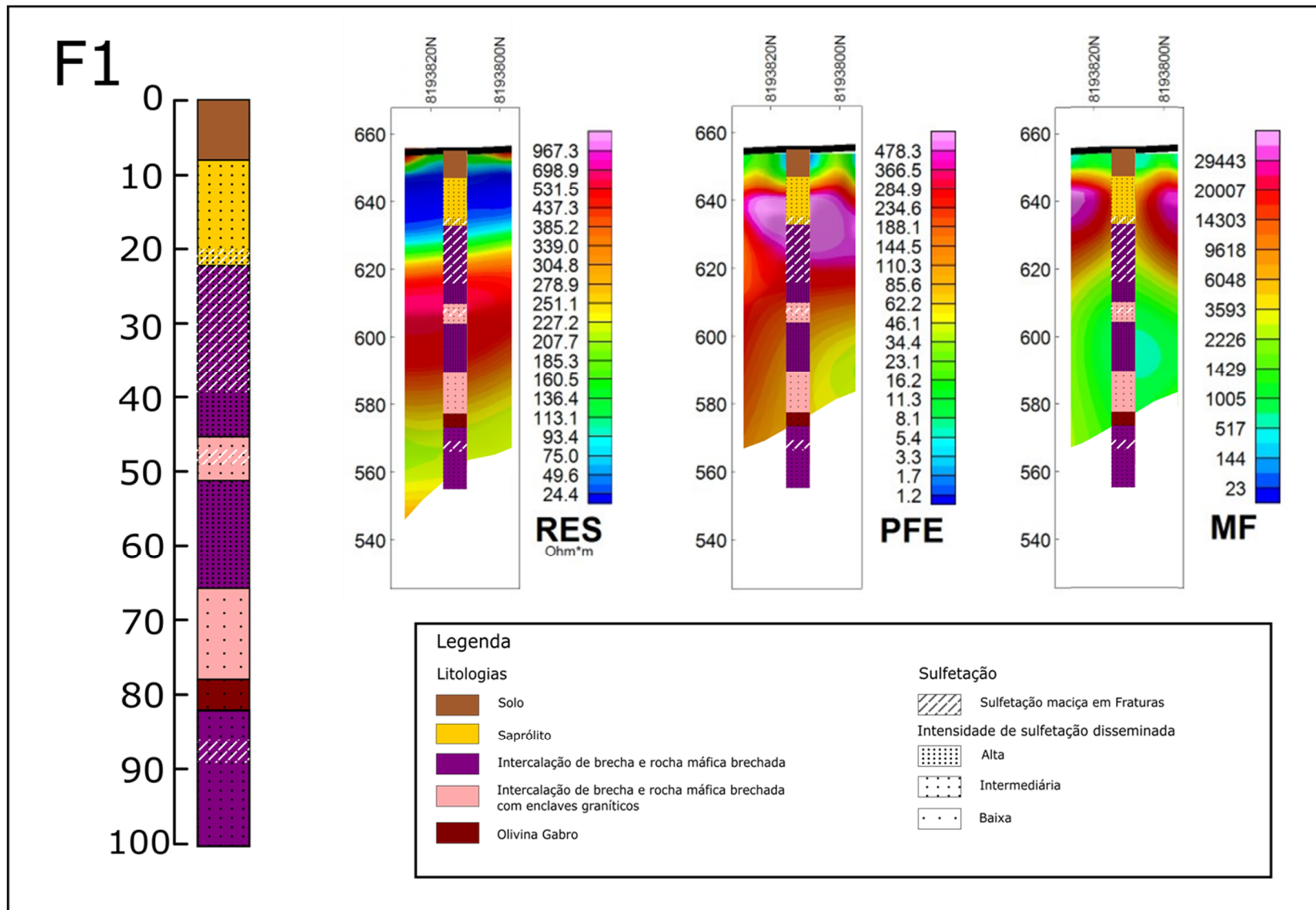


Figura 5-13 Furo de sondagem F1 com sobreposição aos dados elétricos.

5.4.2.2 Furo de sondagem

O furo de sondagem localizado na seção, possibilitou a comparação dos dados indiretos à amostragem direta, de modo que foram realizadas associações às sulfetações, litologias e alteração.

A sondagem possui uma profundidade máxima de 100 metros, com disposição vertical.

O furo apresenta uma faixa superficial de solo, seguida pelo saprólito com indicativos de alta alteração, as litologias nas porções inferiores são compostas por variações de regiões brechadas identificadas pela textura afanítica com inclusões de blocos máficos e granitoides (Figura 5-13), a alteração ocorre de forma heterogênea, de modo que são observadas faixas com intercalação de brecha, gabro e enclaves graníticos. As litologias apresentam pirita, pirrotita e calcopirita disseminada, e são identificadas regiões de maior e menor sulfetação proporcional a intensidade da alteração hidrotermal e de estruturas rúpteis.

As litologias apresentam diversos processos de alteração sendo os principais processos descritos por carbonatação, seritização, cloritização e silicificação.

Os altos valores de fósforo discriminados na geoquímica do furo sugerem a filiação alcalina enquanto os altos valores de terras raras leves sugerem o enriquecimento dos fluidos hidrotermais com os granitoides encaixantes (sienitos, sieno-granitos, monzogranitos, monzodioritos; Lorena, 2011) como fonte do metassomatismo (Ribeiro, 2008).

A camada de baixa resistividade próximo à superfície apresenta correspondência ao perfil de solo sendo delimitada principalmente entre as porções com solo e saprólito de 0 a 20 metros, entre 20 a 40 metros a brecha é a principal feição, identificada com altos nível de fraturamento e textura afanítica com baixa correspondência a rocha encaixante.

Os níveis inferiores são descritos como intercalações entre a associação máfica e brecha. São observados enclaves graníticos principalmente entre as distâncias de 45 e 78 metros de profundidade o que pode corresponder a feição resistiva interna a área delimitada como zona de alteração. As porções inferiores são descritas como porções constituídas por alternâncias entre zonas brechadas e o gabro menos alterado caracterizado pela resposta de resistividade gradativa do centro da anomalia resistiva para as bordas.

O furo apresenta magnetita em quase todas as litologias com porções menos magnéticas no solo, provável resultado de oxidação. Ainda assim, acreditasse que as maiores respostas magnéticas associadas a estruturas da brecha sejam representadas pelas variações de gabro o que corresponde à resposta de magnetização heterogênea da estrutura principal.

A ocorrência de sulfetos disseminados é observada tanto na brecha quanto nas encaixantes. O furo está localizado na borda da maior anomalia de PFE sendo representativo

quanto a resposta de cargabilidade.

A região de maior sulfetação é identificada nas faixas dos primeiros 40 metros de profundidade, que apresentam as regiões de maior fraturamento e ocorrência de sulfeto maciço, de modo que o furo intercepta a anomalia de alto MF nas porções superiores. onde também são identificadas as maiores concentrações de Mg, Fe, Ni, Cu e Ti. Enquanto a anomalia de baixo MF é coincidente às regiões menos alteradas com presença de enclaves da rocha encaixante, associações máficas brechadas com sulfetação disseminada e ocorrência de vênulas mineralizadas.

A seção L1 foi subdividida em blocos de acordo com as respostas geofísicas para a realização da estatística simples, que foram utilizadas com auxílio da descrição geológica para a confecção de um modelo geológico simplificado. Os valores da estatística foram utilizados para diferenciar feições internas e externas aos blocos (Figura 5-14).

Os dados de Condutividade, PFE e FM foram dispostos em escala RGB (Condutividade, PFE, MF), com intuito de ilustrar a relação com as medidas, que representem mineralizações e facilitar a visualização dos dados.

Os resultados obtidos foram utilizados como base para a realização da interpretação das demais seções por ser a única que apresenta correlação com amostragem direta.

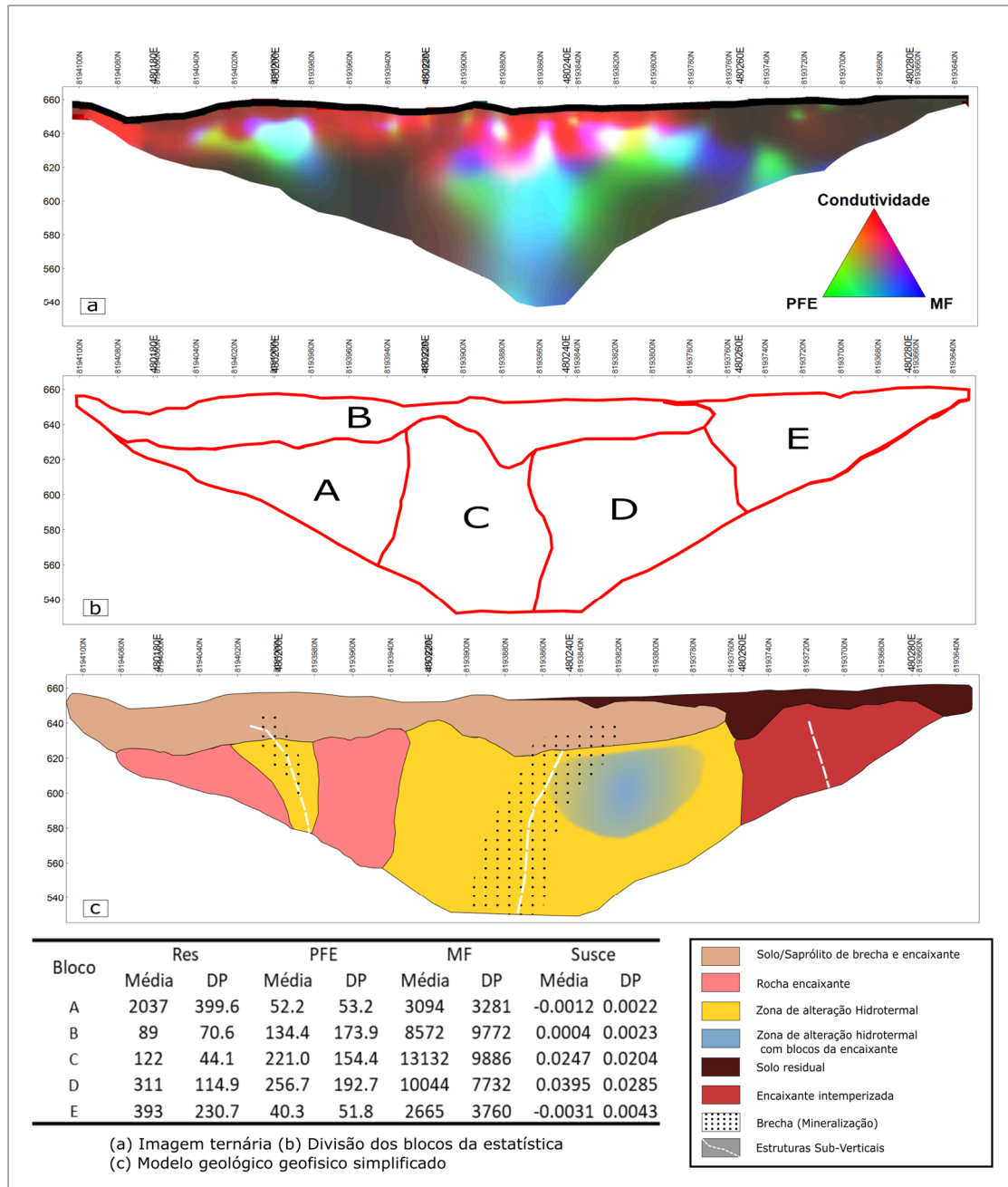


Figura 5-14 Interpretação e modelo simplificado da seção L1. (a) Imagem Ternaria RGB (Conductividade, PFE, MF). (b) Divisão de blocos da estatística. (c) Modelo geológico simplificado.

5.4.2.3 L2

A seção L2 intercepta a anomalia magnética em uma porção que não apresenta deformação, apenas com direção E-W (

Figura 5-15).

Os perfis magnéticos apresentaram alta amplitude entre as distâncias de 180 e 300 metros, de modo que o restante do perfil apresenta baixa magnetização, com variação do padrão das duas extremidades decorrente principalmente da variação de profundidade do solo e do saprólito.

A anomalia positiva de suscetibilidade magnética foi observada na mesma região das maiores amplitudes observadas nos perfis. Já quanto ao restante da seção, a porção esquerda apresentou valores maiores de suscetibilidade com relação a porção direita.

As feições geolétricas foram identificadas como similares às da seção L1, porem com variações nos valores e na geometria das anomalias.

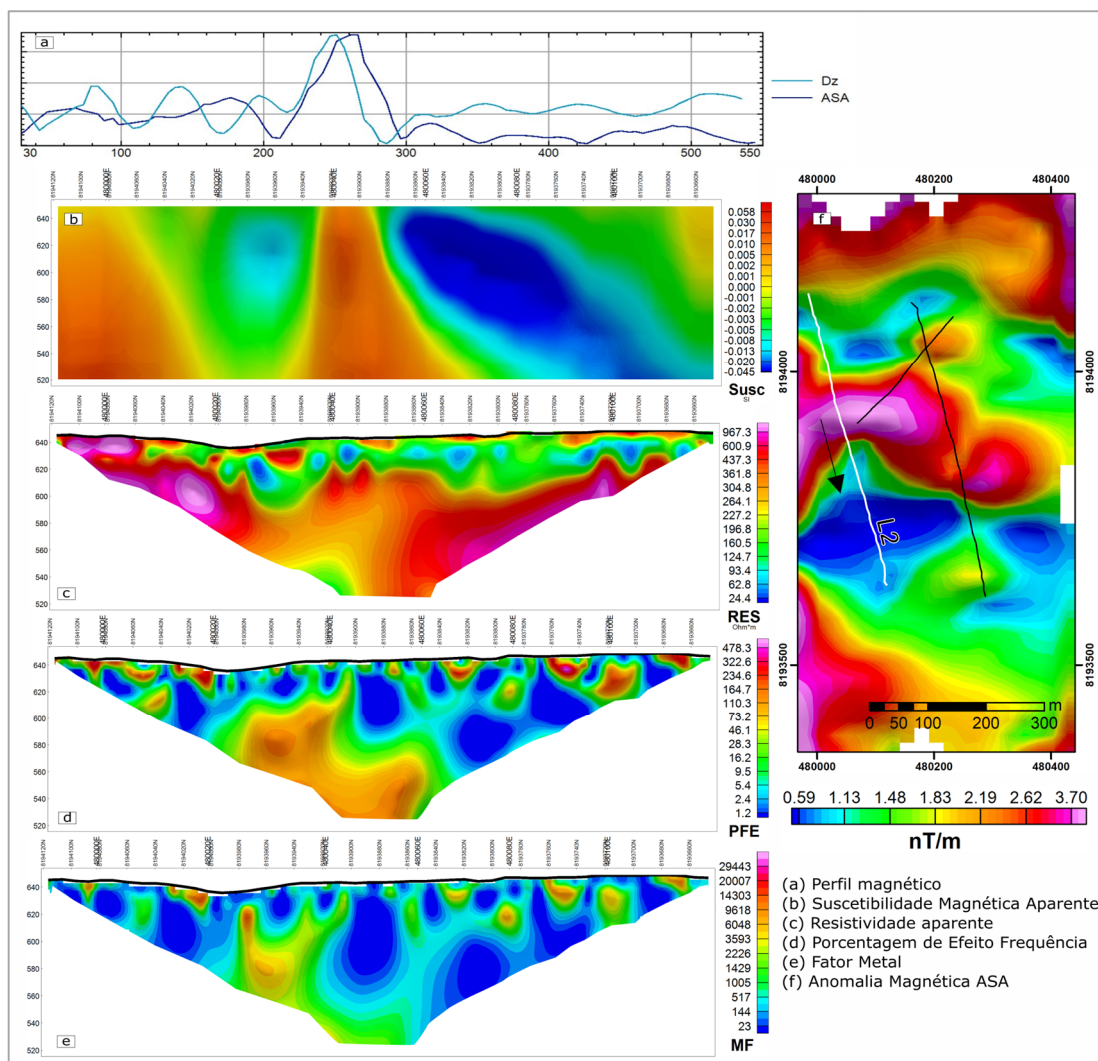


Figura 5-15 Seção L2. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c)

Eletrorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA.

A camada superficial composta pelo solo de brecha e encaixante foi identificado entre a distância de 105 até o final da seção, com profundidade de até 610 metros, e com valores de resistividade entre 20 e 160 Ohm.m.

A feição resistiva na parte esquerda, até 620 metros de profundidade, com valores maiores que 350 Ohm.m é uma provável resposta do saprólito de granito de modo que durante as aquisições foram observados blocos de granitoides de grandes dimensões (diâmetro maior que 5 metros).

As feições resistivas identificadas nas bordas inferiores da seção, são representantes da rocha encaixante, resistividade maior que 350 Ohm.m, caracterizadas também pela baixa magnetização. As diferenças de profundidade assim como fraturas superficiais podem resultar na variação do padrão de frequência das anomalias magnéticas apresentadas nas porções encaixantes.

As estruturas condutivas em profundidade são observadas entre as distâncias de 180 e 300 metros com limite superior 610 metros de profundidade. A área da brecha possui menor resistividade que a região que apresenta menor alteração, com a individualização da resposta elétrica em dois condutos de menor resistividade, entre 130 e 320 Ohm.m com uma feição resistiva interna, que pode ser resultado da presença de blocos da rocha encaixante ou porções da associação máfica menos alterada com resistividade média de 320 Ohm.m.

O PFE apresentou anomalia com valores intermediários a partir da profundidade de 620 metros, entre as distâncias de 170 e 260 metros, aumentando sua espessura em profundidade.

O MF apresentou anomalia intermediária com disposição similar a anomalia de PFE, entretanto com valores menores quando comparada a seção L1 o que pode indicar a variação da geometria e da magnitude das estruturas associadas as mineralizações, além de apresentar maiores resistividades.

5.4.2.4 L3

A seção L3 está localizada na borda da anomalia magnética com disposição oblíqua a deformação e intercepta a seção L1 na extremidade esquerda (Figura 5-16). Essa foi a menor seção realizada, com a menor profundidade de investigação.

Nos perfis magnéticos são identificadas duas anomalias de alta amplitude associadas a brecha, enquanto as quebras observadas na primeira derivada diferenciam as estruturas.

Foram observados baixos valores de suscetibilidade no limite esquerdo da seção, valores intermediários da parte central, interposto com os valores altos por uma região com baixos

valores de susceptibilidade aparente.

As respostas resistivas são similares as demais seções, com uma feição de baixo resistivo menor 180 Ohm.m superficial associada ao solo e saprólito de brecha e encaixante, em que maior profundidade da anomalia foi até 610 metros.

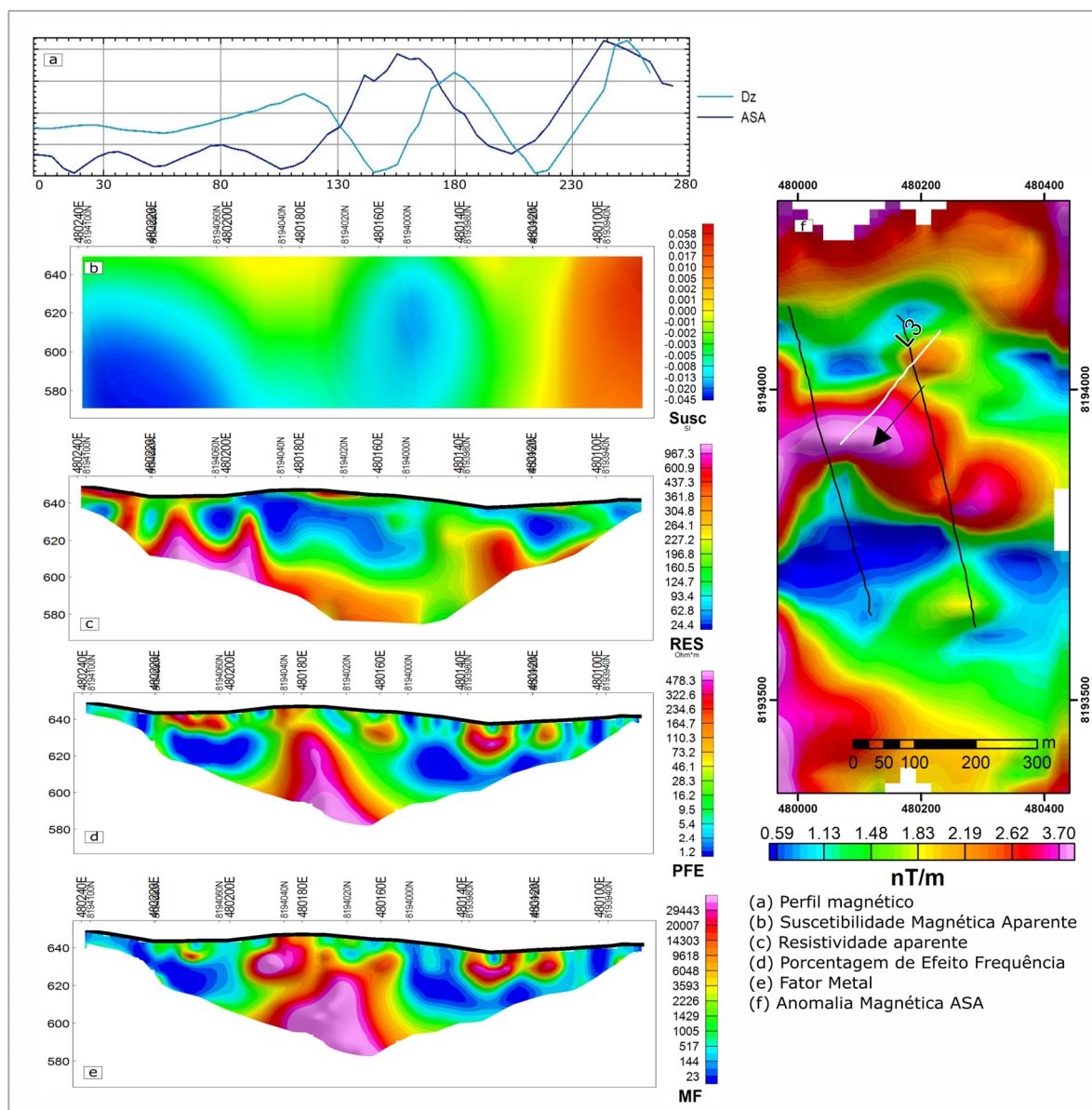


Figura 5-16 Seção L3. (a) Perfil magnético. (b) Susceptibilidade aparente. (c) Eletorresistividade. (d) PFE. (e) MF. (f) ASA.

As feições condutivas principais estão localizadas entre as distâncias de 100 e 180 metros, a região de menor resistividade é superposta à uma feição de resistividade intermediária entre 180 e 360 Ohm.m.

Duas feições resistivas são apresentadas nas regiões de borda, uma na porção esquerda com resistividade maior que 360 Ohm.m, associada a rocha encaixante e outra com

resistividade entre 180 e 600 Ohm.m associada a blocos da encaixante alterados.

As anomalias de PFE e MF foram identificadas na região de susceptibilidade intermediária, localizadas nas mesmas regiões das anomalias mais evidentes de condutividade. As feições apresentadas são muito similares as respostas observadas na anomalia de pequeno porte da seção L1, de modo que apresentam magnetização intermediária e são condutivas, sendo provavelmente mineralizadas como estruturas secundárias.

Com as interpretações das seções e as observações realizadas em campo foi obtido um modelo geológico-geofísico simplificado levando em consideração o domínio das encaixantes não alteradas e os limites da brecha e da associação máfica alcalina brechada (Figura 5-17).

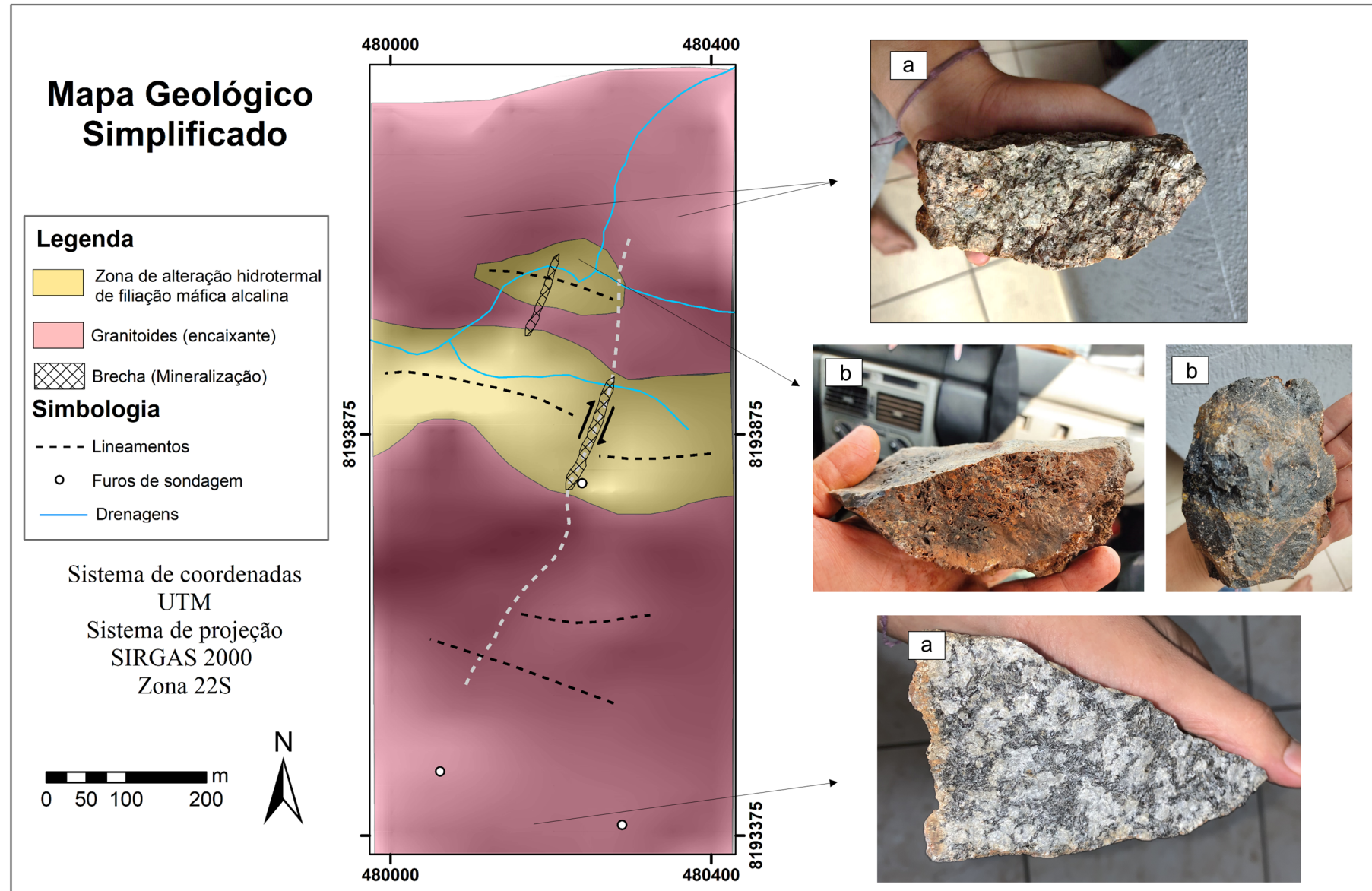


Figura 5-17 Mapa geológico simplificado. (a) Granitoides da encaixante. (b) Associação máfica hidrotermalizada.

5.5 Conclusão

O presente trabalho consistiu na delimitação da estrutura associada ao processo de alteração hidrotermal, assim como a caracterização geofísica com base na magnetometria e nos métodos geoeletricos.

A estrutura principal apresenta magnetização enquanto a encaixante apresenta baixa magnetização, de modo que foi identificada uma anomalia de alta amplitude na porção central da área, definida como a estrutura principal associada a brecha, com direção EW.

O filtro que melhor delimitou a zona de alteração em mapa foi o ASA, por apresentar correlação as altas amplitudes, em que foi possível identificar estruturas secundárias e lineamentos definidos como quebras de magnetização suaves, internas e externas a brecha.

As estruturas apresentaram direções EW e N40E, de modo que o alargamento e deslocamento da estrutura principal evidenciam tendências de deformação na direção N40°E no local da seção L1. Os lineamentos apresentam coerência aos diques que intrudem o complexo principal e as rochas encaixantes, assim como os lineamentos regionais.

A Magnetometria e a Eletrorresistividade se mostram eficazes para delimitar a zona de alteração hidrotermal, uma vez que as principais estruturas verticais condutivas apresentaram coerências as variações magnéticas, além de evidenciar a continuidade da estrutura em profundidade. Ainda assim a magnetização é heterogênea, de modo que as maiores magnetizações podem estar associadas a gabros menos alterados que ocorrem de forma conjunta a estrutura principal.

Quanto a caracterização geofísica os filtros 1D foram eficazes em delimitar estruturas individualizadas e agrupadas, além de evidenciar a diferença de amplitude da estrutura central e a encaixante.

Na inversão de suscetibilidade magnética foi possível observar a conexão de uma estrutura secundária à principal, que não foi identificada nos dados geoeletricos provavelmente por conta da limitação da geometria de investigação em profundidade. A Zona de brecha apresenta valores de suscetibilidade de intermediários a altos.

A estrutura alterada apresenta resposta condutiva e magnética em que porções mais resistivas podem ser associadas a blocos de granitoides e a ocorrência de rochas máficas menos alteradas.

As anomalias de PFE e MF apresentaram similaridade. As diferenças principais na geometria são resultado da diferença de regiões que apresentam alta cargabilidade e alta resistividade, de modo que as duas apresentem correspondência a magnetização, entretanto o

MF evidência as estruturas condutivas.

O furo de sondagem indica, que as porções menos alteradas apresentam maior resistividade, ainda que estejam sobre influência da alteração hidrotermal, em que a ocorrência de sulfetos e magnetita são observadas de forma disseminada nos halos de alteração, correspondendo aos altos valores de PFE e Suscetibilidade magnética aparente. Enquanto a anomalia de MF apresentou melhor correspondência a intensidade da alteração em que as zonas anômalas de sulfeto maciço associadas as estruturas rúpteis apresentam alto MF.

A comparação das seções com o mapa magnético sugere, que as estruturas mineralizadas estejam associadas às feições rúpteis na direção N40°E evidenciadas pela variação de espessura e disposição da anomalia magnética, conforme o lineamento que intercepta a estrutura principal, e pelas diferenças dos valores de resistividade, MF, PFE e as estruturas verticais quando comparadas as seções L1 e L3 à seção L2, que apresenta maiores valores de resistividade e menores valores de PFE e MF, além de uma anomalia magnética bem definida.

O modelo geológico simplificado é constituído pelas porções não alteradas da encaixante, a zona de alteração principal composta pelas associações máficas alteradas podendo apresentar inclusões de blocos da encaixante e a ocorrência da brecha mineralizada.

5.6 Referências

- Alagia, M. C. S. (2018). Polarização induzida no domínio da frequência associada a integração de dados multifonte na prospecção de zona mineralizada no Greenstone Belt Faina, Goiás.
- Coelho, D. M. (2021). Análise Geológico-Geofísica do sistema hidrotermal pórfiro do Arco Magmático Arenópolis.
- Corrêa Neto, A. V., Modesto de Almeida, A., Caputo Neto, V., & Campos Guerrero, J. (2012). Alteração Hidrotermal em Zona de Cisalhamento Associada ao Lineamento Congonhas, Sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Anuário do Instituto de Geociências.
- Curto, J. B., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Blakely, R. J., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2014). The tectonic evolution of the Transbrasiliano Lineament in northern Paraná Basin, Brazil, as inferred from aeromagnetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1544-1562.
- Danni, J.C.M. (1974). *Geologie des complexes ultrabasiques alcalins de la region d'Iporá, Goiás (Bresil)*. Thèse, Université Sud – Centre d'Orsay, Paris, 101 p.
- Danni, J.C.M. (1978). Magmatic differentiation of the alkaline ultrabasic intrusions of the Iporá region, southwest Goiás, Brazil. In: *International Symposium on Carbonatites*, 1, p.149-167.
- Ellis, R., & MacLeod, I. (2013). Constrained voxel inversion using the Cartesian cut cell method. *ASEG Extended Abstracts*, 2013(1), 1-4.
- FEITOZA, Lorena Malta et al. Comportamento Magnetométrico Das Alcalinas Do Complexo Da Fazenda Buriti, Região De Iporá-Go. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. p. cp-197-00185.
- Hallof, P. G. (1964). A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. *Geophysics*, 29(3), 425-433.
- Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), L13-L16.

LOKE, Meng Heng. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2004.

Martins, E. D. S. F. (2021). Contribuição geofísica à análise do arcabouço tectônico na Província Alcalina de Goiás.

Münch, U., Blum, N., & Halbach, P. (1999). Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the MESO zone, Central Indian Ridge. *Chemical geology*, 155(1-2), 29-44.

PIMENTEL, M. M., FUCK, R. A., Cordani, U. G., & Kawashita, K. (1985). Geocronologia de rochas graníticas e gnáissicas da região de Arenópolis-Piranhas, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(1), 3-8.

Reynolds, J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. England: John Wiley & Sons Ltd.

Ribeiro, C. C. (2008). Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO

RIBEIRO, F.B.; MOLINA, F.B. Geofísica: uma breve introdução. São Paulo: USP, 2018.

Rodrigues, J. B. (1996). Geocronologia e geoquímica da seqüência vulcano-sedimentar de Iporá e rochas graníticas associadas.

TELFORD, W. M. et al. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 2ed.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho consistiu na delimitação da estrutura associada ao processo de alteração hidrotermal, assim como a caracterização geofísica da brecha com base na magnetometria e nos métodos geoeletricos.

A estrutura principal apresenta magnetização enquanto a encaixante apresenta baixa magnetização, de modo que foi identificada uma anomalia de alta amplitude na porção central da área, definida como a estrutura principal associada a brecha com direção EW.

O filtro que melhor delimitou a zona de alteração em mapa foi o ASA, por apresentar correlação as altas amplitudes, em que foi possível identificar estruturas secundarias e lineamentos definidos como quebras de magnetização suaves, internas e externas a brecha.

As estruturas apresentaram direções EW e N40E, de modo que o alargamento e deslocamento da estrutura principal evidenciam tendências de deformação na direção N40E no local da seção L1. Os lineamentos apresentam coerência aos diques que intrudem o complexo principal e as rochas encaixantes, assim como os lineamentos regionais.

A Magnetometria e a Eletrorresistividade se mostram eficazes para delimitar a zona de brecha, uma vez que as principais estruturas verticais condutivas apresentaram coerências as variações magnéticas, além de evidenciar a continuidade da estrutura em profundidade. Ainda assim a magnetização da brecha é heterogênea, de modo que as maiores magnetizações podem estar associadas a gabros menos alterados que ocorrem de forma conjunta a estrutura principal.

Quanto a caracterização geofísica os filtros 1D foram eficazes em delimitar estruturas individualizadas e agrupadas, além de evidenciar a diferença de amplitude da estrutura central e a encaixante.

Na inversão de suscetibilidade magnética foi possível observar a conexão de uma estrutura secundária à principal, que não foi identificada nos dados geoeletricos provavelmente por conta da limitação da geometria de investigação em profundidade. A Zona de brecha apresenta valores de suscetibilidade de intermediários a altos.

A zona de alteração apresenta resposta condutiva e magnética em que porções mais resistivas podem ser associadas a blocos de granitoides e a ocorrência de rochas máficas menos alteradas.

As anomalias de PFE e MF apresentaram similaridade. As diferenças principais na geometria são resultado da diferença de regiões que apresentam alta cargabilidade e alta resistividade, de modo que as duas apresentem correspondência a magnetização, entretanto o MF evidência melhor as estruturas condutivas.

O furo de sondagem indica que as porções menos alteradas apresentam maior resistividade, ainda que estejam sobre influência da alteração hidrotermal em que a ocorrência de sulfetos e magnetita são observadas de forma disseminada nos halos de alteração, correspondendo aos altos valores de PFE e Suscetibilidade magnética aparente, enquanto a anomalia de MF apresentou melhor correspondência a intensidade da alteração em que as zonas anômalas de sulfeto maciço associadas as estruturas rúpteis apresentem alto MF.

A comparação das seções com o mapa magnético sugere ainda que, as estruturas mineralizadas estejam associadas às regiões deformadas na direção N40E evidenciadas pela variação de espessura e disposição da anomalia magnética, conforme o lineamento que intercepta a estrutura principal, e pelas diferenças dos valores de resistividade, MF, PFE e as estruturas verticais quando comparadas as seções L1 e L3 à seção L2, que apresenta maiores valores de resistividade e menores valores de PFE e MF, além de uma anomalia magnética bem definida.

Os dados da sondagem foram analisados de forma integrada aos dados geofísicos, a subdivisão em blocos da seção e as observações em campo para a confecção de um modelo geológico simplificado, constituído pela formação de solo e saprólito de brecha e encaixante, as porções não alteradas da encaixante a zona de brecha composta pela própria brecha e associações máficas alteradas podendo apresentar inclusões de blocos da encaixante.

Ainda assim, como a gênese da brecha é pouco conhecida indica-se a realização de furos de sondagem em áreas estratégicas com o intuito de discriminar e reforçar os comportamentos físicos associados a assinatura geofísica, diferenciando os padrões por unidade geológica e intensidade do processo de alteração hidrotermal, como por exemplo os valores de MF pois estruturas com associação máficas e percolação de água também seriam anômalas.

O IP frequência apresentou coerências regiões magnetizadas, porém a realização do teste de frequência para entender como o meio se polariza em diferenças faixas de frequência poderia contribuir para o estudo da estrutura, assim como a utilização do IP no domínio do tempo.

A magnetometria apresentou eficácia em delimitar a estrutura principal da brecha onde

a encaixante possui filiação granítica, entretanto ocorrências da brecha no limite interno a intrusão principal apresentaria baixa eficácia por estar localizado em uma encaixante também magnetizada, de modo que, seria difícil estabelecer a diferença entre os comportamentos magnéticos.

A análise aprimorada dos erros de inversão de susceptibilidade magnética, com base no erro de adequação e no modelo de normalização seriam interessantes para refinar o modelo de susceptibilidade magnética apresentado.

Outra opção de método geofísico, que provavelmente seria eficaz para delimitar a brecha é o método eletromagnético no domínio da frequência, que possivelmente identificaria as variações de resistividade e a delimitação das estruturas condutivas relacionadas à alteração hidrotermal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alagia, M. C. S. (2018). Polarização induzida no domínio da frequência associada a integração de dados multifonte na prospecção de zona mineralizada no Greenstone Belt Faina, Goiás.

Almeida F.F.M de, Amaral G., Cordani H.G., Kawashita K. 1973. The Precambrian evolution of South American cratonic margin, South of Amazon River. In: A.E.M. Nairs & F.G. Stehli (eds.) The ocean basins and margins. vol. I, p. 411-446.

Almeida F.F.M. de, Hasui Y., Brito-Neves B.B de, Fuck R. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Sci. Rev.*, 78 17: 1-29.

Assumpção, M., An, M., Bianchi, M., França, G.S.L., Rocha, M., Barbosa, J.R., ~ Berrocal, J., 2004. Seismic studies of the Brasília fold belt at the western border of the Sao Francisco Craton, Central Brazil, using receiver function, surface-wave ~ dispersion and teleseismic tomography. *Tectonophysics* 388 (1-4), 173–185. [https:// doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.029](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.029). Assumpção, M., Bianchi, M., Juli ~ a, J., Dias, F.L., França, G.S., Nascimento, R., Drouet, S., ` Pav~ ao, C.G., Albuquerque, D.F., Lopes, A.E., 2013. Crustal thickness map of Brazil: data compilation and main features. *J. South Am. Earth Sci.* 43, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.009>.

Brod, J.A.; Barbosa, E.S.R.; Junqueira – Brod, T.C.; Gaspar, J.C; Diniz – Pinto, H.S; Sgarbi, P.B.A; Petrinovic, I.A. (2005). The Late – Cretaceous Goiás Alkaline Province (GAP), Central Brazil.

Cerqueira, M. (1995). Geologia e Evolução Petrológica do Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Iporá – Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Coelho, D. M. (2021). Análise Geológico-Geofísica do sistema hidrotermal pórfiro do Arco Magmático Arenópolis.

Cordani, U. G., Pimentel, M. M., de Araújo, C. E. G., & Fuck, R. A. (2013). THE SIGNIFICANCE OF THE TRANSBRASILIANO-KANDI TECTONIC CORRIDOR FOR THE AMALGAMATION OF WEST GONDWANA. *Brazilian journal of Geology*, 43(3), 583-597.

Cordani, U.G., Pimentel, M.M., Araújo, C.E.G., Fuck, R.A., 2013. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. *Braz. J.*

Geol. 43 (3), 583–597. <https://doi.org/10.5327/Z2317->

Corrêa Neto, A. V., Modesto de Almeida, A., Caputo Neto, V., & Campos Guerrero, J. (2012). Alteração Hidrotermal em Zona de Cisalhamento Associada ao Lineamento Congonhas, Sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*.

Curto, J. B., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Blakely, R. J., Alvarenga, C. J., & Dantas, E. L. (2014). The tectonic evolution of the Transbrasiliano Lineament in northern Paraná Basin, Brazil, as inferred from aeromagnetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1544-1562.

Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), 379-398.

Danni J.C.M. & Gaspar J.C. 1992. Mineralogia e química do katungito de Amarinópolis, Goiás. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 37, Anais, 85- 86.

Danni, J.C.M. (1974). *Geologie des complexes ultrabasiques alcalins de la region d'Iporá, Goiás (Bresil)*. Thèse, Université Sud – Centre d'Orsay, Paris, 101 p.

Danni, J.C.M. (1978). Magmatic differentiation of the alkaline ultrabasic intrusions of the Iporá region, southwest Goiás, Brazil. In: *International Symposium on Carbonatites*, 1, p.149-167.

Dardenne M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos. 2000. *Tectonic evolution of South America*. 31 st International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263.

Dendith, M. & Mudge, S. T., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. London: Cambridge University Press.

Ellis, R., & MacLeod, I. (2013). Constrained voxel inversion using the Cartesian cut cell method. *ASEG Extended Abstracts*, 2013(1), 1-4.

FEITOZA, Lorena Malta et al. Comportamento Magnetométrico Das Alcalinas Do Complexo Da Fazenda Buriti, Região De Iporá-Go. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. p. cp-197-00185.

Gaspar, J.C. & Danni, J.C.M. (1981). Aspectos petrográficos e vulcanológicos da província alcalina-carbonatítica de Santo Antônio da Barra, sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 11, 74-83.

Guimarães G., Glaser I., Marques V.L. 1968. Sobre a ocorrência de rochas alcalinas na região

de Iporá - Goiás. *Mineração Metalurgia* 48(283):11- 15.

Hallof, P. G. (1964). A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. *Geophysics*, 29(3), 425-433.

Hasui, Y., Cartner-Dyer, R.E. & Iwanuch, W. (1971). Geocronologia das rochas alcalinas de Santo Antônio da Barra, GO. XXV Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, Anais, pp. 253-258.

Kearey, P., Klepeis, K. A., & Vine, F. J. (2009). *Global tectonics*. John Wiley & Sons.

Kröner, A., & Cordani, U. (2003). African, southern Indian and South American cratons were not part of the Rodinia supercontinent: evidence from field relationships and geochronology. *Tectonophysics*, 375(1-4), 325-352.

Laux, J. H., Pimentel, M. M., Dantas, E. L., Armstrong, R., & Junges, S. L. (2005). Two Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2), 183-198.

Li, X. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2), L13-L16.

LOKE, Meng Heng. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 2004.

Marques, G. C. (2017). Evolução tectônica e metalogenética no contexto do depósito aurífero de Fazenda Nova, Arco Magmático de Arenópolis, Goiás.

Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959). Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*, 24(4), 790-816.

Martins, E. D. S. F. (2021). Contribuição geofísica à análise do arcabouço tectônico na Província Alcalina de Goiás.

MILLER, Hugh G.; SINGH, Vijay. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, v. 32, n. 2-3, p. 213-217, 1994.

Münch, U., Blum, N., & Halbach, P. (1999). Mineralogical and geochemical features of sulfide chimneys from the MESO zone, Central Indian Ridge. *Chemical geology*, 155(1-2), 29-44.

Neves, B. B. D. B., Fuck, R. A., & Pimentel, M. M. (2014). The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 44, 493-518.

PAZDIREK, O.; BLAHA, V. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. In: 58th EAGE Conference and Exhibition. European Association of

Geoscientists & Engineers, 1996. p. cp-48-00228.

Pena G.S. & Figueiredo A.J.A. 1972. Geologia da Intrusão AlcalinoUltramáfica de Montes Claros de Goiás, Projeto Alcalinas, Relatório Final, Volume 3. DNPM/CPRM

Pena G.S. 1974. Geologia da área do Projeto Goiânia II, Sudoeste de Goiás. In: SBG, Congr. Bras. Geol, 28, Anais, 4, 37-50.

Pimentel M.M. & Fuck R.A. (1992). Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, 20: 359-375.

Pimentel M.M., Fuck R.A., Gioia S.M.C.L. 2000. The Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc, Central Brazil: a review and new Sm-Nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1): 035-039.

PIMENTEL, M. M., FUCK, R. A., CORDANI, U. G., & KAWASHITA, K. (1985). Geocronologia de rochas graníticas e gnáissicas da região de Arenópolis-Piranhas, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(1), 3-8.

Pimentel, M. M., Heaman, L., Fuck, R. A., & Marini, O. J. (1991). U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in central Brazil. *Precambrian Research*, 52(3-4), 321-335.

Pinto, V. D. P. (2019). Polarização induzida espectral: teoria, modelagem e aplicação.

Revil, A., & Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1480-1498.

Ribeiro, C. C. (2008). Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO

RIBEIRO, F.B.; MOLINA, F.B. Geofísica: uma breve introdução. São Paulo: USP, 2018.

Rocha, M.P., de Azevedo, P.A., Marotta, G.S.A., Schimmel, M., Fuck, R., 2016. Causes of intraplate seismicity in central Brazil from travel time seismic tomography. *Tectonophysics* 680, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.005>.

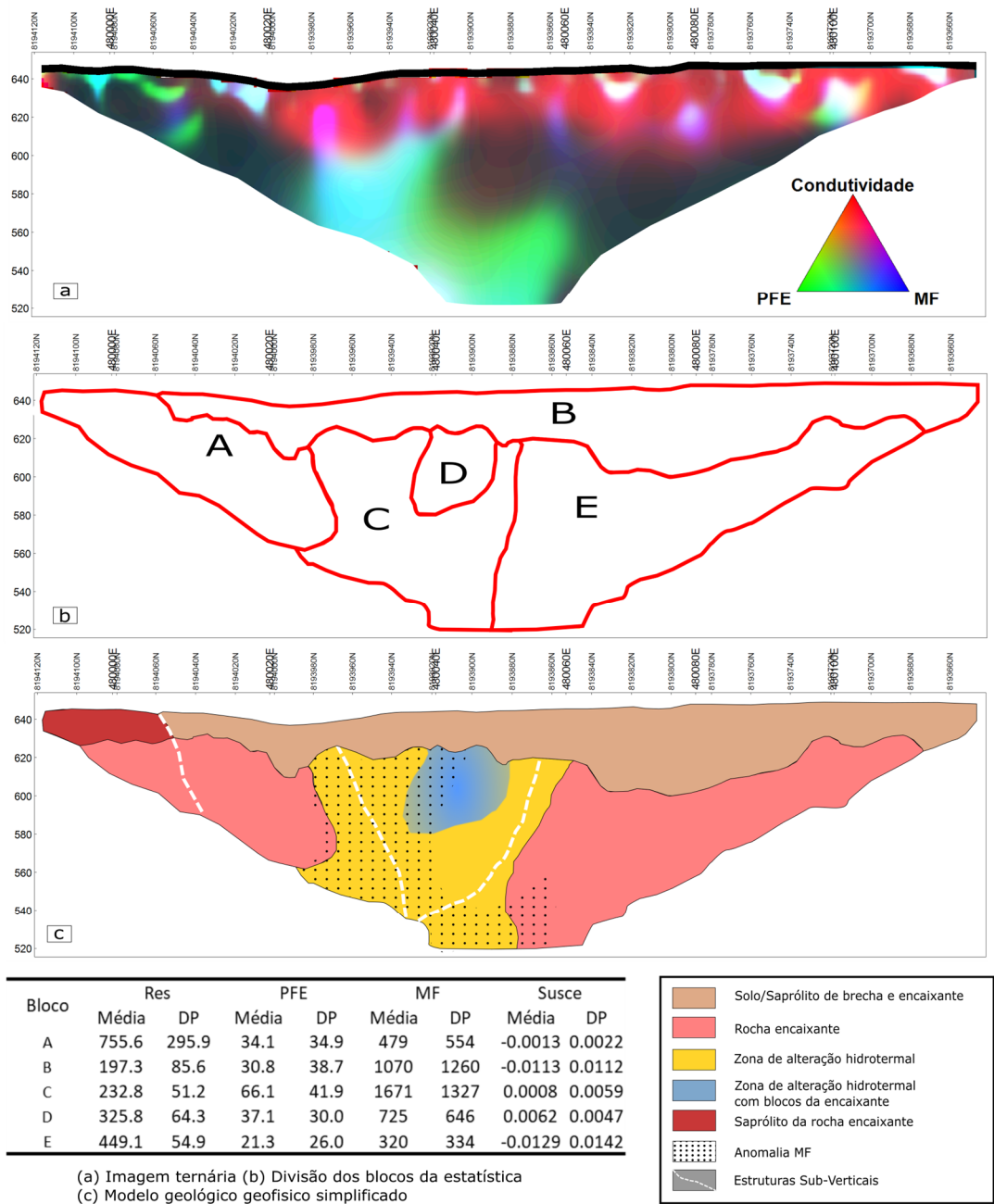
Rocha, M.P., Schimmel, M., Assumpção, M., 2011. Upper-mantle seismic structure ~ beneath SE and Central Brazil from P-and S-wave regional travelttime tomography. *Geophys. J. Int.* 184 (1), 268–286. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04831.x>.

Rodrigues, J. B. (1996). Geocronologia e geoquímica da seqüência vulcano-sedimentar de Iporá e rochas graníticas associadas.

- Roest, W. R., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Soares, J.E., Berrocal, J., Fuck, R.A., Mooney, W.D., Ventura, D.B., 2006. Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 111 (B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB003769>.
- Sumner, J. S., 1976. *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Arizona: Elsevier Scientific Publishing Company.
- TELFORD, W. M. et al. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 2ed.
- Ward, S. H., 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial*, p. 398.

APÊNDICE

L2 – Interpretação



L3 - Interpretação

