



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO
DOMÍNIO DO TEMPO APLICADOS À MINERALIZAÇÕES
SULFETADAS NO DEPÓSITO RANCHÃO EM SANTO ANTÔNIO DO
LEVERGER, MATO GROSSO**

Moara Maria Oliveira de Matos

Brasília – DF
2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO
DOMÍNIO DO TEMPO APLICADOS À MINERALIZAÇÕES
SULFETADAS NO DEPÓSITO RANCHÃO EM SANTO ANTÔNIO DO
LEVERGER, MATO GROSSO**

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

2021

*Dedico este trabalho ao meu sobrinho **Bento:**
sua vida me trouxe à vida.*

AGRADECIMENTOS

A parte mais especial de toda jornada é, sem dúvidas, a gratidão. E eu só tenho motivos para ser grata, porque fui amada e cuidada e incentivada durante todos os anos na busca incessante pela realização do meu sonho de ser uma geofísica. Primeiro, quero agradecer a Deus e aos meus vovôs e vovós da Umbanda (vovó Rita, Balbina e Cambinda) porque a luz que me protegeu, me guiou e me deu força foi a de vocês!

Gratidão à minha família: à minha mãe Ariane, pela vida, pelos sacrifícios e por seu amor; à minha irmã Laura, por ser a minha parte mais tagarela e engraçada; e à minha irmã Bárbara, por ser a minha melhor amiga, por segurar a minha mão nos meus piores momentos e por ter me presenteado com o amor da minha vida. Ao meu pai, Marcos, pelas palavras de amor e por estar presente, de um modo ou de outro. Ao Lucas, por fazer parte da nossa família de um jeito incrível. À minha madrinha, Maria José, pelo carinho e suporte que superam os milhares de quilômetros entre nós. Ao tio Chico e tio Geraldo (*in memoriam*), pelo suporte e pelo amor. À minha avó Terezinha, pelo seu incentivo incondicional: “é preciso fazer o que se gosta, mas também, gostar do que se faz” – e hoje eu cheguei aqui, vovó. Agradeço ao Bento, paixão da minha vida, pucutuque, golfinho, dono da melhor risada– a dinda te ama!

Um agradecimento mais que especial pro meu querido orientador, professor e amigo, Dr. Welitom Rodrigues Borges, por ter me permitido vivenciar tantas oportunidades, ainda que caloura. Tom, hoje o caminho de profissionalismo que construo é devido a você, que confiou em mim, me incentivou e puxou a minha orelha sempre que foi preciso. Prometo não te decepcionar daqui pra frente!

Aos amigos amados que a graduação me presenteou: Guigui, Dani, Pedrito, Amandinha C., Amandinha W., Ju S., Marcos e tantos outros... à minha amiga-irmã Luísa: você merece um livro inteiro de agradecimentos, Lu! Sua amizade e lealdade salvaram a minha vida em muitos momentos. Você é pura luz! Amo demais você, tia Beth, tio Edinho, Gabriel, Carol e Guigui. Obrigada por serem simplesmente incríveis.

Agradeço aos amigos que o Observatório Sismológico me proporcionou: foram os dois anos mais malucos e engraçados que eu já tive! Vini, Isa, Brandow, Matt, Andrew, Ray, Glau,

Celsin, Bruno, Vivi. Ao professor Dr. George Sand, meu primeiro orientador na graduação, que me rendeu muitas risadas, conversas aleatórias em inglês e a quem eu tenho muito carinho. À professora Dr. Monica Von Huelsen, por sua doçura e empatia. Ao professor Dr. Marcelo Rocha, pelos ensinamentos e confiança em mim.

Aos amigos da pós-graduação que fiz ao longo dessa trajetória: Maria Clara, Jess, Amanda Rocha, Lyara, Bruno Nascimento, Victória e a galera do 'Orientandos do Tom'. Ao meu mestre Vicente de Paula, por ter me ensinado como amar ainda mais os campos e a geofísica: você tem um espaço enorme no meu coração! À Maria Alagia, mulher maravilhosa, geofísica porreta, ser humano singular: obrigada por toda a paciência e cuidado ao me ensinar. Agradeço também ao Dudu e ao Pedro V.: seus ensinamentos, lições, técnicas e conhecimento foram essenciais para a minha formação e é uma honra chamá-los de amigos.

À D. Fátima (*in memoriam*), por seu amor e carinho comigo, pela sua energia sempre alto astral e pelos abraços que salvavam o meu dia: muito obrigada. A senhora faz muita falta! Obrigada por se preocupar mesmo à distância... Espero que esteja olhando por mim daí de cima!

À PSM Mining e seu time de colaboradores que tornaram este trabalho possível: Douglas, Rames, Joni, Rogério, Mateus e Aninha. Em especial, agradeço ao meu parceiro de trabalho Carlos Gilberto Ferlini, pela confiança no meu profissionalismo e pela oportunidade de realizar um grande trabalho.

À minha galera de campo mais amada e querida: Periclão (Ursão), Dudu, Amanda e Téo. Seu João Pacheco, ser humano ímpar, muito obrigada! Sua expertise e sua paciência te tornam único. Sou muito feliz de conhecê-lo.

Ao MSc. Ciro Calachibete, pelas inúmeras e incontáveis conversas, pelo apoio e confiança no meu trabalho e à sua esposa D. Ângela: muito obrigada! Ao Rafael Brasil Figueras, técnico do Laboratório de Difractometria de Raio-X da UnB, pelo auxílio na aquisição e processamento dos dados de DRX.

Às minhas parceiras maravilhosas da Ambientare: Gabi (minha prin maravilhosa), Yoyo, Mylla, Rai, Isa, Jojo, Mari, Marília, Raquel, Débora, Anna e aos rapazes que admiro demais: Michael e Kauê. Ao Sr. Luizinho e ao Pedro Vencovsky pela confiança no meu trabalho, à Manu Gois por ter me ensinado tanto!

À minha psicóloga, Janine Barth, que me ensinou a viver em um caminho de paz depois de tanta turbulência, a quem eu confio todos os meus sentimentos (e até treinamentos pré-apresentação acadêmica). Você é um anjo na terra!

Aos meus mestres: Prof. Dra. Roberta Vidotti pelo seu acolhimento e por ser simplesmente um modelo pra mim, Prof. Dra. Susanne Maciel (maravilhosa, inteligente, linda sob todos os ângulos), Prof. Dr. José Soares, Prof. Dr. Marco Ianniruberto, Prof. Dr. Rogerio Uagoda, Prof. Dra. Adriana Chatack, e o querido Prof. Dr. Elder Yokoyama, que cuidou dos graduandos com louvor durante a sua coordenação.

E aos meus grandes amigos do Instituto Federal da Bahia (IFBA) Ilhéus, em especial à minha professora Mariluce Silva: meu caminho em busca da geofísica começou com um incentivo seu quando eu tinha apenas 16 anos... Muito obrigada!

Gratidão a todos que tornaram esse trabalho possível e aos que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento como geofísica e como pessoa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	1
1.1.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>1</i>
1.2	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	2
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	3
2.1	GEOLOGIA.....	3
2.1.1	<i>Geologia Regional.....</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Geologia Local.....</i>	<i>5</i>
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
3.1	MÉTODOS ELÉTRICOS	7
3.1.1	<i>Eletrorresistividade</i>	<i>7</i>
3.1.1.1	Propriedades Elétricas dos Materiais e Fluxo de Corrente	7
3.1.1.2	Resistividade Aparente.....	8
3.1.1.3	Arranjos Eletródicos.....	9
3.1.2	<i>Polarização Induzida no Domínio do Tempo</i>	<i>10</i>
3.2	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X.....	11
4	MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1	MOBILIZAÇÃO DE CAMPO.....	13
4.1.1	<i>Eletrorresistividade</i>	<i>13</i>
4.1.2	<i>Polarização Induzida no Domínio do Tempo</i>	<i>16</i>
5	ARTIGO CIENTÍFICO.....	20
5.1	INTRODUÇÃO	21
5.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	21
5.3	METODOLOGIA	22
5.3.1	<i>Aquisição dos Dados</i>	<i>22</i>
5.3.2	<i>Processamento dos Dados.....</i>	<i>24</i>
5.3.3	<i>Análise Laboratorial (DRX)</i>	<i>25</i>
5.4	RESULTADOS	26
5.4.1	<i>Eletrorresistividade</i>	<i>26</i>
5.4.2	<i>Polarização Induzida.....</i>	<i>29</i>
5.4.2.1	Área A.....	29
5.4.2.2	Área B	31
5.4.3	<i>Difratometria de Raios-X</i>	<i>33</i>
5.5	CONCLUSÃO.....	35
5.6	AGRADECIMENTOS	36
5.7	REFERÊNCIAS.....	36
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	38

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
8	APÊNDICE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. SEÇÃO GEOLÓGICA TRANSVERSAL À ESTRUTURAÇÃO DA FAIXA PARAGUAI, NA PORÇÃO NE. MODIFICADO DE (MANTESSO-NETO, BARTORELLI, CARNEIRO, & BRITO NEVES, 2004) (ALVARENGA & TROMPETTE, 1993).....	4
FIGURA 2-2. ESQUEMA DAS RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS NA BORDA SUDESTE DO CRÁTON AMAZÔNICO (SEM ESCALA). MODIFICADO DE (ALVARENGA & TROMPETTE, 1993)	5
FIGURA 3-1. EXEMPLOS DE ARRANJOS ELETRÓDICOS. A) DIPOLO-DIPOLO; B) POLO-DIPOLO. RETIRADO DE (BINLEY & KEMNA, 2005).....	9
FIGURA 3-2. MEDIDA DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO. RETIRADO DE (BINLEY & KEMNA, 2005)	11
FIGURA 3-3. COMPARAÇÃO ENTRE RAIOS-X ESPALHADOS POR UM CRISTAL (CIMA) E MATERIAL PARTICULADO (BAIXO). RETIRADO DE (DINNEBIER & BILLINGE, 2008)	12
FIGURA 4-1. A) BLOCO 1; B) BLOCO 2; C) BLOCO 3. CAMPANHA DE ELETRORRESISTIVIDADE.....	14
FIGURA 4-2. A) ELETRODO DE FERRO ATERRADO E CONECTADO AO CABO MULTIELETRÓDICO; B) ESTAÇÃO DE CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS DURANTE A AQUISIÇÃO; C) EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA ESTAÇÃO DE CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS; D) ELETRORRESISTÍMETRO CONECTADO À CABO MULTIELETRÓDICO, BATERIA 12 V, INVERSOR E COMPUTADOR DA ESTAÇÃO DE CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS	15
FIGURA 4-3. A) ÁREA A; B) ÁREA B. CAMPANHA DE IP NO DOMÍNIO DO TEMPO	17
FIGURA 4-4. OPERAÇÃO DO ELREC PRO NA ÁREA B.....	18
FIGURA 4-5. OPERAÇÃO DO VIP 4000 NA ÁREA B.....	18
FIGURA 4-6. DISPOSIÇÃO DOS CABOS PARA O INÍCIO DO LEVANTAMENTO NA ÁREA A (CAVA).....	18
FIGURA 4-7. TRANSPORTE DO MAQUINÁRIO NA ÁREA B	18
FIGURA 5-1. MAPA GEOLÓGICO DO DEPÓSITO RANCHÃO. RETIRADO DE (SILVA E SOUZA, GARCIA, BARBOZA, & CAVALCANTE, 2021) (NO PRELO)	22
FIGURA 5-2. LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS DE ER E IP	23
FIGURA 5-3. OPERAÇÃO DO SYSCAL PRO NA AQUISIÇÃO DO MÉTODO ER.....	24
FIGURA 5-4. OPERAÇÃO DO ELREC PRO NA AQUISIÇÃO DO MÉTODO IP	24
FIGURA 5-5. FRAGMENTO DA ENCAIXANTE (ÁREA A E CAVA) [FURO 02, 36.30 M].....	25
FIGURA 5-6. FRAGMENTO DE VEIO MINERALIZADO COM SULFETOS DA CAVA DE MINÉRIOS (ÁREA A) [FURO 02, 50.35M].....	25
FIGURA 5-7. FRAGMENTO DE VEIO MINERALIZADO COM ALTO TEOR DE ZINCO (ÁREA B) [FURO 18, 74.90 M].....	26
FIGURA 5-8. FRAGMENTO DE VEIO MINERALIZADO DE COMPOSIÇÃO DESCONHECIDA (ÁREA B) [FURO 18, 72.70 M]	26
FIGURA 5-9. IMAGEM DE SATÉLITE DOS PERFIS GEOFÍSICOS UTILIZADOS NESTA SEÇÃO	27
FIGURA 5-10. PERFIS 1, 2, 3 E B ESPACIALIZADOS NO BLOCO 1 E ÁREA A (REGIÃO DA CAVA) COM EVIDÊNCIA DE CONTINUIDADE DA MINERALIZAÇÃO OBSERVADA EM SUPERFÍCIE	27
FIGURA 5-11. MODELO TRIDIMENSIONAL DA ÁREA MINERALIZADA COM BASE NOS PERFIS DE ELETRORRESISTIVIDADE DO BLOCO 1 E RESISTIVIDADE DA ÁREA A	28

FIGURA 5-12. FOTO-CROQUI DA AQUISIÇÃO DO PERFIL A PARA OBTENÇÃO DA ASSINATURA GEOFÍSICA DO DEPÓSITO NA ÁREA DE ESTUDO (A SETA INDICA O PONTO DE REFERÊNCIA SOB DOIS ÂNGULOS DISTINTOS).....	29
FIGURA 5-13. SEÇÕES A) DE RESISTIVIDADE; B) DE CARGABILIDADE; C) DE INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA; DA LINHA A, COM ESPAÇAMENTO DE 50 METROS E ARRANJOS POLO-DIPOLO E DIPOLO-DIPOLO.....	30
FIGURA 5-14. SEÇÕES A) DE RESISTIVIDADE; B) DE CARGABILIDADE; C) DE INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA; DA LINHA C, COM ESPAÇAMENTO DE 25 METROS E ARRANJOS POLO-DIPOLO E DIPOLO-DIPOLO.....	32
FIGURA 5-15. DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA 01	33
FIGURA 5-16. DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA 02.....	34
FIGURA 5-17. DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA 06.....	35
FIGURA 5-18. DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA 10.....	35

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. RESISTIVIDADES APARENTES PARA FATORES GEOMÉTRICOS ESPECÍFICOS DE ACORDO COM CONFIGURAÇÕES ELETRÓDICAS (REYNOLDS, 1997)	10
QUADRO 2. RESUMO DOS PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO DA CAMPANHA DE ELETRORRESISTIVIDADE E IP ESPECTRAL	15
QUADRO 3. RESUMO DOS PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO DA CAMPANHA DE IP NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	18

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A geofísica, como parte fundamental no trabalho de prospecção mineral, contribui com a redução dos riscos do processo de exploração e direciona a descoberta de depósitos minerais. Para tanto, é necessário o uso das propriedades físicas das rochas e seus constituintes de modo a caracterizar o ambiente geológico, através do requisito básico de aplicação da metodologia: contraste, impedância.

A aplicação da geofísica à localização de depósitos pode ser considerada direta ou indireta. No primeiro caso, o contraste da propriedade física do mineral em relação ao meio é elevado e o volume é insignificante. Assim, a resposta é associada diretamente ao mineral investigado. Em termos de minerais com elevado contraste de propriedades física, mas volume não tão expressivo, a investigação orienta-se à associação deste a outro mineral e/ou estrutura que possui(em) propriedade(s) física(s) contrastante(s) e volume apreciável (Luiz, 2013).

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é a caracterização geofísica das mineralizações sulfetadas inseridas no depósito Ranchão, no Mato Grosso.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Definição da geometria do depósito utilizando os métodos geofísicos polarização induzida e eletrorresistividade;
- Análise de difratometria de raios-x nas amostras dos furos de sondagem;

- Caracterização da assinatura geofísica da mineralização;
- Colaboração acadêmica com dados para compor a caracterização do depósito no geral.

1.2 Estrutura da Monografia

A presente monografia está estruturada em 8 capítulos, que contém:

- Capítulo 1: Introdução ao tema e objetivos;
- Capítulo 2: Geologia regional e local, e caracterização do depósito;
- Capítulo 3: Fundamentação teórica dos métodos utilizados;
- Capítulo 4: Material e métodos utilizados na aquisição dos dados em campo;
- Capítulo 5: Artigo Científico
- Capítulo 6: Conclusão do trabalho e recomendações;
- Capítulo 7: Referências Bibliográficas

CAPÍTULO 2

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Geologia

2.1.1 Geologia Regional

A Plataforma Sulamericana abrange todo o Brasil. A natureza de seu embasamento exposto e das coberturas sedimentares de idades variadas (pré-cambrianas a Siluriano Inferior) permite delimitar suas províncias estruturais (Almeida, Hasui, Neves, & Fuck, 1977). Entre as províncias situadas no território brasileiro, ressaltar-se-á a província Tocantins.

A província Tocantins localiza-se a sudeste do Cráton Amazônico, cujos limites norte e sul são dados pelas bacias sedimentares do Parnaíba e Paraná, respectivamente. De acordo com Mantesso-Neto *et al.* (2004) a província Tocantins é um sistema orogênico neoproterozóico, resultado dos eventos colisionais de amalgamento do supercontinente Gondwana. Esse sistema de orógenos, estruturalmente, divide-se em três cinturões (Frasca, 2015): Araguaia, Brasília, e Paraguai, o qual será dada a ênfase.

O orógeno Paraguai, também denominado faixa de dobramentos Paraguai (Almeida, Hasui, Brito Neves, & Fuck, 1981) (Alvarenga & Trompette, 1993), compreende uma região de aproximadamente 1.200 km de extensão, que acompanha a direção do Rio das Mortes (Mato Grosso) e inflete para norte-sul nas proximidades de Cuiabá (Mantesso-Neto, Bartorelli, Carneiro, & Brito Neves, 2004). As rochas que a compõem são individualizadas em associações turbidíticas-glaciogênicas, carbonatadas ou detríticas (Alvarenga & Trompette, 1993) e as zonas estruturais subdividem o orógeno em (Figura 2-1):

- Cobertura Sedimentar de Plataforma (ou cratônica): abrange os sedimentos de algumas formações que aparentemente foram dobrados por apenas uma fase de deformação (Alvarenga C. J., 1988);
- Zona Externa (ou pericratônica): região de pouco ou nenhum metamorfismo, caracterizada por um extenso dobramento Brasileiro, caracterizado por dobras abertas e cortadas por falhas inversas (Alvarenga C. J., 1988) (Dardenne & Schobbenhaus, 2001) (Alvarenga & Trompette, 1993);
- Zona Interna (ou bacinal profunda): região metamórfica de baixo grau com intrusões graníticas (Alvarenga & Trompette, 1993) (Dardenne & Schobbenhaus, 2001). As rochas deste domínio são constituídas pelos grupos Nova Xavantina e Cuiabá, este último de maior abrangência. O grupo Cuiabá, descrito no tópico 2.1.2, caracteriza as encaixantes da província magmática constituída pelos corpos graníticos tardi a pós tectônicos (Manzano, Godoy, & Araújo, 2008).

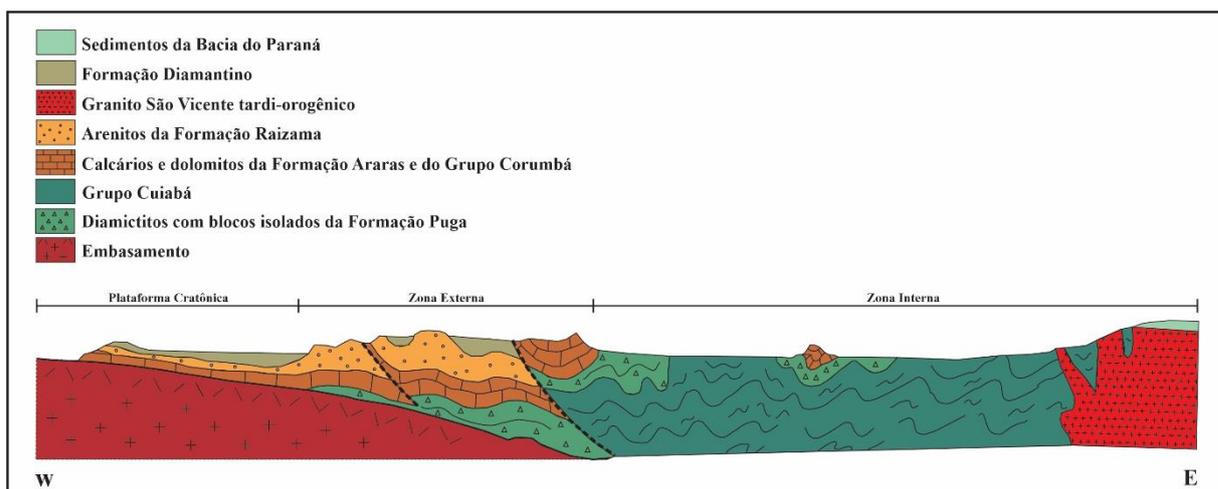


Figura 2-1. Seção geológica transversal à estruturação da faixa Paraguai, na porção NE. Modificado de (Mantesso-Neto, Bartorelli, Carneiro, & Brito Neves, 2004) (Alvarenga & Trompette, 1993)

Os minerais antigênicos¹ provém informações sobre o metamorfismo de baixo grau, com o padrão de reflexão do mineral illita como principal parâmetro para definir as zonas de metamorfismo de baixo grau (Campos, 2017). De acordo com o Índice de Cristalinidade de Illita, atualmente denominado Índice de Kübler, Alvarenga & Trompette (1993) classificam o metamorfismo que ocorre na faixa Paraguai como epizonal na zona interna e anquizonal na zona externa. A anquizona é uma transição entre a região diagenética e a epizona, onde não há ocorrência de minerais expansivos; já a epizona exhibe metamorfismo de baixo grau e padrões

¹ Minerais detríticos transformados e/ou neoformados durante o processo diagenético

de reflexão da ílita mais bem definidos (Campos, 2017).

Estratigraficamente, na faixa Paraguai, as formações Puga e Bauxi compreendem depósitos parcialmente contemporâneos que formam a parte inferior da cobertura cratônica e da zona externa, além de cobrir os metassedimentos do Grupo Cuiabá (Figura 2-2h) (Alvarenga & Trompette, 1993). Assim, de acordo com os domínios estruturais supracitados, têm-se as formações Puga e Bauxi mais delgadas na região da plataforma cratônica, que se tornam mais espessas e levemente dobradas na zona externa. Na transição para a zona interna, observa-se o Grupo Cuiabá, cujo pacote sedimentar é consideravelmente espesso, tectonizado e metamorfisado (Alvarenga & Trompette, 1993), intrudido por granitos tardi-orogênicos do Cambriano (formados no Ciclo Brasileiro).

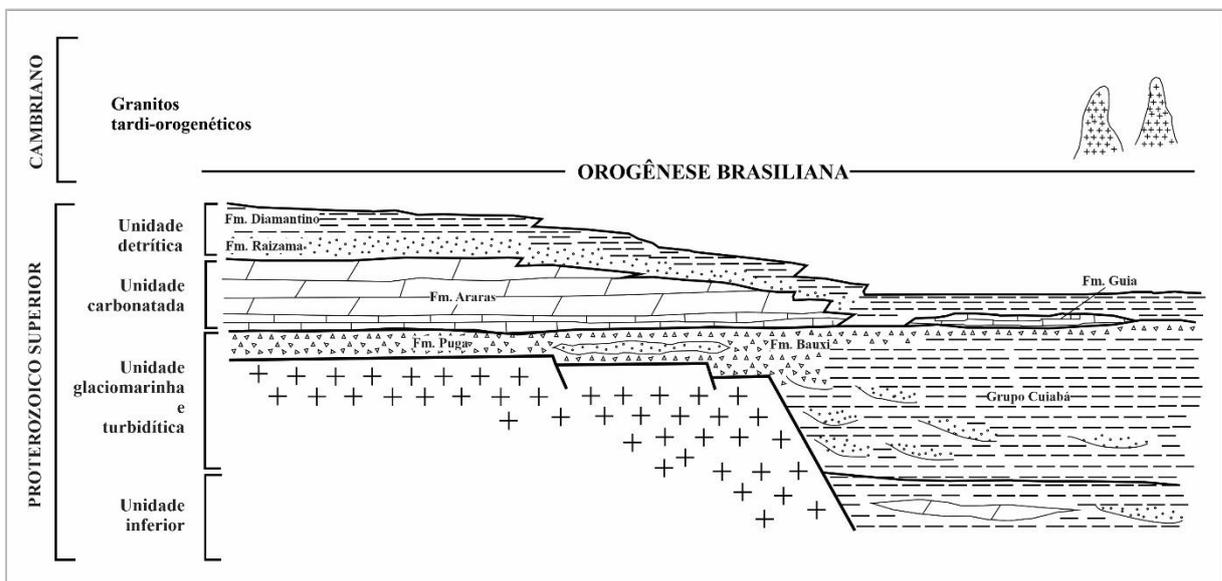


Figura 2-2. Esquema das relações estratigráficas na borda sudeste do Cráton Amazônico (sem escala). Modificado de (Alvarenga & Trompette, 1993)

2.1.2 Geologia Local

O grupo Cuiabá compreende uma pacote de rochas metassedimentares metamorfisadas na fácies xisto-verde (Luz, et al., 1980) (Tokashiki & Saes, 2008) e zona da biotita (Tokashiki & Saes, 2008). Subdivide-se em três unidades litoestratigráficas, da base para o topo (Tokashiki & Saes, 2008):

- Formação Campina de Pedras (sequência deposicional de filitos com intercalações de metarenitos, mármores calcíticos e metagrauvacas);
- Formação Acorzal (depósitos gradacionais rítmicos de metaconglomerados, meta-ritmitos, quartzitos e metadiamicritos); e

- Formação Coxipó (filitos conglomeráticos, metarenitos, quartzitos, mármore e metadiamicctitos).

Entre as unidades litoestratigráficas do grupo Cuiabá, a de maior relevância neste trabalho é a formação Coxipó. Afetada localmente pelo metamorfismo de contato do granito São Vicente, a fm. Coxipó apresenta aspectos hidrotermais que indicam a ocorrência de processos de carbonatização e sulfetação (Moreira, 2018). As mineralizações que ocorrem no pacote metassedimentar estão associadas à intrusão granítica supracitada (Moreira, 2018).

Os granitoides que intrudem o grupo Cuiabá fazem parte da Província Granitoide Matogrossense, constituída por sete corpos intrusivos (Godoy, et al., 2010). Na região norte da província os granitoides apresentam-se em dimensões batolíticas² (Godoy, et al., 2010), como o batólito São Vicente (BSV), apresentado anteriormente na Figura 2-1.

O batólito São Vicente está a 60km de Cuiabá, e apresenta área de exposição de aproximadamente 437 km² (Manzano, Godoy, & Araújo, 2008). São descritos por Del'Arco, *et al.* (1982 apud Manzano, Godoy, & Araújo, 2008) registros de processos hidrotermais e metassomáticos, além de paragêneses de metamorfismo de contato e descrição da intrusão como de caráter diapírico (Godoy, et al., 2010). Caracteriza-se como um batólito de intrusão epizonal devido às características de suas fácies texturais (Trivelli, Pierosan, & Ruiz, 2017), que foram individualizadas em (Godoy, Ruiz, Manzano, & Araújo-Ruiz, 2007):

- Equigranular grossa a porfirítica (bordas de contato);
- Porfirítica de matriz média a equigranular média (zona central do batólito);
- Equigranular fina a porfirítica (região sudeste do batólito); e
- Pegmatítica (restrito à zona NE do batólito).

A mineralização alvo de estudo do trabalho, o depósito Pb-(Zn) Ranchão, encontra-se na auréola de metamorfismo de contato entre o batólito São Vicente e os metadiamicctitos da formação Coxipó, no grupo Cuiabá, metamorfisados nas fácies xisto verde e hornblenda *hornfels* (Silva e Souza, Garcia, Barboza, & Cavalcante, 2021) (no prelo). As zonas mineralizadas são preenchidas por galena, pirita e esfalerita, e as características do depósito indicam que sua gênese corresponde a um sistema meso a epitermal.

² Grande corpo plutônico com área aflorante de mais de 100 km².

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Métodos Elétricos

3.1.1 Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade, também denominado método resistivo ou método da resistividade elétrica, é caracterizado pelo uso de uma corrente artificial, que interage com o material em subsuperfície e o resultado dessa interação pode ser medido pontualmente através da diferença de potencial entre dois eletrodos localizados na superfície. Tomadas as medidas da tensão, e de posse dos valores da corrente, é possível determinar uma medida da resistividade aparente da subsuperfície (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990).

Para compreender o método e sua aplicabilidade, é necessário entender o comportamento da corrente elétrica em subsuperfície, bem como as geometrias que podem ser adotadas e respectivas técnicas de aquisição.

3.1.1.1 Propriedades Elétricas dos Materiais e Fluxo de Corrente

De acordo com a lei de Ohm, a resistência (R) é dada pela voltagem (V) que passa pelo resistor em um circuito elétrico normalizada pela corrente (I) que flui através do circuito (Reynolds, 1997). Esta relação expressa a proporcionalidade entre a corrente e a força eletromotriz necessária para manter o fluxo, e é representada por (Millikan, 1917) (Orellana, 1972):

$$R = \frac{V}{I} \quad (1).$$

O conceito de resistividade verdadeira (ρ) surge da necessidade de inserir as dimensões das substâncias e/ou materiais envolvidos nas medidas elétricas (Sumner, 1976). Em termos tridimensionais, têm-se:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (2).$$

Além disso, a resistividade também pode ser apresentada como uma relação vetorial entre os vetores intensidade do campo elétrico (\vec{E}) e densidade de corrente (\vec{J}) (Sumner, 1976):

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad (3).$$

Substituindo E por $\frac{dV}{dL}$ em (3) (Sumner, 1976), e sabendo que a densidade de corrente é o fluxo de corrente através de uma área (seção reta) (Millikan, 1917):

$$dV = -\rho \cdot \frac{I}{L^2} \cdot dL \quad (4)$$

que, por integração

$$\int_0^V dV = -\rho I \int_0^L \frac{dL}{L^2} \quad (5)$$

resulta em³

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (6).$$

A partir da equação (6) derivam-se as expressões para os fatores geométricos dos arranjos eletródicos que serão apresentados no item 0.

3.1.1.2 Resistividade Aparente

A equação (6) representa a relação de resistividade verdadeira para um ponto. Em termos de fluxo de corrente em subsuperfície são necessários no mínimo dois eletrodos. Assim, a tensão em um ponto P_1 distante de ambos é dada por (Ward, 1990):

$$V_{P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (7).$$

³ Considerando um eletrodo pontual na superfície de um sólido condutor, em que o fluxo de corrente é esférico em subsuperfície (com área $A = 2\pi r^2$)

Para um segundo ponto P₂, a equação (7) é a mesma, com a mudança das distâncias para r₃ e r₄. Assim, a diferença de potencial entre dois pontos na superfície, dado um fluxo de corrente em subsuperfície:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (8)$$

onde

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (9)$$

em que K é o fator geométrico associado ao arranjo. Define-se então a resistividade aparente ρ_a:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (10)$$

e ela está sempre relacionada ao arranjo eletródico utilizado.

3.1.1.3 Arranjos Eletródicos

Em uma aquisição de resistividade elétrica, a força eletromotriz produzida pela fonte (que pode ser uma bateria ou um gerador) é aplicada na subsuperfície através de um par de eletrodos denominados eletrodos de corrente. Um campo elétrico se propaga, e resulta em um fluxo de corrente que é medido por dois eletrodos denominados eletrodos de potencial (Samouelian, Cousin, Tabbagh, Bruand, & Richard, 2005). A configuração de quatro eletrodos é denominada arranjo (Figura 3-1) (Dendith & Mudge, 2014).

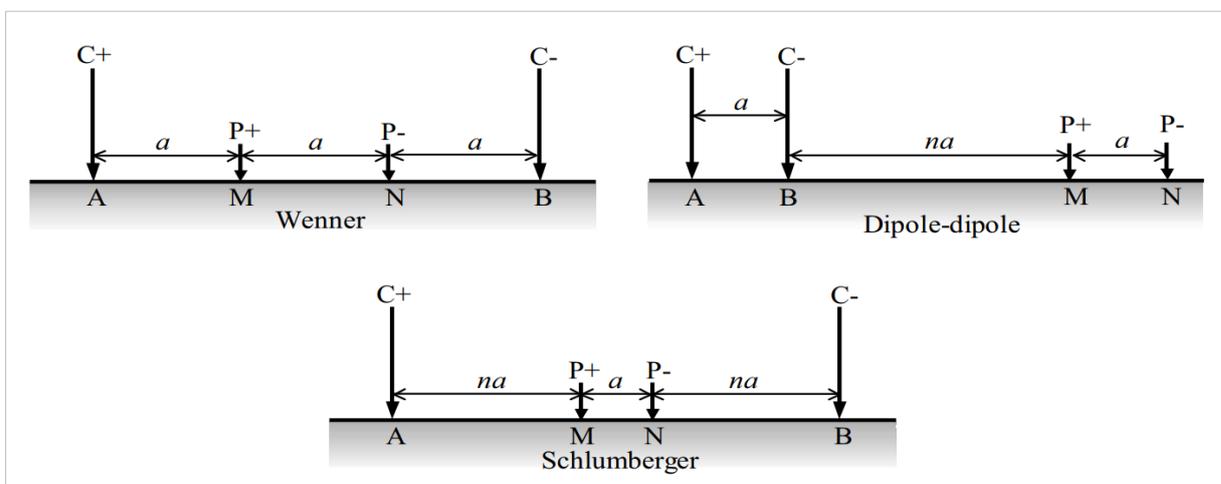


Figura 3-1. Exemplos de arranjos eletródicos. a) Dipolo-dipolo; b) Polo-Dipolo. Retirado de (Binley & Kemna, 2005)

Dahlin & Zhou (2004), através do seu trabalho “*Comparison of 2D Resistivity Imaging With 10 Electrode Arrays*”, realizaram uma série de simulações numéricas para comparar a resolução e eficiência de alguns arranjos.

O arranjo polo-dipolo possui baixa razão sinal-ruído, e melhor resolução espacial quando comparado ao arranjo polo-polo, por exemplo (Dahlin & Zhou, 2004). A grande desvantagem deste arranjo é o uso do eletrodo infinito, que limita a aquisição e torna o controle de qualidade deste eletrodo mais complexo, considerando que os ruídos no infinito serão sempre maiores comparados aos demais eletrodos utilizados na aquisição (Dahlin & Zhou, 2004).

Os arranjos *Wenner* e *Schlumberger* possuem imageamento similar, e melhor razão sinal-ruído quando comparados ao polo-dipolo (Dahlin & Zhou, 2004). Todavia, o mesmo não se aplica em termos de resolução espacial (Dahlin & Zhou, 2004).

O arranjo dipolo-dipolo contém efeitos considerados por Dahlin & Zhou (2004) como anômalos, porém a simetria na configuração eletródica facilita o controle de qualidade da aquisição e reforça a obtenção de produtos confiáveis (Edwards, 1977). É amplamente utilizado na pesquisa de estruturas vertical e inclinadas, além de ser mais sensível à presença de corpos geológicos que outros arranjos (Dahlin & Zhou, 2004).

De acordo com (Reynolds, 1997), as resistividades aparentes para os fatores geométricos, de acordo com algumas configurações eletródicas, são definidas por:

Quadro 1. Resistividades aparentes para fatores geométricos específicos de acordo com configurações eletródicas (Reynolds, 1997)

Arranjo Eletródico	Resistividade Aparente
<i>Wenner</i> (alfa/beta)	$\rho_a = 2\pi\alpha R$
<i>Wenner</i> (gama)	$\rho_a = 3\pi\alpha R$
<i>Schlumberger</i>	$\rho_a = \frac{\pi\alpha^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4\alpha^2} \right] R; \alpha \geq 5b$
Dipolo-Dipolo	$\rho_a = \pi n (n + 1) (n + 2) \alpha R$
Polo-Dipolo	$\rho_a = 2\pi n (n + 1) \alpha R$

3.1.2 Polarização Induzida no Domínio do Tempo

Os elementos que compõem as rochas e os primeiros quilômetros da Terra como um todo possuem características capacitivas, isto é, tem capacidade de armazenar cargas elétricas. Este fenômeno é denominado capacitância (Dendith & Mudge, 2014). O efeito de polarização induzida nos materiais consiste nos processos que ocorrem nas interfaces grão-fluido (Binley

& Kemna, 2005). Em uma aquisição deste método, são registrados tanto a resistividade quanto as propriedades capacitivas da subsuperfície. O fenômeno da polarização induzida é considerado de grande importância no que tange a medida dos parâmetros elétricos e concentração de minerais metálicos (Nelson & Voorhis, 1983).

As medições podem ser realizadas no domínio do tempo ou da frequência, e consistem na injeção de um fluxo de corrente em subsuperfície e consequente medição do decaimento da voltagem na interrupção deste fluxo. Define-se a área abaixo da curva de decaimento da voltagem como cargabilidade aparente (Figura 3-2), que, matematicamente, é representada por:

$$m_a = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (11),$$

definida por Seigel (1959), onde V_p é a voltagem primária (Binley & Kemna, 2005).

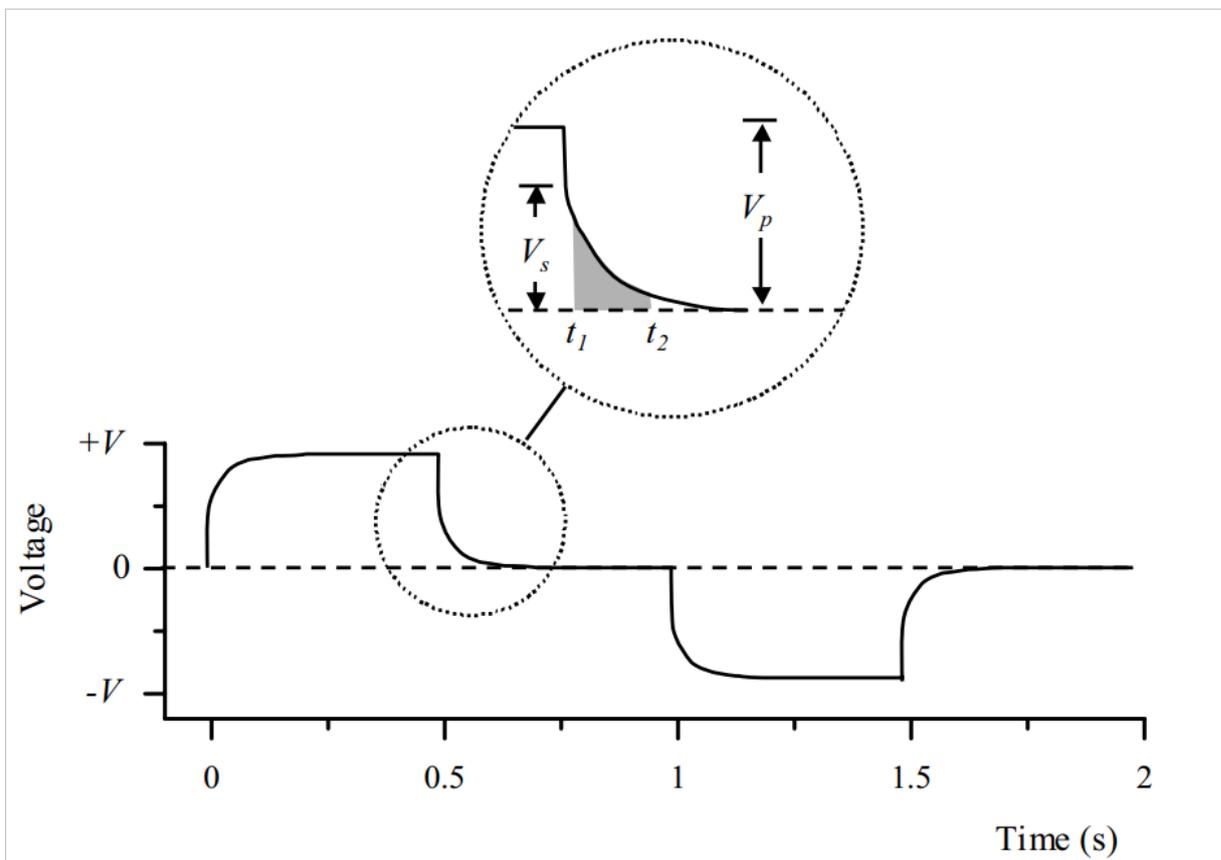


Figura 3-2. Medida da polarização induzida no domínio do tempo. Retirado de (Binley & Kemna, 2005)

3.2 Difratometria de Raios-X

Os raios-x são uma faixa de frequência da radiação eletromagnética que ultrapassa 3 PHz, cujo comprimento de onda é menor que 100 nm e a energia do fóton maior que 12 eV

(Okuno & Yoshimura, 2010). Max Von Laue, em 1912, com a descoberta dos padrões de difração dos raios-x (The Nobel Prize, 2021), definiu um novo rumo na pesquisa cristalográfica. Com base no conhecimento desenvolvido desde então, é seguro dizer que a difratometria de raios-x é um dos mais importantes métodos na descrição e caracterização dos minerais e suas respectivas estruturas cristalográficas.

Os raios-x são produzidos através de tubos de raios catódicos, e a aceleração desenvolvida no tubo resulta em emissão de uma radiação característica denominada fóton raio-x (Cullity, 1978). Em termos de difratometria, é mais apropriado representar o comportamento dos raios-x como uma onda (Silva, 2013). O método da difração de raios-x pode revelar indiretamente os detalhes das estruturas internas do material em um tamanho aproximado à ordem de 10^8 cm (Cullity, 1978).

O fenômeno da difração é desencadeado pelo espalhamento da energia em um arranjo periódico, com a energia coerentemente espalhada por cada átomo (FIG) (Speakman, 2001). A intensidade do espalhamento da energia é proporcional ao número atômico do elemento, e cada elemento pode configurar-se em diversos arranjos atômicos que formam estruturas únicas (Cullity, 1978) (Speakman, 2001). Nos dados de difratometria, o índice de Miller identifica os planos dos átomos que estão relacionados aos picos de difração (Jenkins & Snyder, 1996) (Speakman, 2001).

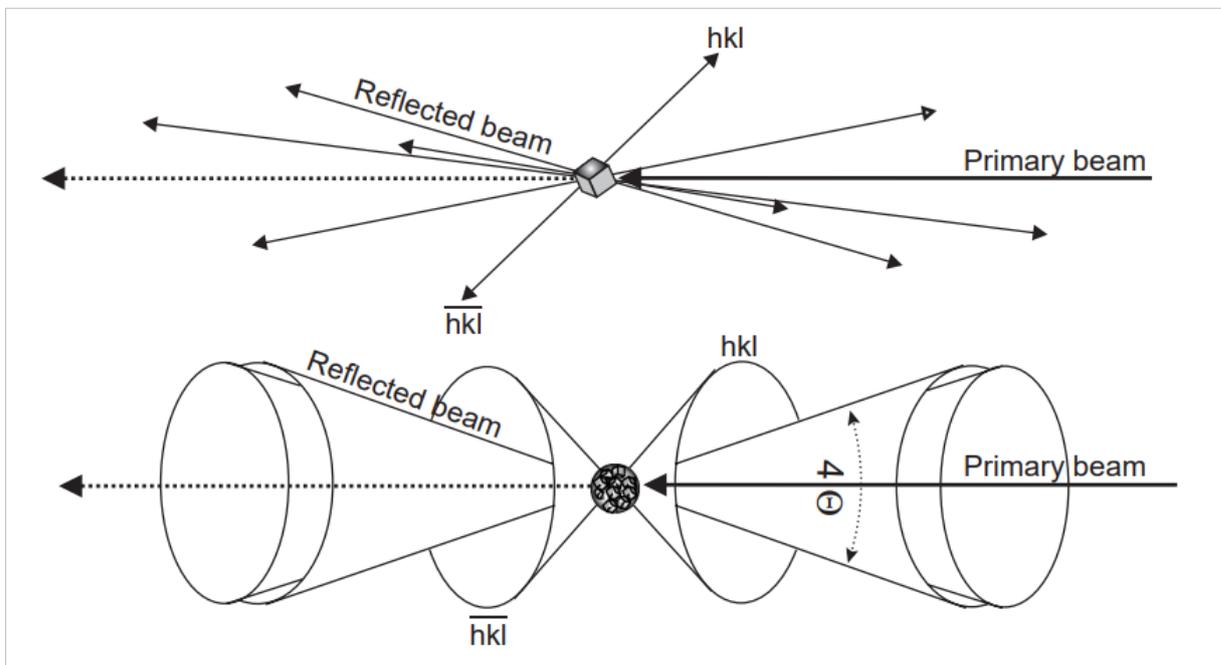


Figura 3-3. Comparação entre raios-x espalhados por um cristal (cima) e material particulado (baixo). Retirado de (Dinnebier & Billinge, 2008)

CAPÍTULO 4

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as etapas de campo, processamento, modelagem dos dados de eletrorresistividade e polarização induzida no domínio do tempo.

4.1 Mobilização de Campo

4.1.1 Eletrorresistividade

A campanha do método eletrorresistivo ocorreu no final do primeiro semestre de 2019, entre os dias 13 e 26 de junho, com foco em três blocos. No Bloco 1, localizado na região da cava de minérios, foram executados três perfis de 720 metros na direção aproximadamente E/W (Figura 4-1a), perpendicular aos corpos minerais aflorantes. Dois perfis foram levantados no Bloco 2, paralelos entre si, perpendiculares à uma galeria de galena aberta por mineradores da região em meados dos anos 40. A direção dos perfis é NE/SW, com extensão de 720 metros cada (Figura 4-1b). O Bloco 3 foi investigado através de dois perfis paralelos entre si, em uma região de *hornfels*, para verificar a existência de possíveis mineralizações sulfetadas. Os perfis na direção aproximadamente N/S variaram entre 820 metros e 920 metros (Figura 4-1c).

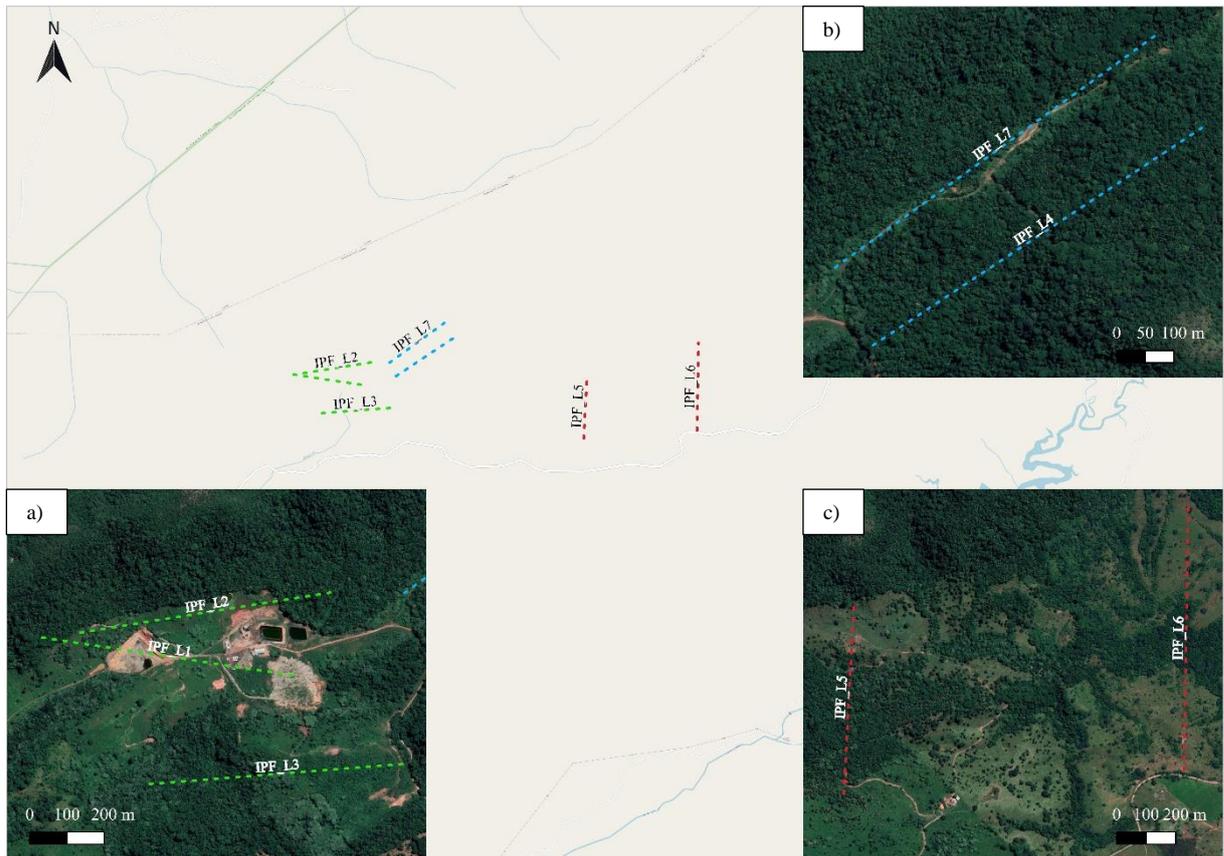


Figura 4-1. a) Bloco 1; b) Bloco 2; c) Bloco 3. Campanha de Eletrorresistividade

Para efetivar a aquisição dos dados foram utilizados 72 eletrodos de ferro conectados às conexões de um cabo multieletródico (Figura 4-2a), de comprimento 720 metros, que conecta os eletrodos ao resistivímetro (Figura 4-2b). O resistivímetro utilizado fica localizado na metade do perfil, ajustado em uma posição ao abrigo do sol e próximo ao chão (Figura 4-2c). O equipamento utilizado foi o Syscal Pro, da *Iris Instruments*, responsável pela injeção da corrente elétrica em subsuperfície e registro da diferença de potencial entre os eletrodos alocados em superfície. Os demais aparatos são cruciais para o desenvolvimento apropriado do levantamento. São eles:

- Baterias de 12V: alimentação energética do resistivímetro;
- Computador e inversor: utilizados em eventuais necessidades;
- Caixa de ferramentas: ajustes nos cabos e/ou eletrodos;
- Radiocomunicador: comunicação em campo.



Figura 4-2. a) eletrodo de ferro aterrado e conectado ao cabo multieletródico; b) estação de controle de qualidade dos dados durante a aquisição; c) equipamentos utilizados na estação de controle de qualidade dos dados; d) eletrorresistímetro conectado à cabo multieletródico, bateria 12 V, inversor e computador da estação de controle de qualidade dos dados

A técnica de aquisição utilizada na campanha foi o caminhamento elétrico, através dos arranjos dipolo-dipolo (DD) e wenner-schlumberger (WS). O espaçamento entre os eletrodos foi de 10 metros em todos os blocos. A voltagem do resistímetro foi configurada em 400V, e janelas de leitura com ciclos de 250 ms e 2000 ms, conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2. Resumo dos parâmetros de aquisição da campanha de eletrorresistividade e IP espectral

Bloco	Número do Perfil	Arranjo	Ciclo de Leitura	Extensão
1	Linha 1	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m
	Linha 1	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
	Linha 2	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m
	Linha 2	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
	Linha 3	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m
	Linha 3	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
2	Linha 4	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m

Bloco	Número do Perfil	Arranjo	Ciclo de Leitura	Extensão
	Linha 4	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
	Linha 4	Wenner-Schlumberger	250 ms	720 m
	Linha 4	Wenner-Schlumberger	2000 ms	720 m
	Linha 7	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m
	Linha 7	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
	Linha 7	Wenner-Schlumberger	250 ms	720 m
	Linha 7	Wenner-Schlumberger	2000 ms	720 m
3	Linha 5	Dipolo-Dipolo	250 ms	720 m
	Linha 5	Dipolo-Dipolo	2000 ms	720 m
	Linha 5	Wenner-Schlumberger	250 ms	720 m
	Linha 5	Wenner-Schlumberger	2000 ms	720 m
	Linha 6	Dipolo-Dipolo	250 ms	820 m
	Linha 6	Dipolo-Dipolo	2000 ms	820 m
	Linha 6	Wenner-Schlumberger	250 ms	820 m
	Linha 6	Wenner-Schlumberger	2000 ms	920 m

A coleta de dados com dois arranjos (DD e WS) teve o objetivo de verificar qual dos dois se ajustaria melhor ao foco da pesquisa. O tópico 5 apresenta o arranjo selecionado e a justificativa.

4.1.2 Polarização Induzida no Domínio do Tempo

A campanha da polarização induzida no domínio do tempo ocorreu na metade do segundo semestre de 2020, entre os dias 25 de setembro e 07 de outubro. É importante ressaltar que, o gap entre aquisições foi devido à ocorrência da COVID-19, que impossibilitou a mobilização em datas anteriores.

A proposta de execução desta campanha foi baseada em três vertentes principais, de acordo com cada área de estudo. A área da cava, na campanha de Eletroresistividade e IP Espectral denominada Bloco 1, nesta campanha é chamada Área A. A abordagem com o método foi diferente, de modo a concentrar os esforços em obter a assinatura geofísica da mineralização com foco em basear as interpretações das demais áreas. Assim, foram realizados três perfis (Figura 4-3a):

- Perfil de 800m, perpendicular ao veio mineralizado (Linha 1);
- Perfil de 750m paralelo ao perfil anterior (de modo a verificar a continuidade da mineralização) (Linha2); e
- Perfil de 300m, perpendicular à área central da cava de minérios (Linha Cava).

A Área B (Figura 4-3b) encontra-se em outro contexto de mineralização sulfetada, e, em termos de *background* geofísico da área, é necessário entender o comportamento elétrico dos corpos minerais na localidade. Por isso, foi realizado o perfil da Linha 3.

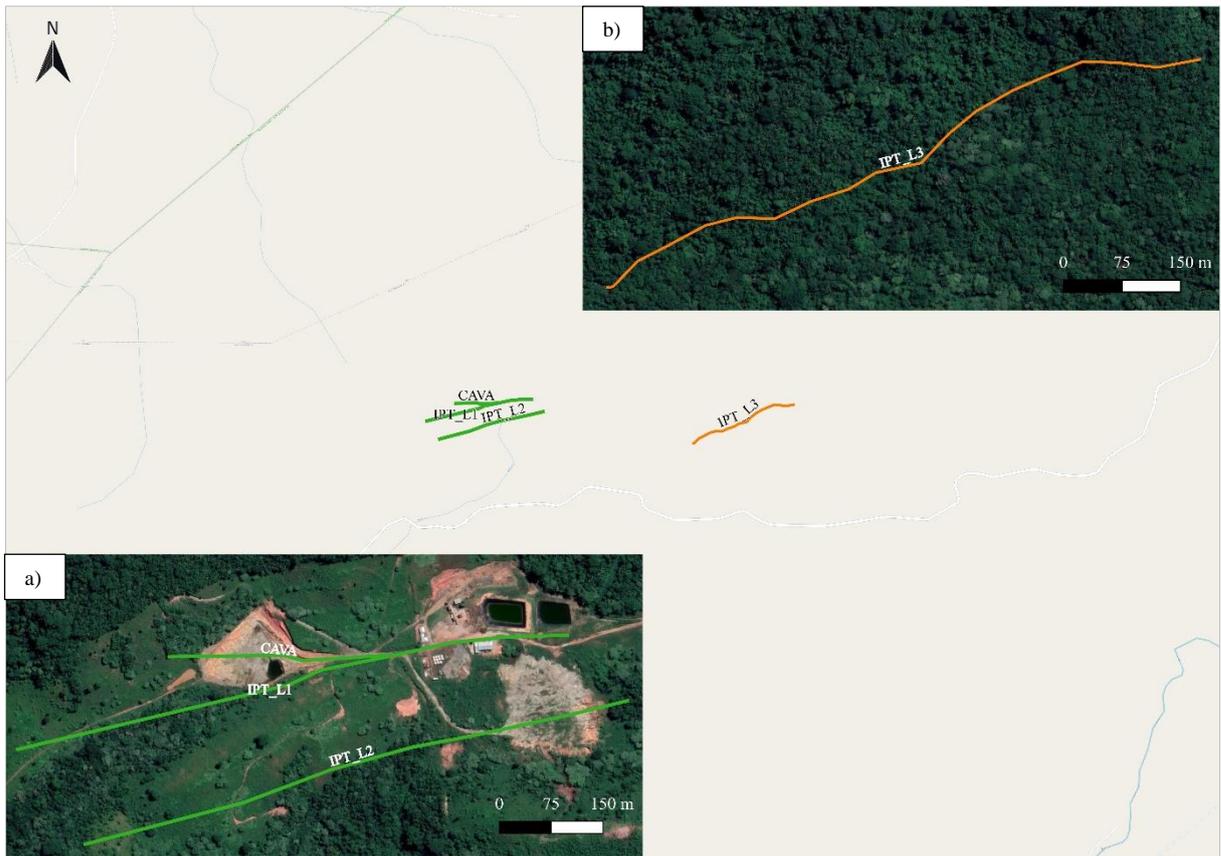


Figura 4-3. a) Área A; b) Área B. Campanha de IP no domínio do tempo

Para efetivar a aquisição dos dados foram utilizados 20 eletrodos de potencial (eletrodos “porosos”) e 2 eletrodos de aço. O equipamento utilizado foi o receptor ELREC Pro (Figura 4-4), da *Iris Instruments*, que registra a diferença de potencial entre os eletrodos de potencial. Para a injeção de corrente foi utilizado o VIP 4000 (Figura 4-5), cuja fonte foi o gerador *Powermate* 10kW. Os demais elementos utilizados no desenvolvimento do levantamento foram:

- Caixa de ferramentas: ajustes nos cabos e/ou eletrodos;
- Radiocomunicador: comunicação em campo;
- 5kg de sulfato de cobre: solução dos eletrodos de potencial;
- 1 km de fio de cobre diâmetro 2,5 mm (Figura 4-6);
- 1,2 km de fio de cobre diâmetro 1 mm; e
- 1 escavadeira (Figura 4-7).



Figura 4-4. Operação do Elrec Pro na Área B



Figura 4-5. Operação do VIP 4000 na Área B



Figura 4-6. Disposição dos cabos para o início do levantamento na Área A (cava)



Figura 4-7. Transporte do maquinário na Área B

A técnica de aquisição utilizada na campanha foi o caminhamento elétrico, através dos arranjos dipolo-dipolo (DD) e polo-dipolo (PD). O espaçamento entre os eletrodos foi de 10, 25 e 50 metros, a depender do perfil. A injeção de corrente enviada à subsuperfície variou entre 500 mA e 5A, com ciclos de leitura de 2000 ms, conforme apresenta o Quadro 3.

Quadro 3. Resumo dos parâmetros de aquisição da campanha de IP no domínio do tempo

Área	Número do Perfil	Arranjo	Espaçamento Eletródico	Extensão
A	Linha A	Dipolo-Dipolo	50 m	800 m
	Linha A	Polo-Dipolo	50 m	800 m
	Linha A	Dipolo-Dipolo	25 m	425 m
	Linha A	Polo-Dipolo	25 m	425 m
	Linha A	Dipolo-Dipolo	10 m	300 m
	Linha A	Polo-Dipolo	10 m	300 m
	Linha Cava	Dipolo-Dipolo	10 m	300 m

Área	Número do Perfil	Arranjo	Espaçamento Eletródico	Extensão
	Linha B	Dipolo-Dipolo	50 m	750 m
	Linha B	Polo-Dipolo	50 m	750 m
	Linha B	Dipolo-Dipolo	25 m	425 m
	Linha B	Polo-Dipolo	25 m	425 m
B	Linha C	Dipolo-Dipolo	50 m	750 m
	Linha C	Polo-Dipolo	50 m	750 m
	Linha C	Dipolo-Dipolo	25 m	425 m
	Linha C	Polo-Dipolo	25 m	425 m

CAPÍTULO 5

5 ARTIGO CIENTÍFICO

Polarização Induzida, Eletroresistividade e Difractometria de Raios-X na Determinação da Assinatura Geofísica de Depósitos Minerai s Sulfetados

Resumo

A área de estudo foi localmente afetada pelo metamorfismo de contato do granito São Vicente. O depósito mineral é sulfetado com minerais de chumbo e zinco, e apresenta-se em veios, brechas e disseminado. Foram utilizados os métodos da eletroresistividade, polarização induzida no domínio do tempo e difractometria de raios-x para determinar a assinatura geofísica da mineralização, bem como colaborar com o entendimento da gênese do depósito. Os resultados indicam que as regiões de presença do mineral galena possuem maiores valores de cargabilidade, ao contrário das zonas com mais esfalerita. Os valores de resistividade das zonas mineralizadas variam entre 80 e 300 ohm.m, enquanto o efeito de cargabilidade nessas regiões pode chegar a até 32 mV/V.

Palavras-chave: resistividade elétrica; polarização induzida; difractometria de raios-x

Abstract

The study area was locally affected by São Vicente's contact metamorphism. The sulphide mineral deposit has lead and zinc and is represented through dissemination, veins and breccias. Were used electrical resistivity and induced polarization methods, and also x-ray powder diffractometry to determine mineralization's geophysical signature, as well as understand deposit's genesis. Results indicates that mineral galena has influence in higher values of chargeability, differently of sphalerite zones. Resistivity values of mineralized zones varies between 80 and 300 ohm.m meanwhile chargeability effect in those regions can come up to 32 mV/V.

Keywords: *electrical resistivity; induced polarization; x-ray powder diffractometry*

5.1 Introdução

A utilização de métodos geofísicos aplicados à mineração tem sido cada vez mais ampla no setor minerário brasileiro, devido à sua contribuição na redução dos riscos do processo de exploração, bem como o direcionamento à descoberta de depósitos minerais. A área de estudo está inserida na Baixada Cuiabana, em um contexto geológico de metamorfismo de contato. As evidências em superfície dos veios de galena (PbS) e esfalerita (ZnS) indicam que a mineralização é proveniente de fluídos enriquecidos que percolaram entre as fraturas durante o processo de gênese da encaixante (Moreira, 2018). A presença de corpos graníticos batólitos reforça esta teoria.

Através da aplicação da geofísica rasa e métodos laboratoriais de análise de difração dos raios-x, busca-se determinar se a assinatura geofísica dos depósitos mineralizados, bem como sua continuidade lateral e em profundidade. Além disso, objetiva-se alcançar uma correlação direta entre o tipo de sulfeto do depósito e seus reflexos nas anomalias de cargabilidade registradas.

5.2 Contexto Geológico

A área de estudo deste trabalho (Figura 5-1) localiza-se no Grupo Cuiabá, na formação Coxipó, que foi afetada localmente pelo metamorfismo de contato do granito São Vicente (Tokashiki & Saes, 2008), e apresenta aspectos hidrotermais que indicam a ocorrência de processos de carbonatização e sulfetação (Moreira, 2018). As mineralizações que ocorrem no pacote metassedimentar estão associadas à intrusão granítica supracitada (Moreira, 2018).

O granito São Vicente apresenta registros de processos hidrotermais, além de paragêneses de metamorfismo de contato (Manzano, Godoy, & Araújo, 2008). Godoy, Ruiz, Manzano, & Araújo-Ruiz (2007) descrevem-o como um batólito de intrusão epizonal devido às características de suas fácies texturais (Trivelli, Pierosan, & Ruiz, 2017).

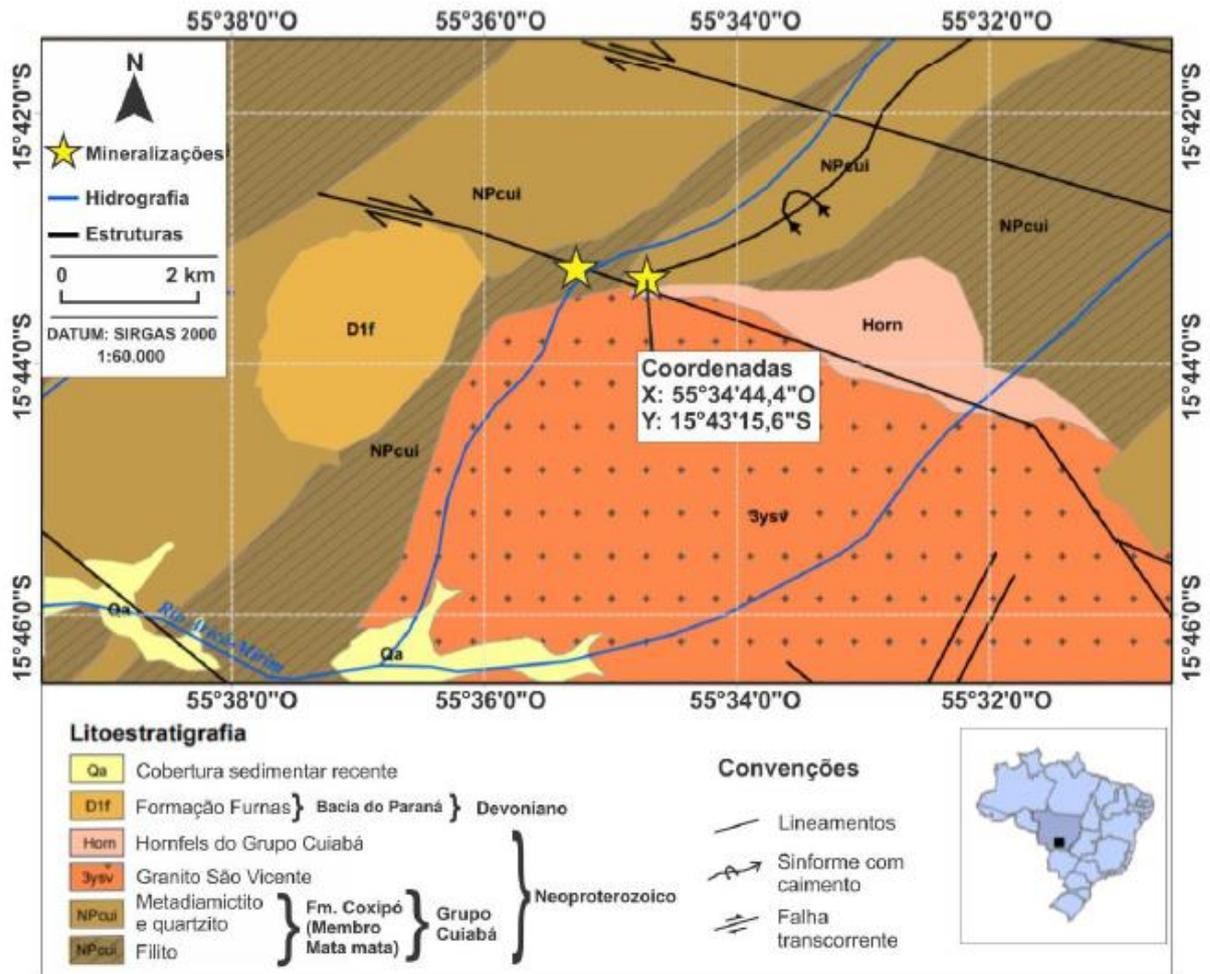


Figura 5-1. Mapa geológico do depósito Ranchão. Retirado de (Silva e Souza, Garcia, Barboza, & Cavalcante, 2021) (no prelo)

A mineralização alvo de estudo do trabalho, o depósito Pb-(Zn) Ranchão, encontra-se na auréola de metamorfismo de contato entre o batólito São Vicente e os metadiamiclitos da formação Coxipó, no grupo Cuiabá, metamorfisados nas fácies xisto verde e hornblenda *hornfels* (Silva e Souza, Garcia, Barboza, & Cavalcante, 2021) (no prelo). As zonas mineralizadas são preenchidas por galena, pirita e esfalerita, e as características do depósito indicam que sua gênese corresponde a um sistema meso a epitermal

5.3 Metodologia

5.3.1 Aquisição dos Dados

A execução das campanhas de eletrorresistividade (ER) e polarização induzida (IP) no domínio do tempo (Figura 5-2) foram realizadas com o objetivo de identificar a assinatura geofísica das mineralizações associadas ao depósito plumbo-zincífero Ranchão.

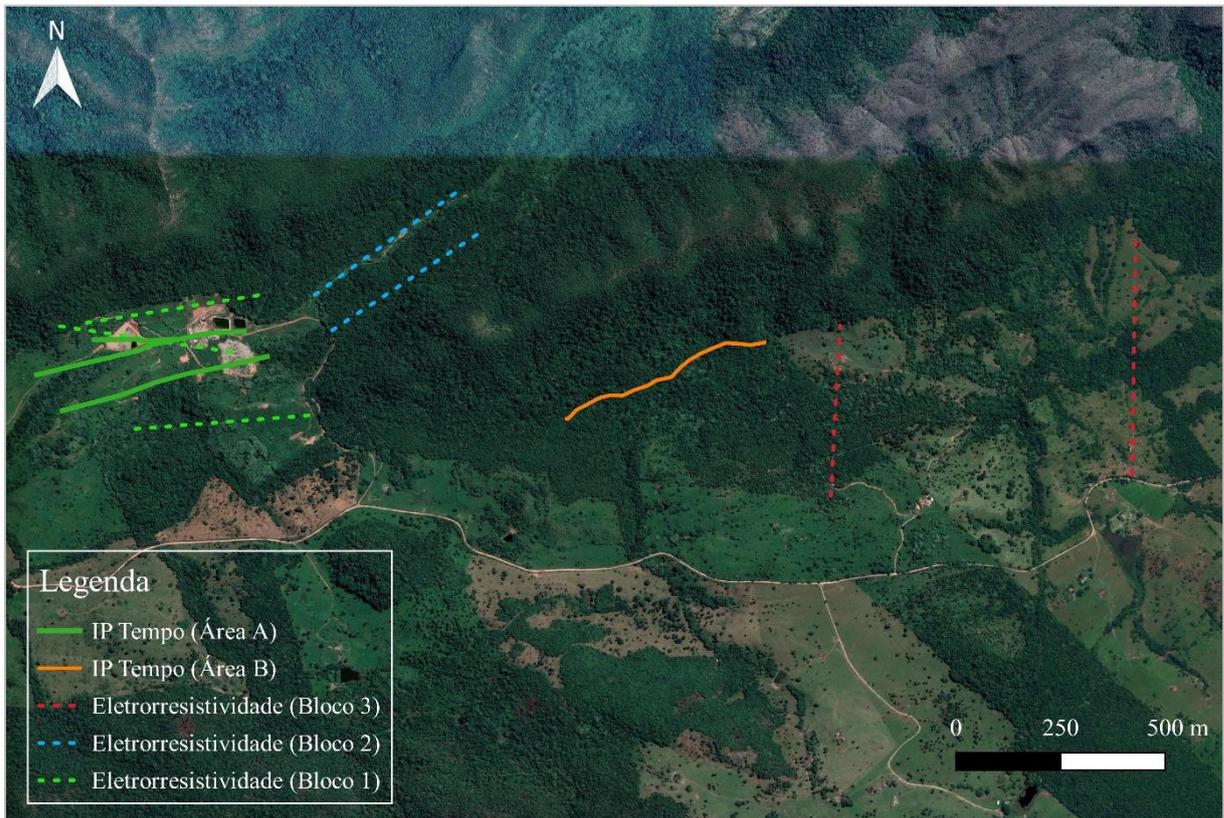


Figura 5-2. Localização dos perfis de ER e IP

Dentre os parâmetros utilizados na aquisição dos dados de ER (Figura 5-3), foram selecionados os perfis adquiridos com a técnica do caminhamento elétrico 2D, arranjo dipolo-dipolo, ciclos de leitura de 2000 ms, tensão de 400 V e espaçamento eletródico padrão de 10 metros.

No que tange a coleta dos dados de IP (Figura 5-4), a injeção de corrente enviada à subsuperfície variou entre 500 mA e 5A, com ciclos de leitura de 2000 ms. No método IP serão apresentadas as seções da resistividade elétrica e as seções da cargabilidade, ambas com os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, com espaçamentos de 50 metros e 25 metros.

No caso da Área A, os perfis de IP no domínio do tempo foram adquiridos com espaçamento de 10 metros, de modo a compensar o efeito da razão sinal/ruído em comparação com os demais espaçamentos (nos primeiros metros da subsuperfície). Além disso, foi realizada uma modelagem tridimensional da cava (Área A e Bloco 1), dada a densidade de informações na região.



Figura 5-3. Operação do Syscal Pro na aquisição do método ER



Figura 5-4. Operação do Elrec Pro na aquisição do método IP

5.3.2 Processamento dos Dados

A rotina de processamento dos dados de eletrorresistividade abrangeu os procedimentos de análise quantitativa dos valores de resistividade no *software* Prosys III, remoção de pontos espúrios de resistividade e retirada de medições com alta resistência de contato (acima de 30K Ohm). Os dados foram exportados para o *software* Res2Dinv, onde foi realizada a inversão de mínimos quadrados com filtro vertical de 2:1. Para a modelagem e interpolação 3D, foi utilizado o Oasis Montaj, da empresa Seequent.

O fluxo de processamento dos dados da polarização induzida consistiu na análise qualitativa das curvas de decaimento da cargabilidade e remoção de pontos espúrios com o *software* Prosys III (Iris Instruments). Após o preparo dos arquivos conforme o respectivo espaçamento, foi realizada a técnica “*mixed array*” com o *software* Res2Dinv, da empresa Geotomo. Essa técnica habilita a inversão conjunta dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo. No mesmo *software*, o modelo de blocos foi ajustado de modo a conferir melhor ajuste durante a inversão. O filtro vertical foi aplicado nos dados de IP domínio do tempo por tratar-se de um levantamento em região de mineralização de preenchimento de fraturas, cuja tendência do modelo é a identificação de estruturas verticais. Após a inversão, os dados foram exportados para o *software* Oasis Montaj, para modelagem e interpolação 3D. As interpretações das seções foram executadas no *CorelDraw Graphics Suite 2021*.

5.3.3 Análise Laboratorial (DRX)

Após a etapa de campo e processamento dos dados foi realizada a análise laboratorial de difratometria de raios-x (DRX) dos fragmentos de furos de sonda que interceptam e/ou estão próximos aos perfis executados neste trabalho. Os processos para análise de DRX consistem em fragmentação da amostra com martelo geológico, e posterior refinamento com pilão de ágata, de modo a deixá-la com a granulometria tão fina quanto a argila.

Foram analisadas 10 amostras no difratômetro RIGAKU (modelo Geiger Flex D-Max-B) do Laboratório de Difratometria de Raios-X no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. As amostras apresentam evidências da encaixante da mineralização, veios mineralizados com sulfetos, metadiamicritos e veios carbonáticos. Os registros de todas as amostras estão presentes no **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Nesta seção serão apresentados os fragmentos referentes ao Furo 18, que intercepta a Linha C, na Área B e os fragmentos da mineralização e da encaixante na região da cava (Área A) (Figura 5-5 a Figura 5-8).



Figura 5-5. Fragmento da encaixante (Área A e cava)
[Furo 02, 36.30 m]



Figura 5-6. Fragmento de veio mineralizado com sulfetos da cava de minérios (Área A) [Furo 02, 50.35m]



Figura 5-7. Fragmento de veio mineralizado com alto teor de zinco (Área B) [Furo 18, 74.90 m]



Figura 5-8. Fragmento de veio mineralizado de composição desconhecida (Área B) [Furo 18, 72.70 m]

5.4 Resultados

5.4.1 Eletrorresistividade

As seções de eletrorresistividade a serem apresentadas ao longo desta seção são referentes ao trabalho executado no Bloco 1 e Área A (Figura 5-9), devido à densidade de informações. As demais seções estão dispostas no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

O trabalho de Silva e Souza *et. al.* (2021, no prelo) sobre a tipologia das mineralizações do depósito Ranchão conclui que as maiores concentrações de minérios correspondem às zonas de falhas, nas quais é encontrado o minério brechado. Ao considerar os estudos geológicos supracitados, entende-se que a resposta geofísica proposta pelo método da eletrorresistividade é de baixa resistividade nas regiões mineralizadas (devido ao preenchimento de fraturas), geometria aproximadamente vertical, e resistividade adjacente mais alta referente à rocha encaixante da mineralização, metamorfisada na fácies *hornfels* (Moreira, 2018) (Silva e Souza, Garcia, Barboza, & Cavalcante, 2021) (no prelo).

Os perfis 1, 2 e 3, com espaçamento de 10 metros, arranjo dipolo-dipolo no método da eletrorresistividade estão dispostos na Figura 5-10, em conjunto com o perfil B da resistividade associada à polarização induzida no domínio do tempo, com espaçamento de 25 metros e arranjo polo-dipolo. Nota-se uma correlação aproximadamente N/S de uma estrutura vertical de baixa resistividade em todos os perfis, com valores resistivos que variam entre 80 ohm.m e 255 ohm.m.



Figura 5-9. Imagem de satélite dos perfis geofísicos utilizados nesta seção

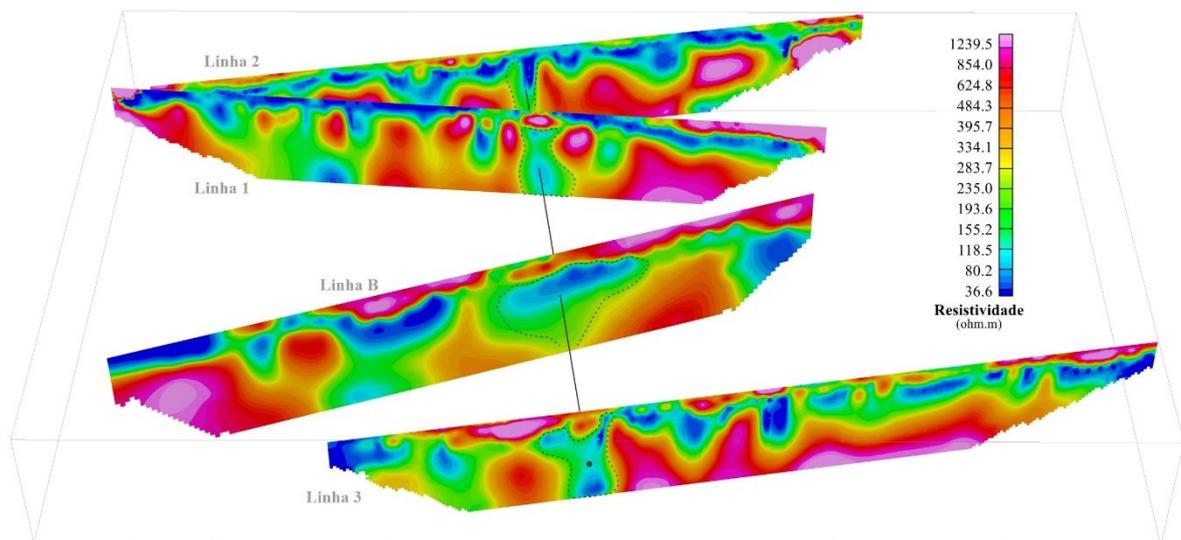


Figura 5-10. Perfis 1, 2, 3 e B espacializados no Bloco 1 e Área A (região da cava) com evidência de continuidade da mineralização observada em superfície

A partir das seções no modelo tridimensional, foi realizada uma interpolação através do método *kriging*, com células de 16 metros. O foco da interpolação é obter uma estimativa tridimensional do comportamento do corpo com base nos dados de entrada coletados em campo. A Figura 5-10 apresenta o modelo obtido a partir da modelagem, bem seções extraídas nas profundidades 20, 40, 60 e 80 metros, respectivamente. O modelo sugere não somente a continuidade da região mineralizada em profundidade, como também lateralmente ao longo de todo o bloco, interpretada pelos valores de resistividade na faixa de 100 a 400 ohm.m (nota-se que região mineralizada inclui tanto a mineralização maciça quanto disseminada).

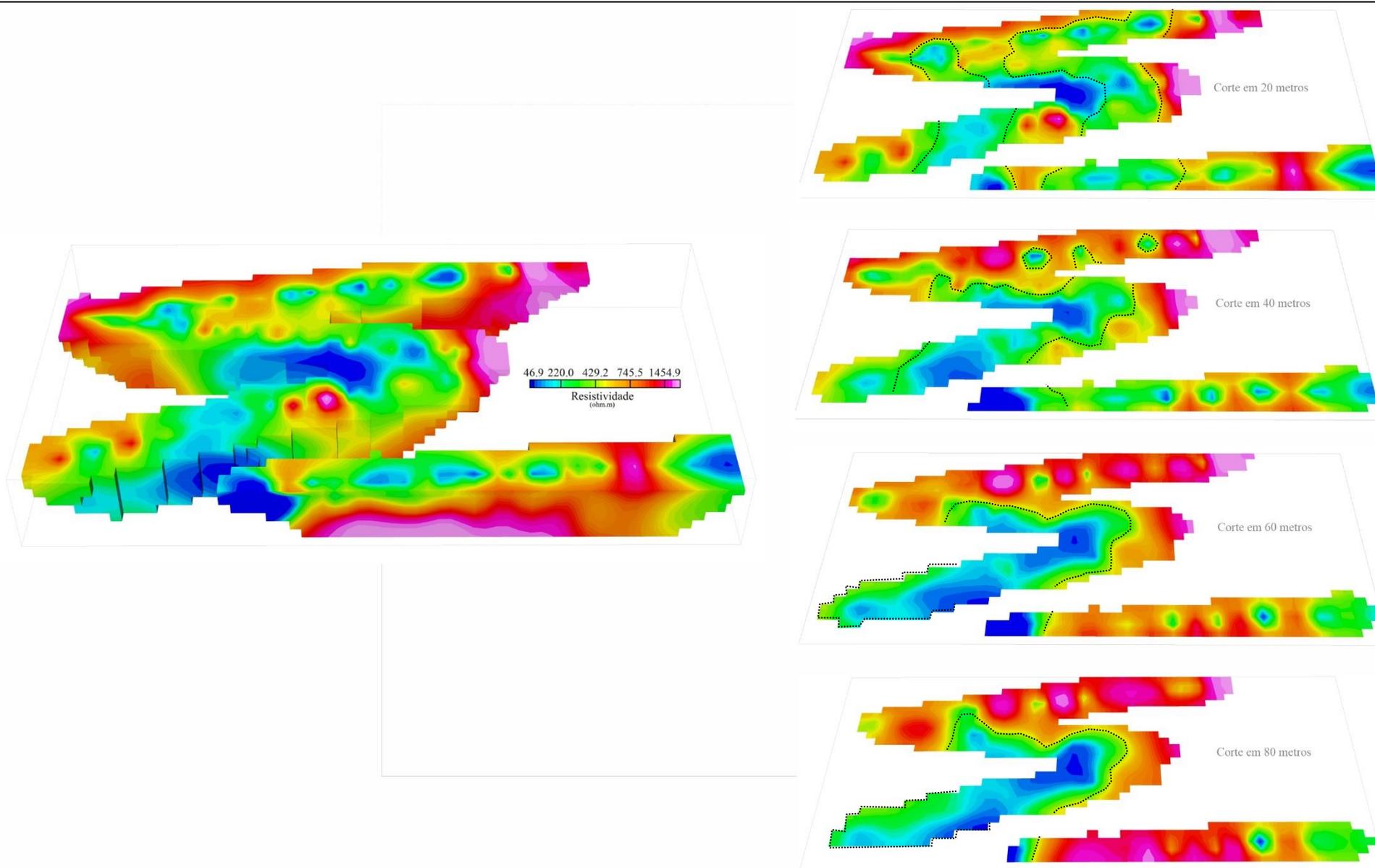


Figura 5-11. Modelo tridimensional da área mineralizada com base nos perfis de eletrorresistividade do Bloco 1 e resistividade da área A

5.4.2 Polarização Induzida

As seções a serem apresentadas ao longo desta seção são referentes ao trabalho executado nas áreas A e B, com espaçamento de 50 e 10 metros devido à densidade de informações. As demais seções estão dispostas no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, devidamente interpretadas.

5.4.2.1 Área A

O foco da aquisição geofísica na área A consistiu em obter a assinatura geofísica da mineralização exposta na cava (Figura 5-12). O centro do perfil foi posicionado para o registro mais completo do objeto da pesquisa, de modo a possibilitar uma correlação direta entre o dado adquirido e a evidência de campo.



Figura 5-12. Foto-croqui da aquisição do perfil A para obter a assinatura geofísica do depósito na área de estudo (a seta indica o ponto de referência sob dois ângulos distintos)

O padrão esperado para a resistividade é coerente com a aquisição eletrorresistiva supracitada, dado que a mineralização preenche as fraturas, ou seja, a resistividade tende a ser mais baixa em comparação às áreas adjacentes (i.e., rocha encaixante). O efeito de cargabilidade, por outro lado, é sensível ao minério maciço, porém também ao minério disseminado. De acordo com Silva e Souza *et. al.* (2021, no prelo), o minério disseminado não

é parte do halo de alteração dos veios, o que corrobora com a interpretação direta de que as anomalias de alta cargabilidade observadas associadas a regiões de baixa resistividade verticalizadas estejam associadas à mineralização (Figura 5-13).

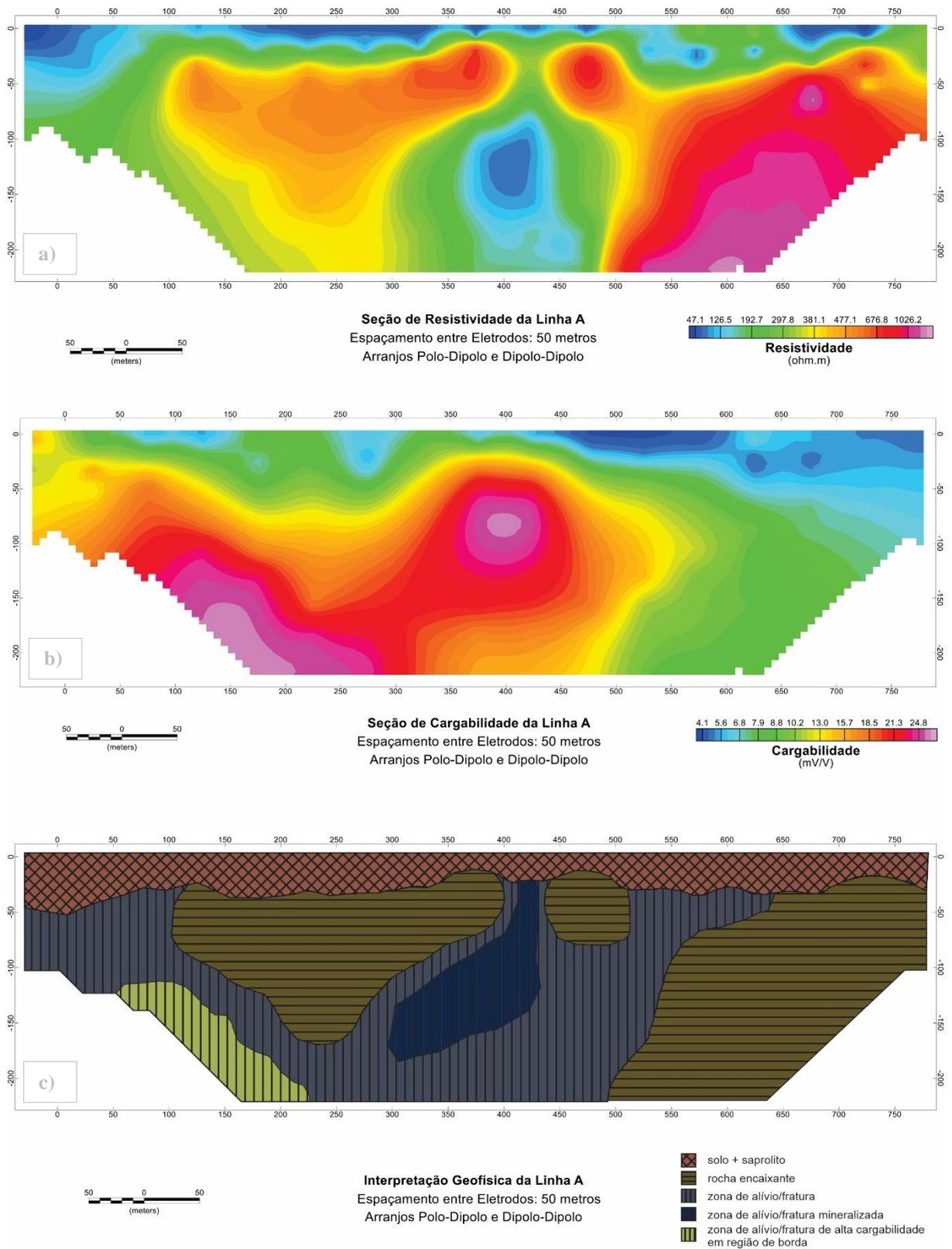


Figura 5-13. Seções a) de resistividade; b) de cargabilidade; c) de interpretação geofísica; da Linha A, com espaçamento de 50 metros e arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo

5.4.2.2 Área B

O levantamento na Área B teve foco na interceptação de um furo de sondagem realizado pela mineradora PSM Mining, onde foi encontrada uma mineralização com teores de esfalerita até 15 vezes maiores que na área A. Em termos de resistividade, configura-se o mesmo padrão observado na Área A: resistividade baixa, geometria vertical.

A análise do efeito de cargabilidade difere da assinatura já vista nas áreas do depósito Ranchão, com valores anômalos, todavia mais baixos. Esta característica pode estar associada à baixa polarização da esfalerita (ZnS) em contraste com a galena. Alguns valores de tempo de descarga encontrados na literatura para a concentração de 1% de mineral nas amostras, de acordo com Telford, Geldart, & Sheriff (1990), é de: 13.4 ms (pirita), 3.7 ms (galena) e 0.0 ms (hematita) (Boniatti, et al., 2014). O tempo de descarga para a esfalerita não foi encontrado.

A Figura 5-14 apresenta as seções de resistividade, cargabilidade e interpretação geofísica da Linha C, executada na Área B. Os valores de resistividade interpretados como zona mineralizada variaram entre 80 e 250 ohm.m, enquanto os valores de cargabilidade mais altos chegaram a cerca de 8.0 mV/V no centro da anomalia. A interpretação geofísica foi realizada aliada às informações geológicas da área, em conformidade com o *background* da literatura. Não é possível determinar se a anomalia corresponde de fato à uma zona mineralizada, devido à ausência de informações na região, portanto, na seção de interpretação, a zona foi descrita como “zona de alívio/fratura com contraste local de cargabilidade”.

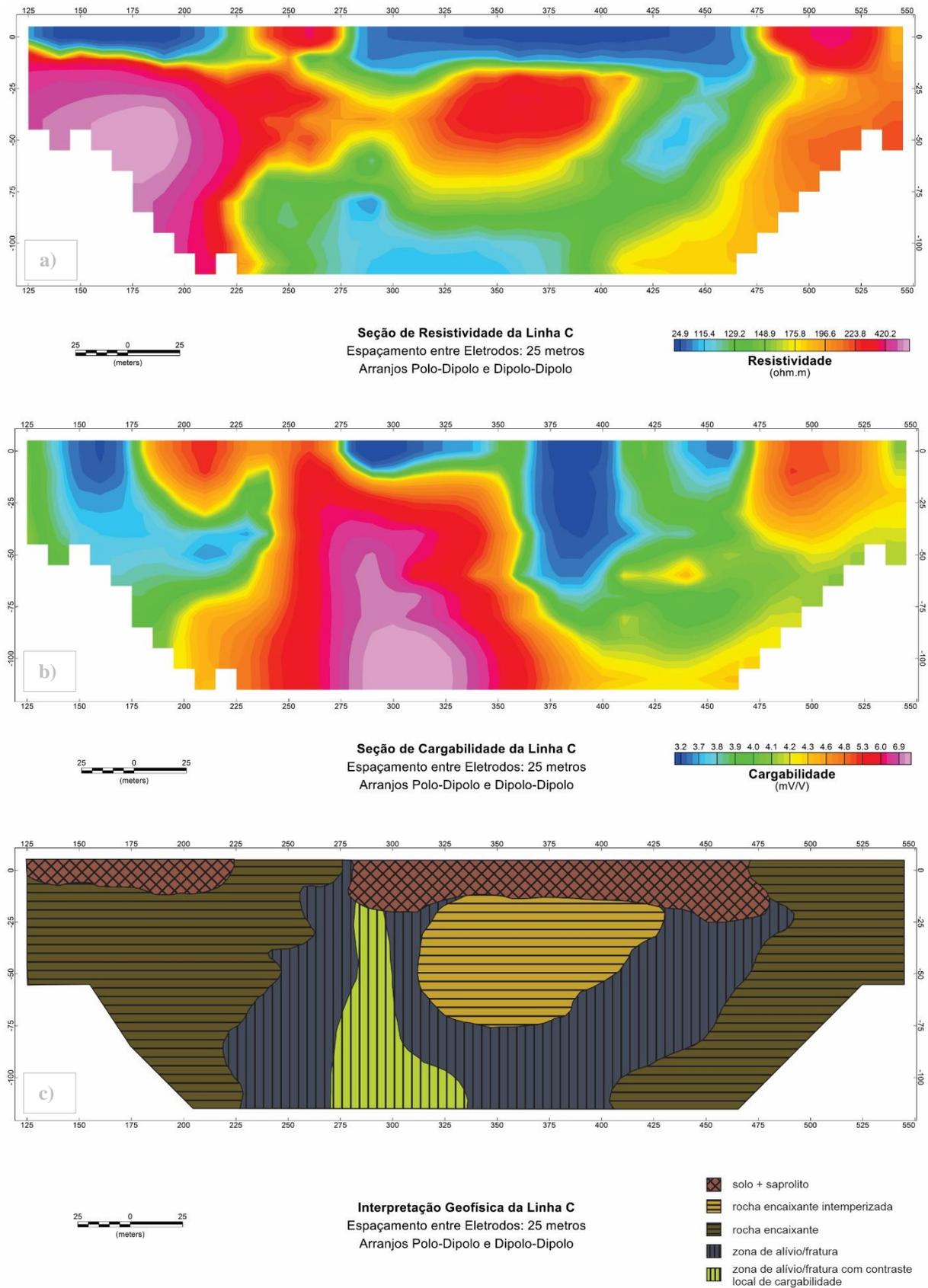


Figura 5-14. Seções a) de resistividade; b) de cargabilidade; c) de interpretação geofísica; da Linha C, com espaçamento de 25 metros e arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo

5.4.3 Difratom e tria de Raios-X

Os resultados de difratometria de raios-x obtidos após a análise laboratorial revelaram a presença de minerais específicos além dos esperados, como ferroactinolita, montmorilonita, laumontita, saponita, corrensit a, tremolita, clinocloro, entre outros. Devido à análise do padrão de difração, não é possível determinar a quantidade de cada mineral.

Na amostra 01, que corresponde ao fragmento do Furo 02 na profundidade de aproximadamente 36 metros na rocha encaixante alocado na cava de minérios, foram detectados cerca de 9 minerais através de padrões de difração distintos (Figura 5-15). Dentre eles, os únicos sulfetos foram a galena (PbS) e a esfalerita (ZnS). De acordo com Silva e Souza *et. al.* (2021, no prelo), a presença de sulfetos na encaixante está relacionada ao seu formato disseminado. A amostra 02, fração do veio mineralizado com sulfetos da cava de minérios na profundidade de 50.35 metros, apresentou resultados de DRX (Figura 5-16) que identificaram a presença de, além da galena, pirita e arsenopirita.

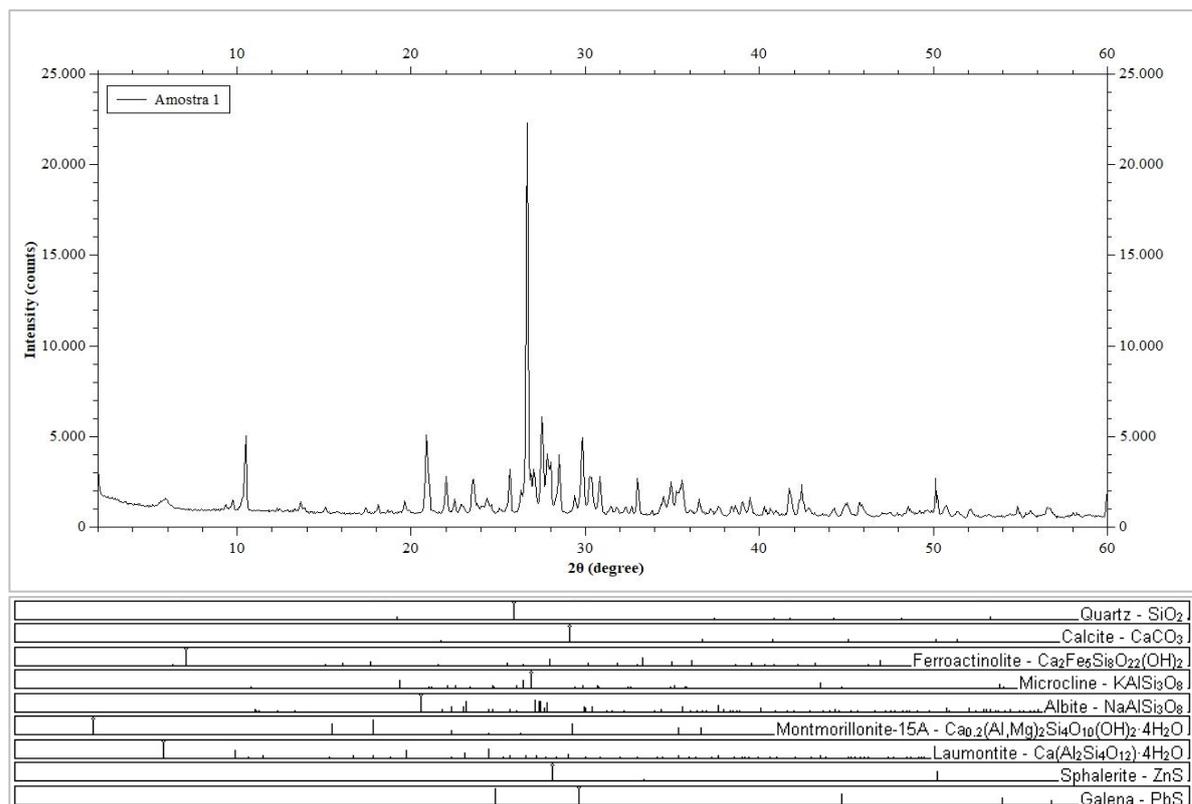


Figura 5-15. Difratom e tria da amostra 01

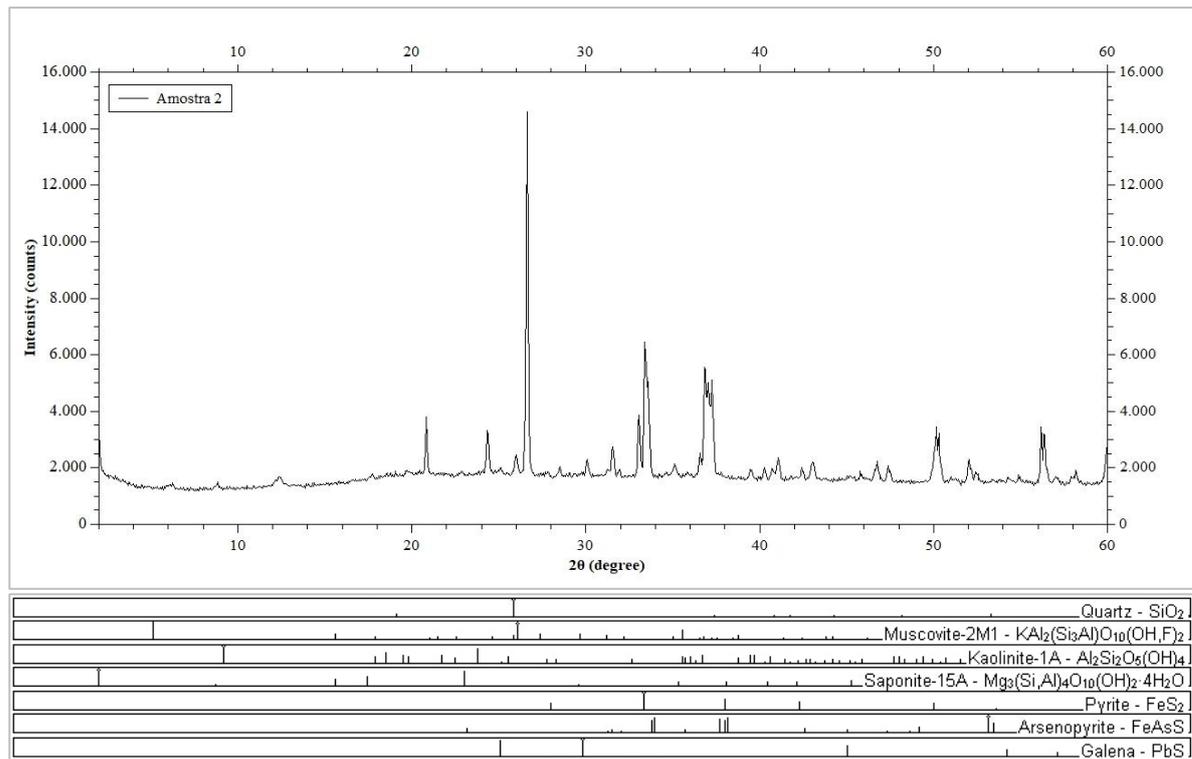


Figura 5-16. Difrato grama da amostra 02

No furo 18, foram analisadas duas amostras: a amostra 06, referente à mineralização à profundidade de 74,90 metros e a amostra 10, de composição desconhecida e profundidade aproximada de 72 metros. O difratograma da amostra 06 apresenta os dois sulfetos identificados: pirita e esfalerita, o que corrobora com a hipótese de que as anomalias de cargabilidade na Área B podem estar diretamente associadas à presença de esfalerita em detrimento da ausência da galena, dada a baixa polarização do mineral (ZnS). A amostra 10 revelou através do padrão de difração dos raios-x a presença de apenas esfalerita como sulfeto em sua composição, reforçando a hipótese levantada anteriormente.

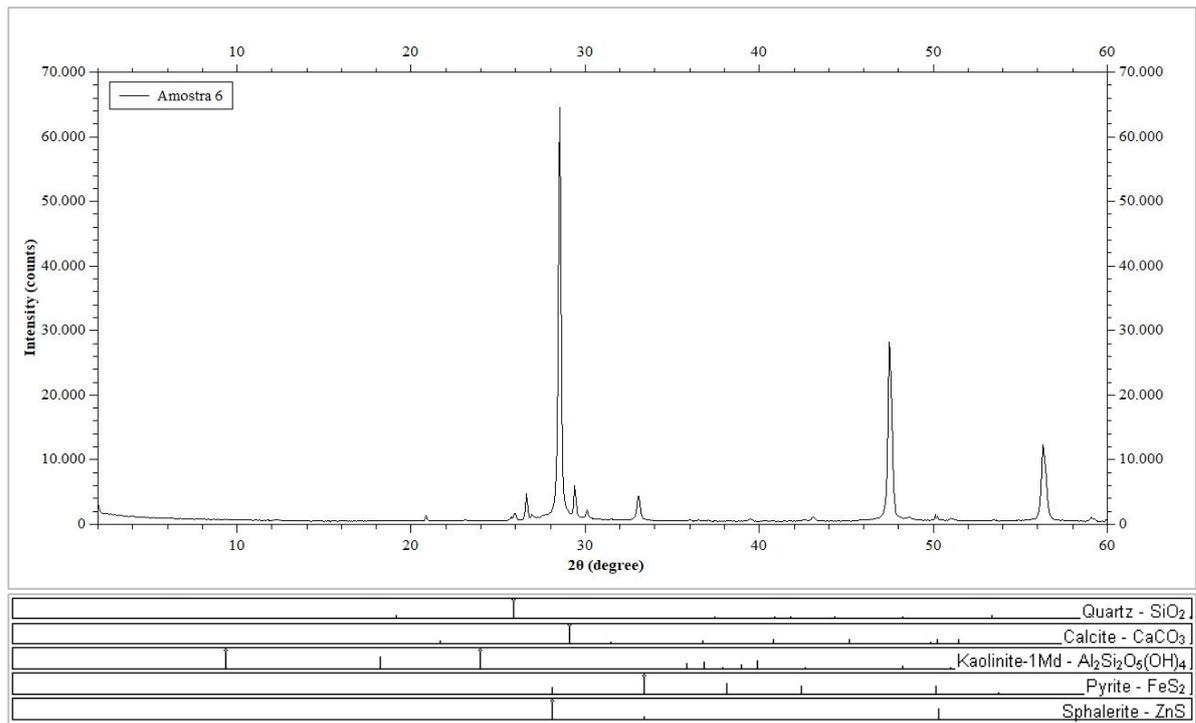


Figura 5-17. Difratoograma da amostra 06

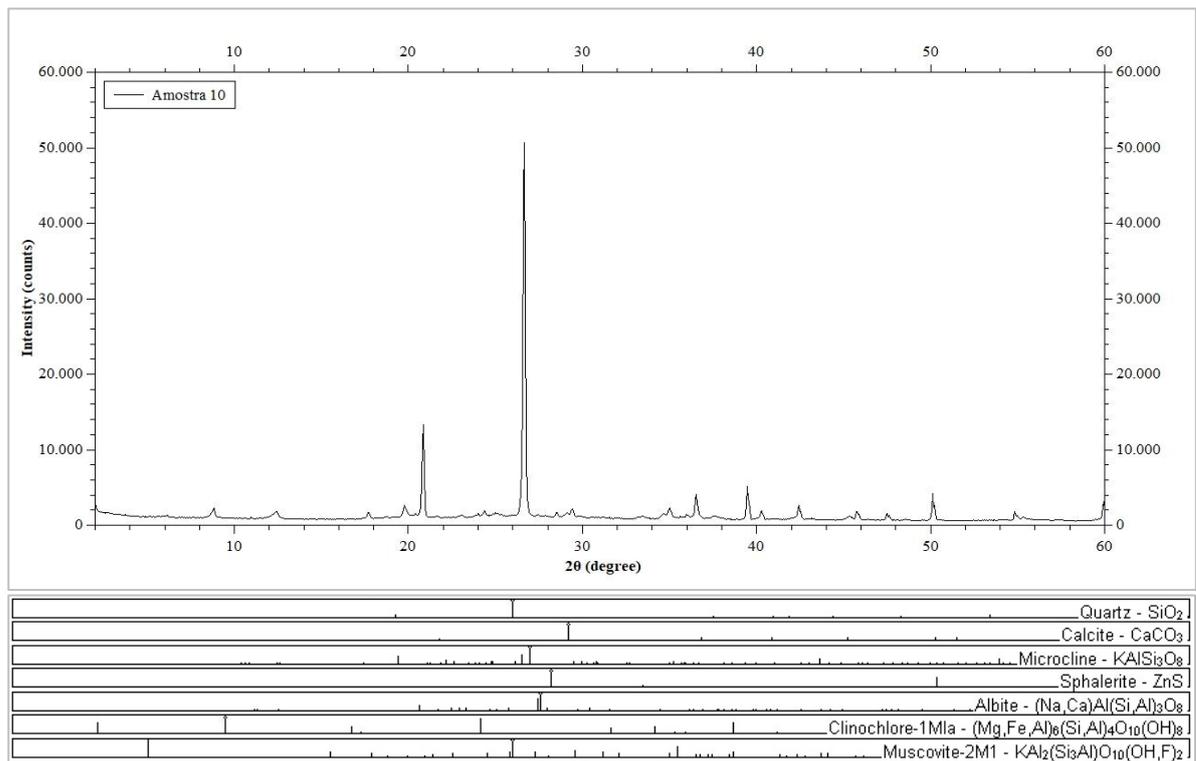


Figura 5-18. Difratoograma da amostra 10

5.5 Conclusão

O depósito Ranchão possui gênese ainda pouco conhecida e são necessários mais estudos para entender sua geometria. Os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida

no domínio do tempo se mostraram eficientes no que tange a delimitação das zonas mineralizadas, bem como a continuidade lateral e vertical da mineralização.

A diferenciação entre os tipos de mineralização pode ser abordada com o devido cuidado de posse do método IP domínio do tempo, visto que a anomalia de cargabilidade alta está associada a veios e brechas mineralizadas (já que os halos que alteração dos veios não possuem sulfetação disseminada).

Não há comprovação de que todas as fraturas associadas à gênese do batólito São Vicente foram preenchidas por fluidos hidrotermais enriquecidos, todavia, é um bom modo de verificar a geometria de possíveis mineralizações com porte comercial para extração (alocando furos prospectivos em veios, associados à estudos geológicos e geoquímicos).

O uso da difratometria de raios-x corrobora com a hipótese de que os valores das anomalias de cargabilidade tendem a ser muito menores (em mV/V) nas regiões de predominância da esfalerita. Apesar deste fato não ser citado com frequência na literatura, este sulfeto (ZnS) pode ser uma das exceções à aplicabilidade ideal do método IP no domínio do tempo, a depender da geometria da mineralização e associação mineral do depósito.

5.6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de Brasília, em especial ao Instituto de Geociências e ao Laboratório de Geofísica Aplicada, bem como aos técnicos de campo João e Péricles, à geofísica Amanda, ao geólogo Teotônio e à PSM Mining, pelo subsídio à realização desta pesquisa.

5.7 Referências

- Boniatti, J. H., Fruchting, A., do Lago, S. B., Neto, F. T., Travassos, R. P., & de Freitas, R. F. (2014). *Avaliação da Resposta do Método da Polarização Induzida sobre Mineralizações Sulfetadas do Depósito Polimetálico Santa Maria, Minas do Camaquã - RS*. VI Simpósio de Geofísica (p. 6). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica.
- Moreira, J. d. (2018). *Mapeamento Lito-Estrutural Aplicado à Prospecção de Pb na Região do Depósito de Ranchão, Município de Santo Antônio de Leverger, Mato Grosso (Faixa Paraguai)*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Geociências, Cuiabá.

- Silva e Souza, H. R., Garcia, P. M., Barboza, E. d., & Cavalcante, F. E. (2021). *Tipologia das Mineralizações e Química Mineral do Depósito de Pb-(Zn) Ranchão, Zona Interna da Faixa Paraguai, Mato Grosso, Brasil*. Geologia USP - Série Científica - Artigo Submetido em 2021, 43. no prelo.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Tokashiki, C. d., & Saes, G. S. (dezembro de 2008). *Revisão Estratigráfica e Faciologia do Grupo Cuiabá no Alinhamento Cangas-Poconé, Baixada Cuiabana, Mato Grosso*. Revista Brasileira de Geociências, 38(4), 661-675.
- Trivelli, G. G., Pierosan, R., & Ruiz, A. S. (setembro de 2017). *Geologia e Petrologia do Granito São Vicente na Região do Parque Estadual Águas Quentes, Estado de Mato Grosso, Brasil*. Geologia USP, Série Científica, 17(3), 29-48. doi:10.11606/issn.2316-9095.v17-426

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O depósito Ranchão possui gênese ainda pouco conhecida e são necessários mais estudos para entender sua geometria. Os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida no domínio do tempo se mostraram eficientes no que tange a delimitação das zonas mineralizadas, bem como a continuidade lateral e vertical da mineralização.

A diferenciação entre os tipos de mineralização pode ser abordada com o devido cuidado de posse do método IP domínio do tempo, visto que a anomalia de cargabilidade alta está associada a veios e brechas mineralizadas (já que os halos que alteração dos veios não possuem sulfetação disseminada).

Não há comprovação de que todas as fraturas associadas à gênese do batólito São Vicente foram preenchidas por fluidos hidrotermais enriquecidos, todavia, é um bom modo de verificar a geometria de possíveis mineralizações com porte comercial para extração (alocando furos prospectivos em veios, associados à estudos geológicos e geoquímicos).

O uso da difratometria de raios-x corrobora com a hipótese de que os valores das anomalias de cargabilidade tendem a ser muito menores (em mV/V) nas regiões de predominância da esfalerita. Apesar deste fato não ser citado com frequência na literatura, este sulfeto (ZnS) pode ser uma das exceções à aplicabilidade ideal do método IP no domínio do tempo, a depender da geometria da mineralização e associação mineral do depósito.

Os métodos da polarização induzida no domínio do tempo e da eletrorresistividade se mostraram eficientes no que tange o imageamento de estruturas mineralizadas a até 100 metros

de profundidade, com larguras maiores que 15 metros. A depender do equipamento e arranjo utilizado, a logística não compensa a resolução a ser obtida. Neste trabalho, foi necessário adquirir cerca de 8.000 km em IP no domínio do tempo em somente três áreas para obter boa resolução aliada à alta profundidade.

Os próximos passos para expansão deste estudo devem ser a integração com outros métodos geofísicos, como por exemplo a magnetometria, devido à associação da mineralização com a estrutural e a gravimetria, dada a presença da galena confirmada em quase todas as amostras analisadas na difratometria de raios-x. *A priori*, não é indicada a orientação de mais furos prospectivos na área sem a realização de estudos mais complexos de geofísica e geoquímica, além de complementação das informações geológicas.

CAPÍTULO 7

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17, 1-29. doi:10.1016/0012-8252(81)90003-9
- Almeida, F. F., Hasui, Y., Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1977). Províncias Estruturais Brasileiras. *Atas do VIII Simpósio de Geologia do Nordeste* (pp. 363-391). Campina Grande: Universidade de São Paulo.
- Alvarenga, C. J. (setembro de 1988). Turbiditos e a Glaciação do Final do Proterozóico Superior no Cinturão Paraguai, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 323-327.
- Alvarenga, C. J., & Trompette, R. (março de 1993). Evolução Tectônica Brasileira da Faixa Paraguai: A Estruturação da Região de Cuiabá. *Revista Brasileira de Geociências*, 18-30.
- Binley, A., & Kemna, A. (2005). DC Resistivity and Induced Polarization Methods. Em S. Hubbard, & Y. Rubin, *Hydrogeophysics* (pp. 129-156). Netherlands: Springer.
- Boniatti, J. H., Fruchting, A., do Lago, S. B., Neto, F. T., Travassos, R. P., & de Freitas, R. F. (2014). Avaliação da Resposta do Método da Polarização Induzida sobre Mineralizações Sulfetadas do Depósito Polimetálico Santa Maria, Minas do Camaquã - RS. *VI Simpósio de Geofísica* (p. 6). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica.

- Campos, L. F. (2017). *Da Sedimentação à Anquizona: Evolução dos Pelitos Neoproterozoicos do Grupo Bambuí definidas pela Composição Mineral e pelo Índice de Kubler Calibrado de acordo com o Índice Padrão de Cristalinidade*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília.
- Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-Ray Diffraction*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with 10 Electrode Arrays. *Geophysical Prospecting*, 379-398.
- Dardenne, M. A., & Schobbenhaus, C. (2001). *Metalogênese do Brasil* (1ª ed.). Brasília: Universidade de Brasília.
- Dendith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. London: Cambridge University Press.
- Dinnebier, R. E., & Billinge, S. J. (2008). *Powder Diffraction: Theory and Practice*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Edwards, L. S. (August de 1977). A Modified Pseudosection for Resistivity and IP. *Geophysics*, 42(5), 1020-1036.
- Frasca, A. A. (2015). *Amálgamas do W-Gondwana na Província Tocantins*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília.
- Godoy, A. M., Cavalcante Pinho, F. E., Manzano, J. C., Araújo, L. M., Silva, J. A., & Figueiredo, M. (2010). Estudos Isotópicos das Rochas Granitoides Neoproterozoicas da Faixa de Dobramento Paraguai. *Revista Brasileira de Geociências*, 380-391.
- Godoy, A. M., Ruiz, A. S., Manzano, J. C., & Araújo-Ruiz, L. M. (2007). Os Granitóides Brasileiros da Faixa de Dobramentos Paraguai, MS e MT. *Geologia USP, Série Científica*, 7(1), 29-44. doi:10.5327/Z1519-874x2007000100003
- Jenkins, R., & Snyder, R. (1996). *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. Alemanha: Wiley.
- Luiz, J. G. (2013). *Geofísica na Prospecção Mineral: Guia para Aplicação*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica.

- Luz, J. d., Oliveira, A. d., Souza, J. O., Motta, J. M., Tanno, L. C., de Souza, N. B., & Filho, W. A. (1980). *Projeto Coxipó: Relatório Final - Fase II Fotointerpretação*. Relatório Técnico-Científico, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Departamento Nacional de Produção Mineral.
- Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D., & Brito Neves, B. B. (2004). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (1ª ed.). São Paulo, São Paulo, Brasil: Beca.
- Manzano, J. C., Godoy, A. M., & Araújo, L. M. (2008). Contexto Tectônico dos Granitoides Neoproterozoicos da Faixa de Dobramentos Paraguai, MS e MT. *Revista Geociências*, 27(4), 493-507.
- Millikan, R. A. (1917). *Elements of Electricity: A Practical Discussion of the Fundamental Laws and Phenomena of Electricity and Their Practical Applications in the Business and Industrial World*. Chicago, Illinois, United States of America: American Technical Society.
- Moreira, J. d. (2018). *Mapeamento Lito-Estrutural Aplicado à Prospecção de Pb na Região do Depósito de Ranchão, Município de Santo Antônio de Leverger, Mato Grosso (Faixa Paraguai)*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Geociências, Cuiabá.
- Nelson, P. H., & Voorhis, G. D. (1983). Estimation of Sulfide Content from Induced Polarization Data. *Geophysics*, 62-75.
- Okuno, E., & Yoshimura, E. (2010). *Física das Radiações*. (J. G. Tundisi, L. E. Sánchez, & P. Helene, Eds.) São Paulo, São Paulo, Brasil: Oficina de Textos.
- Orellana, E. (1972). *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Madrid: Alco Artes Gráficas.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical Resistivity Survey in Soil Science: A Review. *Soil and Tillage Research*, 173-193. doi:10.1016/j.still.2004.10.004

- Silva e Souza, H. R., Garcia, P. M., Barboza, E. d., & Cavalcante, F. E. (2021). Tipologia das Mineralizações e Química Mineral do Depósito de Pb-(Zn) Ranchão, Zona Interna da Faixa Paraguai, Mato Grosso, Brasil. *Geologia USP - Série Científica - Artigo Submetido em 2021*, 43.
- Silva, A. L. (2013). *Caracterização Mineralógica por Difração de Raios X e a Determinação de Terras Raras por ICP-MS de Rochas da Região Sul da Bahia*. Escola de Engenharia. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- Speakman, S. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Sumner, J. S. (1976). *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Arizona: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- The Nobel Prize. (07 de Janeiro de 2021). *Max von Laue - Facts*. Fonte: Nobel Prize: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1914/laue/facts/>
- Tokashiki, C. d., & Saes, G. S. (dezembro de 2008). Revisão Estratigráfica e Faciologia do Grupo Cuiabá no Alinhamento Cangas-Poconé, Baixada Cuiabana, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), 661-675.
- Trivelli, G. G., Pierosan, R., & Ruiz, A. S. (setembro de 2017). Geologia e Petrologia do Granito São Vicente na Região do Parque Estadual Águas Quentes, Estado de Mato Grosso, Brasil. *Geologia USP, Série Científica*, 17(3), 29-48. doi:10.11606/issn.2316-9095.v17-426
- Ward, S. H. (1990). Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial*, p. 398. doi:10.1190/1.9781560802785.ch6