

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

FABIANA PEREIRA LASMAR

**UTILILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE
CORPOS DE BARITA NA REGIÃO DO VALE DO RIBEIRA**

São Paulo
2020

FABIANA PEREIRA LASMAR

UTILILZAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORPOS
DE BARITA NA REGIÃO DO VALE DO RIBEIRA

Dissertação apresentada ao Departamento Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada à Prospecção de Recursos Naturais, à Geotecnia e a Problemas Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo
2020

*“Tenha fé em Deus. Tenha fé na vida. (...)
Basta ser sincero e desejar profundo. Você será capaz de sacudir o mundo. (...)
E não diga que a vitória está perdida. Se é de batalhas que se vive a vida.
Tente outra vez!”*
Raul Seixas

*Dedico esse trabalho à Educação Pública de qualidade, em especial aos pós-graduandos,
que tanto batalham para a realização de suas pesquisas.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por me dar saúde, sabedoria e persistência em toda a minha caminhada e nos enfrentamento dos desafios.

Aos meus pais Nagib e Magda por apoiarem e acreditarem nos meus sonhos e ao meu irmão Fabiano pelo companheirismo.

Ao Renan pelo amor, companheirismo e incentivo à jornada acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vagner Roberto Elis pela confiança, apoio e toda serenidade em sua orientação.

À CAPES pelo financiamento da bolsa e apoio aos projetos de pesquisa.

À USP, em especial ao Departamento de Geofísica do IAG pela oportunidade, estrutura e ensino de qualidade. A todos os professores desse departamento, em especial aos que participaram da minha formação.

Ao técnico Marcelo e aos colegas Gabi e Felipe pela ajuda no trabalho de campo. À Mineração Patrimônio Ltda pela disponibilidade da área de estudo e suporte na hospedagem.

A todos meus colegas e funcionários do IAG, por tornarem o ambiente da Pós-Graduação mais leve, pelos momentos de distração e reposição de energia na “sala do café” e em nossos churrascos. Em especial Alane e Gabi que me acolheram desde o primeiro momento e se tornaram grandes amigas, Ualisson e Gelson pelas discussões geológicas e a Denise e Débora por deixarem nossa sala mais acolhedora.

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

Resumo

LASMAR, Fabiana. **Utilização de métodos geelétricos para identificação de corpos de barita na região do Vale do Ribeira**. 2020. 75p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020. Versão original

A barita (BaSO_4) é um mineral industrial utilizado principalmente na indústria petrolífera, no fluido de perfuração, e apresenta uma densidade elevada ($4,48\text{g/cm}^3$) quando comparado aos silicatos. Diante da alta densidade desse sulfato, é recomendável a utilização da gravimetria como método de prospecção, embora haja severas limitações para depósitos de pequena espessura, como no caso da área de estudos. O depósito da área em estudo é caracterizado como do tipo Sedex, que é um depósito polimetálico, com presença de sulfeto metálico disseminado e ocorrências de barita nas zonas mais periféricas e superficiais. Assim, com base nos metais, esse trabalho propõe a utilização dos métodos elétricos de resistividade e polarização induzida (IP) em corpos mineralizados na região do Vale do Ribeira, para avaliar o potencial da geofísica na identificação do minério. Os ensaios realizados na área de estudo tiveram o objetivo de avaliar a resposta geofísica e delimitar corpos mineralizados conhecidos, para o desenvolvimento de uma mineração responsável. Os métodos utilizados foram eletrorresistividade por acoplamento galvânico e por capacitância e polarização induzida, por meio da técnica de caminhamento elétrico (CE) e arranjo dipolo-dipolo. Além dos trabalhos em campo, em laboratório fez-se medidas de resistividade e IP em simulação em caixa com amostra de barita e também medições diretas de resistividade. Esses ensaios corroboram os dados de campo e permitem relacionar as zonas de altas resistividades com os corpos mineralizados de barita. Em relação aos dados de cargabilidade, não há correlação direta com o mineral barita, esse parâmetro está relacionado com a presença de sulfeto disseminado, visto que esse efeito é muito bem pronunciado nessas substâncias, que são típicas dos depósitos SEDEX.

Palavras-Chave: Barita, Resistividade, Cargabilidade, Depósito SEDEX, Vale do Ribeira.

Abstract

LASMAR, Fabiana. **Use of geoelectric methods to identify barite bodies in the Vale do Ribeira region**. 2020. 75p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020. Versão original

Barite (BaSO_4) is an industrial mineral, used mainly on the oil industry as a component of the drilling fluid. It has a high density ($4.48\text{g} / \text{cm}^3$) when compared to silicates. Due to the high density of this sulfate, gravimetry has been proposed as a prospecting method, although there are severe limitations for small deposits, as in the case of the study area. The deposit of the study region is characterized as the Sedex type, it is a polymetallic deposit, with the presence of disseminated metal sulfide and occurrences of barite in the most peripheral and superficial areas. Thus, with base in the metals, this work proposes the use of electrical methods of resistivity and induced polarization (IP) on mineralized bodies in the Vale do Ribeira region, to evaluate the potential of geophysics in the identification of ore. The tests carried out in the study area aimed to evaluate the geophysical response and delimit known mineralized bodies, that is, outcrops, for the development of responsible mining. The methods used were electrical resistivity by galvanic coupling and capacitance and induced polarization, using the technique of electric profiling and dipole-dipole array. In addition to fieldworks, measurements of resistivity and IP were made in a box simulation, with sample of barite. Direct resistivity measurements were also taken. These tests corroborate field data, and allow to relate the zones of high resistivities with the mineralized bodies of barite. Regarding the chargeability data, it is not possible to correlate them with the barite mineralization, this parameter is related to the presence of disseminated sulfide, since this effect is very pronounced in these substances, which are typical of SEDEX deposits.

Keywords: Barite. Resistivity. Chargeability. SEDEX. Vale do Ribeira

Sumário

1.	CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	12
1.1	Considerações Gerais	12
1.2	Objetivos e Justificativa.....	14
2.	CAPÍTULO 02 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	O mineral Barita	16
2.1.1	<i>Tipos de depósitos</i>	18
2.2	A Geofísica na Prospecção da Barita	20
3.	CAPÍTULO 03 – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	23
3.1	Considerações Gerais	23
3.2	Estratigrafia	26
3.3	Geologia Estrutural	29
3.4	Geologia Econômica	29
4.	CAPÍTULO 04 – MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	31
4.1	Considerações Gerais	31
4.2	Eletrorresistividade	31
4.2.1	<i>Histórico</i>	31
4.2.2	<i>Fundamentos Teóricos</i>	32
4.3	Polarização Induzida.....	36
4.3.1	<i>Histórico</i>	36
4.3.2	<i>Fundamentos Teóricos</i>	38
4.3.3	<i>Fontes do Efeito IP</i>	39
4.4	Resistividade Capacitiva – OhmMapper	41
4.4.1	<i>Histórico</i>	41
4.4.2	<i>Fundamentos Teóricos</i>	42
4.5	Técnicas e arranjos de aquisição dos dados.....	43
4.5.1	<i>Técnicas de aquisição</i>	43
4.5.2	<i>Arranjos de aquisição</i>	45
5.	CAPÍTULO 05 - AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	48
5.1	Considerações Gerais	48
5.2	Equipamentos utilizados em campo	49
5.3	Eletrorresistividade e IP	50
5.4	OhmMapper	53
5.5	Dados laboratoriais	54
5.5.1	<i>Simulação em caixa</i>	54
5.5.2	<i>Medição direta</i>	55
5.6	Tratamento dos dados	57

5.6.1	<i>RES2DINV</i>	57
5.6.2	<i>Oasis Montaj</i>	58
6.	CAPÍTULO 06- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	59
6.1	Dados de campo.....	59
6.1.1	<i>Eletrorresistividade e IP</i>	59
6.1.2	<i>OhmMapper</i>	67
6.2	Dados Laboratoriais.....	69
6.2.1	<i>Simulação em caixa</i>	69
6.2.1	<i>Medição direta</i>	70
7.	CAPÍTULO 07- DISCUSSÕES	73
8.	CAPÍTULO 08- CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

Lista de Figuras

Figura 1.1: Situação legal das áreas requeridas para determinadas Substância região do Vale do Ribeira (PR). Fonte: SIGMINE (ANM 02/2020). A: Situação legal das áreas requeridas na região do Vale do Ribeira (PR), B: Localização da área no Brasil, C: Detalhe para o requerimento da Área de estudo.	13
Figura 1.2: Localização e acesso à área de Estudo. A: localização do Vale do Ribeira entre os estados de SP e PR, B: Detalhe do acesso na região de estudo. Autor.	13
Figura 2.1: Afloramento do mineral Barita na região de estudo. Fonte: Acervo pessoal	17
Figura 2.2: Morfologia e distribuição dos tipos de minério e mineralogia em depósitos do tipo Sedex (modificado de (Emsbo et al., 2016)).....	19
Figura 3.1: Compartimentação geológico-estrutural do Território Brasileiro. Baseado em Hasui, et al., 2012.....	23
Figura 3.2: Unidades principais do Cinturão Ribeira. Em azul-claro, divisas estaduais. (Retirado de Hasui et al., 2012).	25
Figura 3.3: Coluna Estratigráfica da área de estudo (Terreno Apiaí), baseado em (Silva et al., 1999).	27
Figura 3.4: Mapa Geológico abrangendo a área de estudo. Baseado em (Silva et al., 1999).	28
Figura 4.1: Gráfico das margens de variação dos valores de resistividade mais comuns em algumas rochas e minerais. Adaptado de (Orellana, 1972).	34
Figura 4.2: Desenho esquemático da lei de Ohm e consequente medida da resistividade. Modificado de (Orellana, 1972).	35
Figura 4.3: Esquema das medições de campo do método da eletrorresistividade com linhas equipotenciais e de fluxo de corrente com visualização 2D (perfil). Modificado de (Orellana, 1972) e (Telford et al., 1990).	36
Figura 4.4: Curva de descarga IP no domínio do tempo (variação do potencial elétrico em função do tempo). Modificado de (Sumner, 1976).	38
Figura 4.5: Esquema para explicar a polarização do eletrodo. Modificado de (Sumner, 1976).	40
Figura 4.6: Esquema para explicar a polarização de membrana. Em A meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico (posição de equilíbrio) em B meio poroso após a aplicação de um campo elétrico. Modificado de (Sumner, 1976).	41
Figura 4.7: Modelo conceitual da medida da resistividade por acoplamento capacitivo. Modificado de (Yamashita et al., 2004).	42
Figura 4.8: Técnica de aquisição dos dados. A: técnica da sondagem elétrica vertical, B: Caminhamento elétrico e C: Perfilagem elétrica. Modificado de (Braga, 1997).	44
Figura 4.9: Principais arranjos de campo de investigações geoeletricas, ilustrando geometria e o respectivo fator geométrico (k). Modificado de (Ward, 1988) e (D. M. Loke, 1999).	46
Figura 4.10: Disposição inicial em campo do arranjo Dipolo-dipolo com 5 níveis de investigação. Modificado de (Elis, 1998).....	47
Figura 5.1: Mapa da área de estudo com perfis realizados.....	48
Figura 5.2: Equipamentos utilizados na aquisição dos dados. De cima para baixo: bateria 12V, ElrecPro, Sycal R2, Conversor DC DC.....	49
Figura 5.3: Equipamento OhmMapper em utilização no campo e com destaque de seus elementos ...	50
Figura 5.4: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfil da área 1, C: Destaque para perfil da área 2.....	51
Figura 5.5: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfis sobre os corpos A, B, C e D, C: Destaque para perfis sobre os corpos E e G, D: Destaque para perfis sobre o corpo J.....	52
Figura 5.6: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfis com OhmMapper.....	53
Figura 5.7: Amostra coletada em campo e utilizada na medição da resistividade em caixa.....	54
Figura 5.8: Montagem da caixa para medição da resistividade. A: Desenho esquemático da caixa e circuito, B: Foto do perfil realizado.	55
Figura 5.9: Montagem do circuito para medição da resistividade na amostra cilíndrica de barita.	56

Figura 5.10: Medição da massa dos cilindros de barita em balança de precisão.	57
Figura 6.1: Seções geoeletricas da área 1, perfis superiores de resistividade e inferiores de cargabilidade. A: Espaçamento dos eletrodos de 5 metros, B: espaçamento dos eletrodos de 2 metros.	60
Figura 6.2: Seção geoeletrica da área 2, perfil superior de resistividade e inferior de cargabilidade. ..	60
Figura 6.3: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo A. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.	62
Figura 6.4: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo B. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.	62
Figura 6.5: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo C. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.	64
Figura 6.6: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo D. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 10000 ohm.m.	64
Figura 6.7: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo E. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 8000 ohm.m.	66
Figura 6.8: Seções Geoeletricas do corpo G. A: Seção de resistividade, B: Seção de cargabilidade. ..	66
Figura 6.9: Seções Geoeletricas e modelagem 3D do corpo J. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.	67
Figura 6.10: Seção de resistividade capacitiva do perfil OM1 com demarcação do afloramento de barita.....	68
Figura 6.11: Seção de resistividade capacitiva do perfil OM2 com demarcação do afloramento de barita.....	68
Figura 6.12: Imagem de satélite com localização do perfil OM2 e esquema da localização do perfil elétrico realizado sobre os afloramentos de barita	69
Figura 6.13: Seção elétrica de resistividade da simulação realizada em caixa e com identificação da localização da amostra de barita.....	70
Figura 6.14: Seção elétrica de cargabilidade da simulação realizada em caixa e com identificação da localização da amostra de barita.....	70

1. CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Considerações Gerais

Nos últimos tempos tem se destacado a possibilidade da integração dos conhecimentos de engenharia de minas e de prospecção geofísica no desenvolvimento de projetos que visam transformar áreas de garimpo em pequenas empresas de mineração responsável. Além disso, desenvolver um sistema inovador de gestão integrada, incluindo certificação internacional de recursos, qualidade, ambiental, saúde, segurança, social e ética, (Fernandes et al., 2007)

Com o desenvolvimento da eletrônica e informática, os equipamentos geofísicos evoluíram para os sistemas mais portáteis e precisos, que permitem a aquisição de dados com grande detalhe que podem ser utilizados em pesquisa mineral de pequenas jazidas. Esse procedimento alia baixo custo e rapidez a um grande volume de informações, facilitando muito o processo de planejamento da extração do minério, (Fernandes et al., 2007).

As características não invasivas e não destrutivas dos métodos geofísicos, quando comparados aos métodos diretos, também são facilitadores na exploração de minério. Um dos aspectos que deve ser considerado quando se utiliza a geofísica é a escolha adequada da técnica e arranjo de aquisição, com o objetivo de otimizar as investigações em campo e obter resultados satisfatórios.

Alguns insumos minerais explorados no Brasil sob a forma de garimpo ou até mesmo mineração de grande porte podem ser estudados com o auxílio de métodos geofísicos, para o desenvolvimento de uma mineração sustentável, partindo de um detalhamento de alvos, com reavaliação de reservas, para que se possa desenvolver uma lavra seletiva e ambientalmente sustentável. Destaque para os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida, que começam a ser aplicados com sucesso nesse tipo de atividade (Martins et al., 2016). Por outro lado, a pesquisa geofísica de determinados insumos minerais tem sido pouco registrada na literatura, como por exemplo, a barita.

O mineral barita é um sulfato de bário ($BaSO_4$) utilizado principalmente na indústria petrolífera, no fluido de perfuração de poços de petróleo. É utilizado também, com menor relevância, na indústria química, de autopeças, metalurgia, siderurgia e medicina.

A região do Vale do Ribeira, no estado do Paraná, apresenta, de acordo com os processos de requerimento da Agência Nacional de Mineração (ANM), áreas com potenciais para mineralização de Barita e próximos a elas encontram-se também áreas de requerimentos para Chumbo e Zinco (Figura 1.1). A área de estudo se encontra nos requerimentos 6921/1954 e 8581/1943e localiza-se na região de Tunas (PR), a sudoeste do centro urbano.

Trata-se de uma antiga mineração de barita, que atualmente está paralisada (ANM, 2020). O acesso à região partindo da região central da capital Curitiba, se dá através da BR-476, onde percorre-se 70Km na direção Norte até a rodovia José Richa, onde prossegue-se por 9 km em uma estrada local até o povoado Tigre e por mais 2km até a área estudada (Figura 1.2).

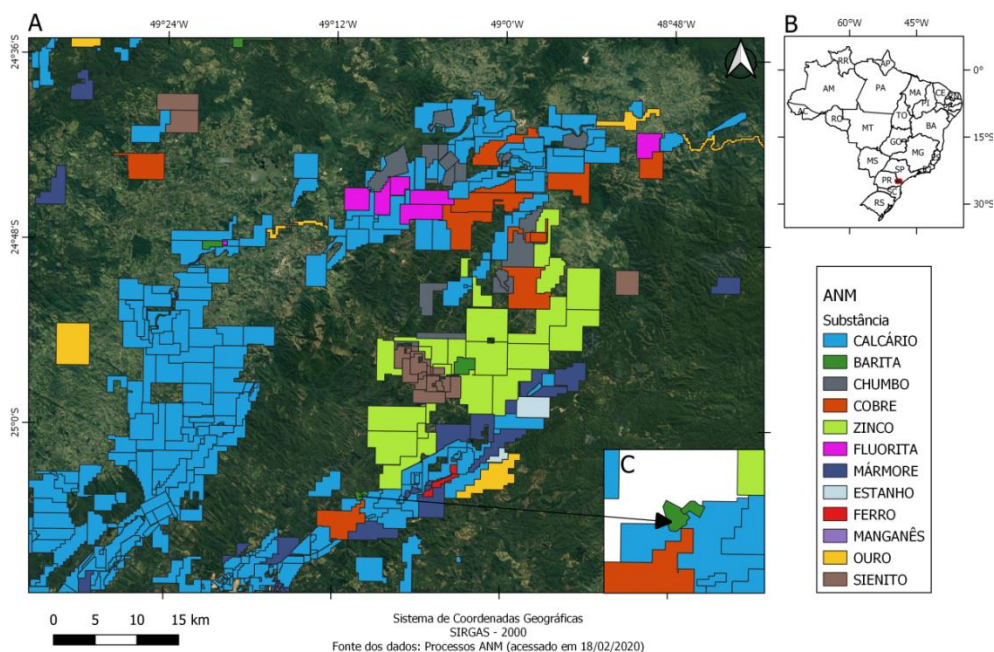


Figura 1.1: Situação legal das áreas requeridas para determinadas Substância região do Vale do Ribeira (PR). Fonte: SIGMINE (ANM 02/2020). A: Situação legal das áreas requeridas na região do Vale do Ribeira (PR), B: Localização da área no Brasil, C: Detalhe para o requerimento da Área de estudo.

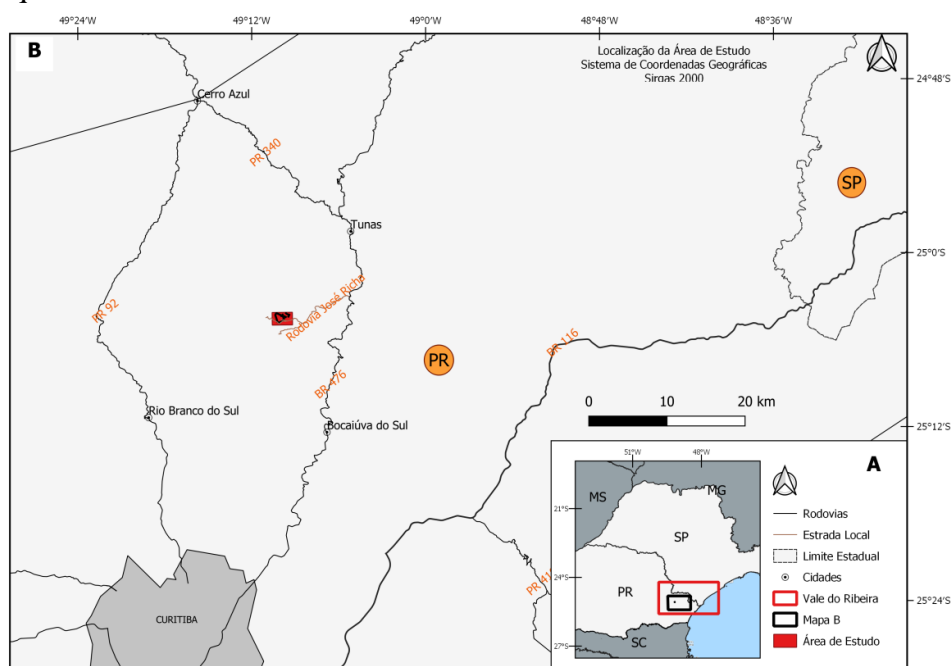


Figura 1.2: Localização e acesso à área de Estudo. A: localização do Vale do Ribeira entre os estados de SP e PR, B: Detalhe do acesso na região de estudo. Autor.

1.2 Objetivos e Justificativa

O principal objetivo desse trabalho é a aplicação dos métodos geoeletricos para o desenvolvimento de uma mineração responsável, através da delimitação dos corpos mineralizados, para que posteriormente possa ser desenvolvida uma lavra seletiva. Além disso, a correlação de dados de campo com dados laboratoriais irá permitir confirmar o modelo de campo.

Para tanto, esse estudo visa a aplicação de métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida na prospecção de barita, que são bastante escassos na literatura especializada. Em razão da alta densidade da barita (4.48 g/cm^3) em relação aos demais silicatos (quartzo $2,65 \text{ g/cm}^3$, argila $2,60 \text{ g/cm}^3$), a princípio a gravimetria seria altamente recomendável, porém em casos de ocorrências de pequena dimensão existem severas limitações para detecção dos corpos em termos práticos, é o que relata Bhattacharya et al. (1974). Esses autores identificaram também a possibilidade da utilização da eletrorresistividade para a identificação de corpos de baritas, quando esses estão encaixados em rochas menos resistivas. Outros trabalhos mais recentes apresentam resultados promissores, porém apenas sugerem zonas potencialmente mineralizadas, sem a correlação com dados diretos ((Egeh et al., 2004); (Oladapo & Adeoye-oladapo, 2011); (Akpan et al., 2014)); (Obi et al., 2014); (Ehirim et al., 2016)).

Como exposto, há uma escassez de trabalhos que visam a aplicação de métodos geoeletricos na prospecção da barita. Inclusive essa escassez é notada para os métodos geofísicos de maneira geral. Sendo assim, o objetivo principal dessa pesquisa é avaliar a resposta geofísica dos métodos já citados em corpos mineralizados conhecidos, ou seja, que estejam aflorantes. Além disso, com o uso do OhmMapper, busca-se correlacionar os dados de resistividade obtidos através do acoplamento capacitivo com os resultados tradicionais do acoplamento galvânicos. Através de amostras coletadas em campo, medidas laboratoriais de resistividade nos corpos, tanto em testes de bancada como medidas pontuais, tem o objetivo de correlacionar e justificar os valores medidos em campo.

A justificativa desse projeto é que a utilização dos métodos geofísicos pode contribuir muito com a exploração da barita, não só na região de estudo, como também para outras regiões, em razão do potencial de uso da geofísica na reavaliação e detalhamento de depósitos. Considerando também que não se tem muitos estudos que determinam o método ideal para a prospecção desse bem mineral.

Além disso, o estudo contribui em vários aspectos com a possível exploração da barita na região, tanto sob o aspecto de auxiliar e avaliar a viabilidade econômica da mina, como no planejamento da atividade exploratória de forma responsável, visto que a mineração sustentável inicia na fase de pesquisa mineral e avança até o dimensionamento de corpos. A geofísica permite a delimitação e detalhamento dos corpos, de forma eficaz e barata (quando comparada aos métodos diretos) e isso fornece suporte ao planejamento de lavra com o mínimo de impacto ambiental, já que será caracterizada uma lavra seletiva, que atua diretamente no corpo mineralizado.

2. CAPÍTULO 02 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O mineral Barita

O mineral barita é um sulfato de bário (BaSO_4) de densidade elevada ($4,48\text{g/cm}^3$), quando comparado aos demais silicatos (Hanor, 2000). O nome Barita tem origem na palavra grega *barros*, que significa pesado; o mineral foi descoberto na Itália, no século XVII e um dos primeiros usos ocorreu na indústria de tinta branca, como carga, passou então a ser usado como pigmento branco e depois surgiu na indústria química dos sais de bário (Luz & Baltar, 2005). No século XX foi descoberto o uso da barita como controlador de densidade no fluido de perfuração, sendo essa, atualmente, a principal aplicação do mineral (Johnson et al., 2017).

As propriedades da Barita que garantem seu uso nos fluidos de perfuração são: sua alta densidade, pouca abrasividade e inércia química (insolúvel em água e ácido), esse mineral é utilizado como agente controlador da densidade das lamas de perfuração, a fim de conferir a pressão hidrostática requerida para a coluna de lama e evitar os *blowouts* (penetração de fluídos durante a passagem por rochas permeáveis) e o desmoronamento do poço (Luz & Baltar, 2005). Para a indústria Petrolífera as especificações exigidas pela API (*American Petroleum Institute*) são: densidade mínima de $4,2\text{g/cm}^3$, teor de Ca no máximo 250 ppm e 95% do mineral devem apresentar partículas inferiores a $45\mu\text{m}$ (325mesh). Suas propriedades de ser inerte, possuir alvura elevada e apresentar baixa absorção de óleo ampliam bastante o seu uso como carga, pigmento e extensor. Possui também considerável capacidade de absorver Raios-x e gama que possibilita seu uso na área médica, fabricação de cimentos especiais e na fabricação de protetores contra radiações de monitores de computador e televisão (Luz & Baltar, 2005).

Os minerais que pertencem ao grupo da Barita apresentam estrutura ortorrômbica, compacta e fórmula geral $\text{A}(\text{SO}_4)$, onde A pode ser Bário (Barita), Estrôncio (Celestita) ou Chumbo (Anglesita). A Barita, na maior parte das ocorrências, é incolor, branco leitoso ou cinza, podendo apresentar outras variedades de cores a depender de impurezas. Possui fratura conchoidal, clivagem prismática, brilho vítreo, cristal transparente a translúcido. É o mineral mais denso entre os não-metálicos, o que é sua propriedade identificável, é relativamente friável, com dureza variando entre 2,5 e 3,5 na escala de Mohs (Luz & Baltar, 2005). A Figura 2.1 mostra o mineral barita retirado da região de estudo.



Figura 2.1: Afloramento do mineral Barita na região de estudo. Fonte: Acervo pessoal

Alguns estudos em áreas de potencial para ocorrências de barita ((Bhattacharya et al., 1974); (Egeh et al., 2004); (Oladapo & Adeoye-oladapo, 2011); (Akpan et al., 2014); (Obi et al., 2014); (Ehirim et al., 2016)) mostram que altos valores de resistividades podem ser diagnósticos desse mineral. De acordo com Ehirim et al. (2016) a resistividade da barita depende do conteúdo de BaSO_4 , das impurezas e do ambiente de deposição. A alta densidade desse mineral é devido à falta de poros na estrutura cristalina, essa ausência de poros e a natureza compacta da sua cristalografia atribuem à alta resistividade a esse mineral (Egeh et al., 2004).

Egeh et al. (2004), no seu estudo em uma área com potencial mineralizador de barita, atribui os valores de resistividade no intervalo entre 2000 a 3000 ohm.m a corpos de barita. Oladapo & Adeoye-oladapo (2011) também constataram baixos valores de condutividade elétrica para regiões com barita, as zonas de maior potencial, foram estimadas pelos valores de condutividade menores do que 5mS/m. Akpan et al. (2014) estimaram valores de resistividade próximos a 1500 ohm.m na região de mineralização da barita. Obi et al. (2014) mapeiam áreas com ocorrências de barita também com base na resistividade, valores de resistividade ao redor de 4000 ohm.m para tal área de estudo foi considerado barita inalterada, enquanto valores ao redor de 600 ohm.m correspondente à barita alterada.

2.1.1 Tipos de depósitos

Johnson et al. (2017) classificam os depósitos de barita em 4 grupos, baseados nas características físicas, geoquímicas e no contexto geológico: (1) Sedimentar acamadado, podendo ser do tipo Sedimentar Exalativo (SEDEX) ou Mississipi Valley (MVT), (2) Vulcânico acamadado, também conhecidos como vulcanogênicos ou vulcanossedimentar (VMS), (3) Veios e (4) Residuais.

Os depósitos do tipo sedimentar acamadado são corpos de barita maciço com associações sedimentares, contém tipicamente folhelho rico em matéria orgânica, argilito ou chert. As camadas de barita variam de espessura centimétrica até 100 metros ou mais e pode se estender por quilômetros ao longo do sentido de mergulho da camada. Esse tipo de depósito é a maior fonte da produção de barita e detém as maiores reservas do mundo (Johnson et al., 2017). Os depósitos MVT são epigenéticos, tendo como rochas hospedeiras os carbonatos com predominância de esfarelita e galena. Já os depósitos do tipo SEDEX são formados em áreas de sedimentação com atividade hidrotermal, são corpos estratiformes, lenticulares ou tabulares que são hospedados em sedimentos clásticos ou químicos marinhos com pouca ou nenhuma associação direta com as rochas vulcânicas ((Robb, 2005), (Hanor, 2000)). Ambos os depósitos podem conter metais sulfetados associados, como cobre, chumbo e zinco.

Depósitos vulcânicos acamadados são corpos estratiformes maciços de barita com uma sucessão estratigráfica que contém rochas ígneas (tipicamente uma variação de félsicas e máficas) e rochas sedimentares. O elemento Bário é eliminado do edifício vulcânico e das rochas subjacentes pela água do mar que é aquecida pela circulação do magma por convecção. Os depósitos de barita são formados quando os fluidos quentes que contém bário encontram sulfato nas águas frias do assoalho oceânico. Nesse tipo de depósito a barita também pode estar associada com metais de cobre, chumbo e zinco (Johnson et al., 2017).

Os depósitos classificados como veios preenchem falhas, zonas de brecha ou outras estruturas permeáveis. Os depósitos são comumente tabulares e se estendem ao longo das estruturas, normalmente descontínuos. Nesses depósitos os constituintes do minério são transportados por um ou mais fluidos de alta temperatura canalizados ao longo de vias controladas pelas estruturas (Johnson et al., 2017).

Depósitos residuais são materiais pouco consolidados que se formaram pelo intemperismo de um depósito já existente. Argilominerais, quartzo e fragmentos

intemperizados de rochas estão tipicamente presentes, assim como sulfetos metálicos e produtos do seu intemperismo (Johnson et al., 2017).

No Vale do Ribeira, as jazidas de rochas polimetálicas com barita associada são caracterizadas como jazidas tipo Perau, sedimentar exalativo, e jazidas tipo Painelas, filonar hidrotermal, encaixadas em rochas carbonáticas, ((Silva, 1990) e (Araújo & Marcedo, 2004)). O depósito da região de estudo é descrito como: jazidas que apresentam mineralização sulfetada, estratiforme, singenética, associada a sequência vulcanossedimentar, com mineralogia predominante de galena, pirita, calcopirita e barita, com um zoneamento vertical na estratigrafia de Cu – Pb – Ba, da base para o topo, (Silva, 1990). Portanto são caracterizados como do tipo Perau (sedimentares exalativos), ((Barbour & De Oliveira, 1979) e (Silva, 1990)).

Depósitos do tipo Sedimentar Exalativo (SEDEX), como já exposto, é um depósito mineral formado por fluidos provenientes de um ambiente marinho sem uma fonte magmática óbvia ((Robb, 2005), (Hanor, 2000)). Os processos implicados na formação de um depósito Sedex são ilustrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e como observa-se a falha é um requisito para o transporte do fluxo de fluido de águas profundas para regiões mais rasas, passando por uma sequência sedimentar antes de serem expelidos para o fundo do mar (Hanor, 2000).

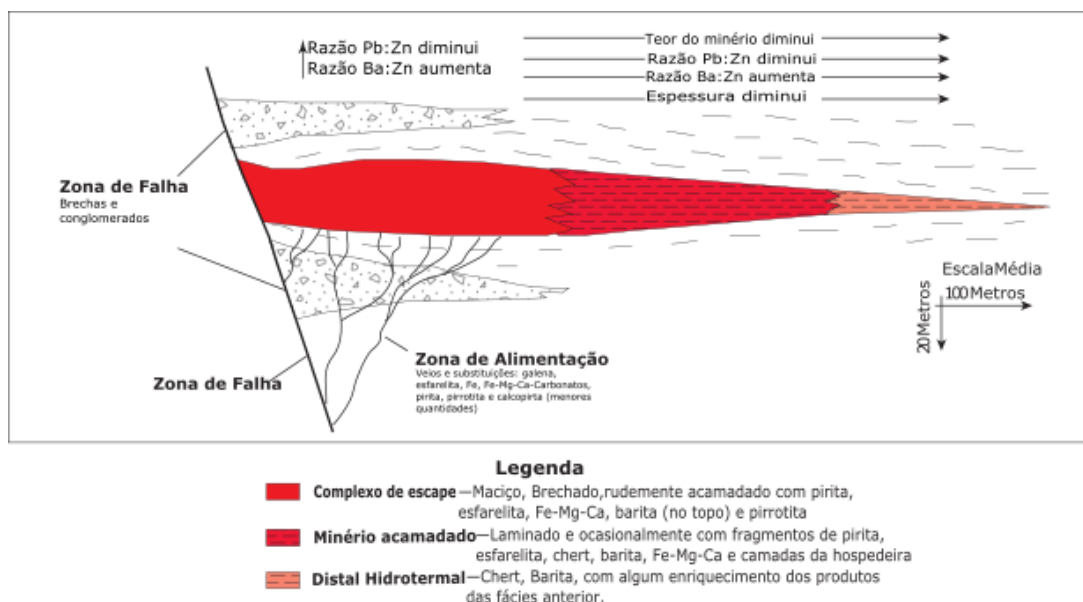


Figura 2.2: Morfologia e distribuição dos tipos de minério e mineralogia em depósitos do tipo Sedex (modificado de (Emsbo et al., 2016)).

O episódio de mineralização é desencadeado por eventos tectônicos que ativam grandes falhas e geram rápida subsidência na bacia sedimentar, que aciona o sistema

circulante. Os fluidos salinos tornam-se enriquecidos em Fe, Zn, Pb e Ba, ascendem para regiões oxidantes e são depositados ((Hanor, 2000), (Arndt & Ganino, 2012)). Como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, um complexo de escape situa-se acima da zona de alimentação e são caracterizados pela mineralização de corpos de sulfetos maciço a fracamente acamadado, são comumente a zona mais espessa e de maior teor dos metais base. A fácies do minério acamado ocorre a dezenas ou centenas de metros distantes do complexo de escape, essa fácies contém camadas de sulfetos intercalados com folhelhos, argilitos e fragmentos de rochas sedimentares; nessa porção há uma diminuição da espessura e do teor, ao longo do *strike*. A fácies distal hidrotermal representa a continuação lateral da mineralização, mostra uma diminuição dos sulfetos com o aumento da distancia do complexo de escape e significante concentrações de barita, chert, Fe-Mg-Carbonatos (Emsbo et al., 2016).

Um zoneamento geoquímico nos depósitos Sedex são bem estabelecidos e geralmente refletem também um zoneamento mineralógico (Emsbo et al., 2016). As zonas de alimentação contêm, tipicamente, as maiores concentrações de Cu e sistematicamente aumenta a razão Zn:Pb e diminui a razão Zn:Ba, Zn:Fe e Zn:Mn para fora do complexo de escape. Geralmente, os complexos de escape são também caracterizados por altas concentrações de Ag, As, Sb e Tl. As zonas distais podem conter em menores quantidades Zn, Pb, Tl, aumentando a razão Ba:Zn (Emsbo et al., 2016). Portanto, percebe-se que a proporção de barita para metais pesados geralmente aumenta lateralmente, para longe do complexo de escape, a barita também ocorre no topo de alguns complexos de escape, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

2.2 A Geofísica na Prospecção da Barita

A alta densidade da barita (aproximadamente 4,5 g/cm³) sugere que a gravimetria poderia ser uma ferramenta eficaz na prospecção e avaliação de depósitos desse mineral (Barnes et al., 1982). O depósito de barita de Nimiuktuk, estudado por Barnes et al., 1982 obteve bons resultados da avaliação preliminar por métodos gravimétricos, já que são depósitos próximos à superfície e de grande extensão horizontal. Esses autores mediram pequenas anomalias gravimétricas positivas relacionadas ao depósito de Barita. Tais anomalias possuem uma magnitude de, aproximadamente, 2mGal, e são mais extensas lateralmente do que o afloramento de barita, sugerindo uma maior extensão em profundidade para os corpos de barita.

Outras pesquisas ((Visarion et al., 1974) citado em (Barnes et al., 1982) e (Uhley & Sscharon, 1954) citado em (Barnes et al., 1982)) também relatam o uso da gravimetria na avaliação e exploração do mineral barita. O estudo de Uhley & Sscharon (1954) citado em Barnes et al. (1982) relata anomalias gravimétricas positivas da ordem de 0,5 a 1,0 mGal; tal valor, quando comparado aos de Nimiuktuk são inferiores, o que pode estar relacionado à menor espessura em profundidade desses depósitos ou há um menor teor, se esse estiver relacionado à densidade.

O trabalho de Bhattacharya et al. (1974) mostra a ineficácia do método gravimétrico para corpos de pequenas dimensões. A mineralização da barita na área de estudo do trabalho desses autores é controlada por falhas, fraturas e brechas na rocha hospedeira. Geralmente, a barita ocorre em pequenos veios e pode estar associada com cobre. Medidas de densidade em amostras de mão mostram uma média de 3,3 g/cm³, o que é uma densidade baixa para o minério de barita, porém, ainda se distinguem das rochas hospedeiras que possuem densidades 1,9 g/cm³ e 2,5 g/cm³ (solo superior e gnaiss intemperizado, respectivamente). Nos resultados, os autores perceberam que os perfis gravimétricos não mostravam nenhuma modificação quando sobre veios de barita, já na resistividade percebia-se altos valores. O trabalho é importante por causar a dúvida em relação ao método gravimétrico, previamente consolidado como o melhor para o mineral barita e instigar melhores pesquisas relacionadas aos métodos elétricos para a prospecção desse mineral.

Outros trabalhos mais recentes apresentam resultados promissores, porém apenas sugerem zonas potencialmente mineralizadas, sem a correlação com dados diretos. O estudo de Egeh et al. (2004) realizado na Área Akpet (Estado Cross River-Nigéria) tem como objetivo investigar a possível ocorrência de barita em tal região e delimitá-la, para isso fez uso de perfis e sondagens elétricas, para obter a espessura vertical e extensão lateral. Os dados de densidade das amostras de barita da região variam de 4,15 a 4,45 g/cm³, os perfis e sondagens elétricas delimitaram uma zona de possível ocorrência da barita, onde os valores de resistividade atingem o range de 2000 a 3000 ohm.m, o que difere muito do material hospedeiro, que na área de estudo trata-se de um aluvião espesso e uma cobertura de cascalho.

O trabalho de Oladapo & Adeoye-oladapo (2011) consiste na combinação do método gravimétrico com métodos eletromagnéticos para avaliar e identificar a possibilidade de barita em Tunga, nordeste da Nigéria. De acordo com esses autores, a Barita, nessa região, ocorre em veios de um a dois metros de espessura e quilômetros de comprimento. A aplicação do método gravimétrico se baseou na variação de densidade entre o arenito encaixante (2,63

g/cm³) e a barita (3,16 a 5,24 g/cm³). Eles classificam uma área altamente mineralizada, sendo aquela com baixos valores de condutividade e altos valores gravimétricos, uma das áreas caracterizadas como tal apresentou condutividade variando de 0,6 a 2,8 mS/m e 181,072 mGals.

O estudo de Akpan et al. (2014) foi realizado no depósito de barita Okurite, localizado em Biase na Nigéria. Com o objetivo de mapear e delinear a distribuição espacial de tal depósito e caracterizá-lo fez-se uso de técnicas geológicas e da eletrorresistividade. A mineralização é em forma de veios de variada espessura (menores que 1 a 2 metros) e ocorrem entre material de cascalho, brechas e embasamento intemperizado. A densidade da barita é de 3,64 g/cm³ e os valores de resistividade para regiões de possíveis ocorrência desse mineral variaram de 731 a 1500 ohm.m.

Outro trabalho no estado de Cross River, na Nigéria, é o de Obi et al. (2014). Nele, os autores aplicaram sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico com o objetivo de desvendar os depósitos de barita que, supostamente, ocorrem como veios ocultos. A mineralização está concentrada na cobertura sedimentar (arenitos, folhelhos e carbonatos) e no contato dessa com o embasamento. Os dados de resistividade mostram que os veios de barita ocorrem entre 10 e 12 metros de profundidade, podendo alcançar até 40 metros, quando estão intrudidos no embasamento. O valor de resistividade de 3992 ohm.m é considerado da Barita inalterada, enquanto zonas intemperizadas possuem menor resistividade, na casa de 500 ohm.m. O maior valor de resistividade, 15000 ohm.m, é atribuído ao embasamento granítico fresco.

O trabalho mais recente da aplicação de métodos elétricos na prospecção da barita é o de Ehirim et al. (2016), o qual estuda o “Lower Benue Trough”, na Nigéria. Nessa região, a barita ocorre em veios, que são extremamente variados em tamanho e forma, a rocha encaixante, na qual os veios estão bem desenvolvidos, são os arenitos. Os métodos geofísicos empregados no estudo foram o caminhamento elétrico e a sondagem elétrica vertical, com o objetivo de avaliar a utilidade e resolução do método elétrico na caracterização dos alvos. A combinação dos métodos foi eficaz e delimitou veios mineralizados de barita até 28 metros de profundidade. Os valores de resistividade considerados para a barita variaram de 1500 a 5500 ohm.m.

3. CAPÍTULO 03 – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Considerações Gerais

A área de estudo se encontra no Vale do Ribeira, região localizada entre os estados de São Paulo e Paraná e tem um histórico de mineralização polimetálica, se destacando como uma região produtora de chumbo, zinco, cobre, prata e ouro, além de importantes ocorrências de barita e fluorita. Essa região dá nome a um importante sistema orogênico brasileiro, a faixa Ribeira.

Essa área está inserida no contexto geotectônico da Província Mantiqueira, que engloba além da Faixa Ribeira, as faixas Araçuaí, Brasília meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (Heilbron et al., 2004). Essa província, definida por Almeida, (1977) abrange, no Brasil, as regiões costeiras sudeste e sul, delineando um *trend* de direção NE-SW; encontra-se em fronteira com as províncias Tocantins, São Francisco e Paraná, e a leste é bordejada pela margem continental e as bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas (Figura 3.1).

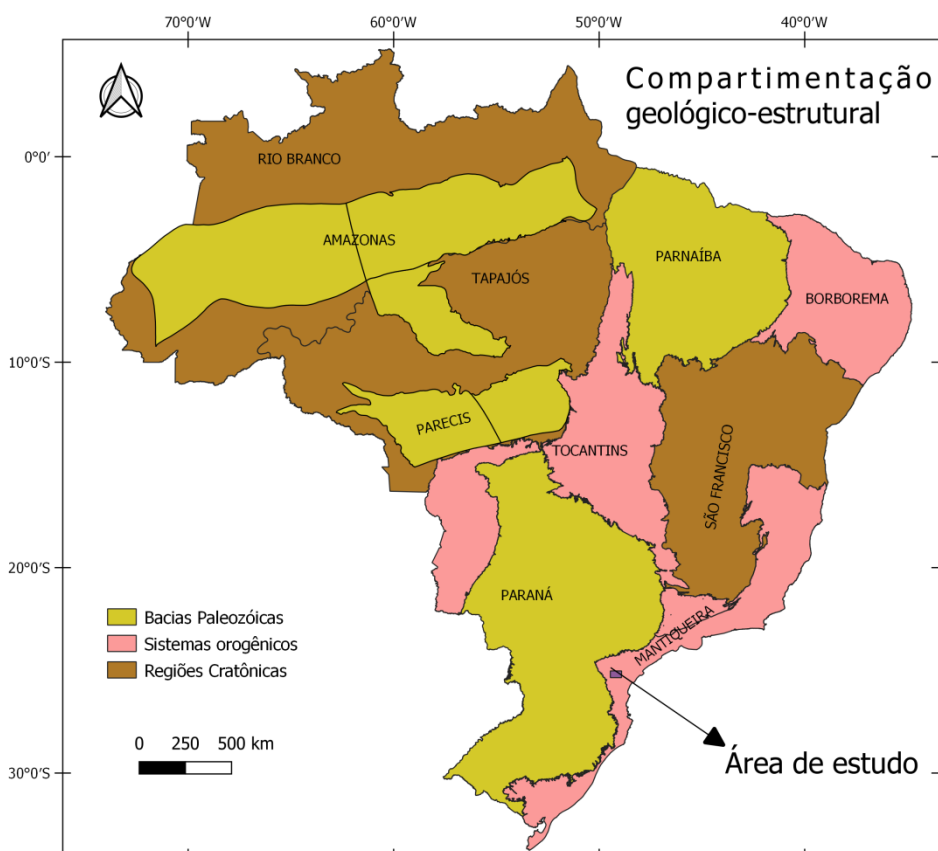


Figura 3.1: Compartimentação geológico-estrutural do Território Brasileiro. Baseado em Hasui, et al., 2012.

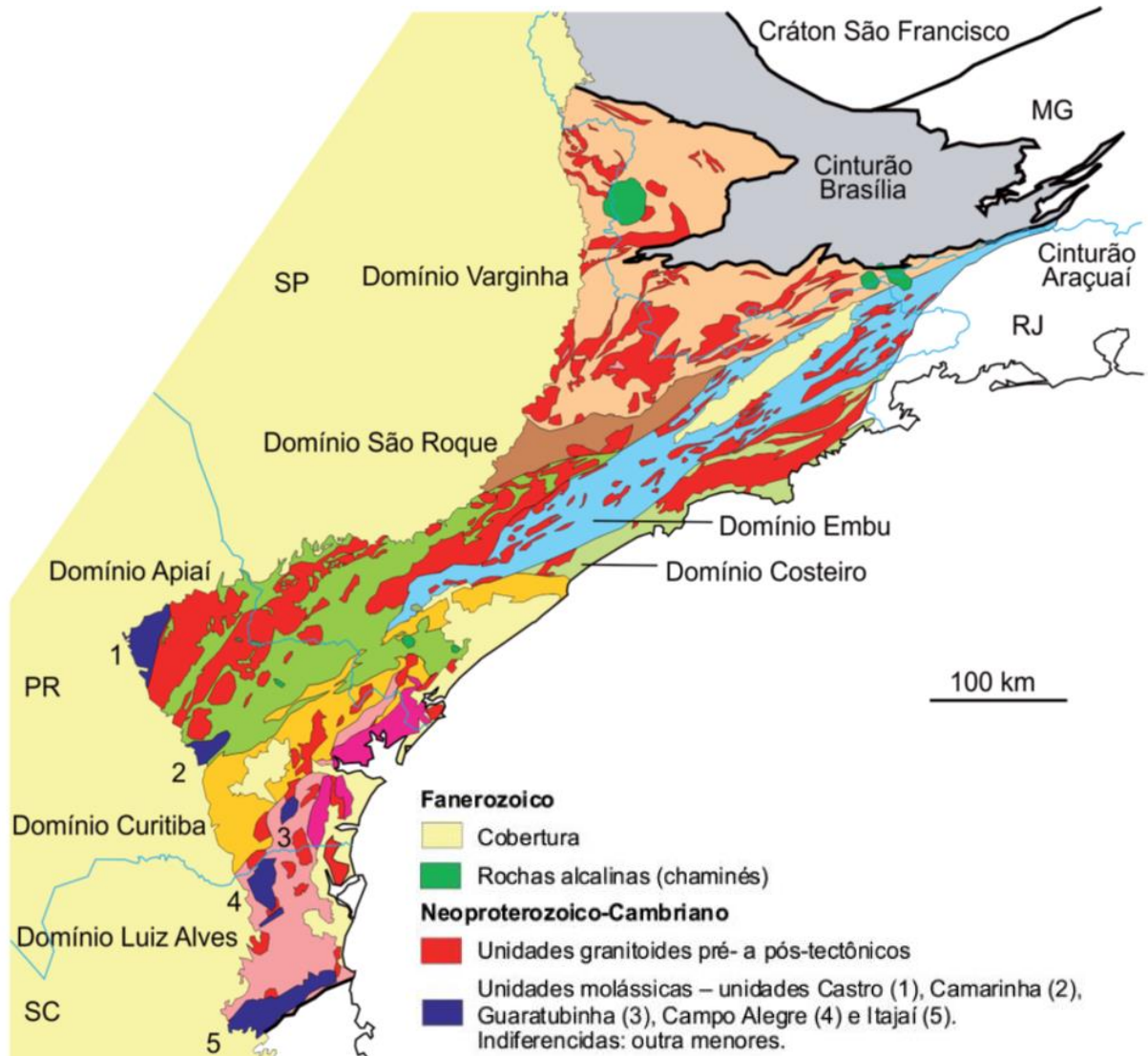
A Faixa Ribeira se encontra na porção central da Província Mantiqueira e apresenta um *trend* estrutural NE-SW que resulta de episódios colisionais oblíquos entre os crátons São Francisco, Congo, Luís Alves e Paranapanema, datados de 620-605, 605-565 e 535-510Ma, (Heilbron et al., 2017). A vergência estrutural NNW desse cinturão sobrepõe-se à região sul da faixa Brasília ao longo da margem sul do Cráton São Francisco, criando ali uma zona de interferência estruturalmente muito complexa.

De acordo com Hasui et al. (2012) no Cinturão Ribeira distinguem-se os domínios Varginha, Embu, Costeiro, São Roque, Apiaí, Curitiba, Paraguá e Luís Alves, como mostra a

Figura 3.2. A área de estudo está localizada no Terreno Apiaí, que juntamente com os terrenos Curitiba e Luis Alves compõe a parte meridional do Cinturão.

A zona de cisalhamento Lancinha-Cubatão divide os terrenos Apiaí e Curitiba, sendo o terreno Apiaí localizado a norte dessa estrutura. Esse limite, com *trend* NE e movimento dextral, representa a principal zona de cisalhamento do sudeste brasileiro, que se estende por aproximadamente 2100 km (Faleiros et al., 2011). Dados geocronológicos indicam que a zona de falha Lancinha-Cubatão representa um importante limite, separando terrenos dominados por unidades metassedimentares Mesoproterozóico ao norte e unidades metassedimentares Neoproterozóicas ao sul.

O terreno Apiaí compreende colagens de terrenos durante a orogenia Brasiliana-Pan Africana, e inclui assembleias de bacia de *backarc*, depósitos de plataforma carbonática, turbiditos e unidades de água profunda associadas com magmatismo máfico (Faleiros et al., 2014). As rochas de embasamento presentes nesse terreno afloram principalmente no núcleo de estruturas antififormes, caracterizada como uma associação de ortognaisses migmatíticos-miloníticos e apresentam forte complexidade geológica (Faleiros, 2008).



Neoproterozoico a Paleoproterozoico (pós-Transamazônico)

Unidades metassedimentares com ou sem metavulcanitos associados

Grupo Açungui (indiferenciadas: unidades Capiru, Itaiacoca, Lageado, Água Clara, Votuverava e menores – Rio das Cobras, Betari, Turvo-Cajati, Perau, Piririca, Serra das Andorinhas, Iporanga, Córrego dos Marques e também Apai-Mirim do Paleoproterozóico)

Grupo São Roque (indiferenciado: Grupo Serra de Itaberaba)

Unidade de alto grau

Complexo Varginha-Guaxupé (indiferenciadas: unidades metavulcanossedimentares)

Unidades metavulcanossedimentares com gnaisses associados

Complexo Embu, inclusive Complexo Rio Capivari

Complexo Costeiro

Paleoproterozoico (Transamazônico)

Unidades gnáissicas – Complexos Atuba (indiferenciadas: unidades Morro Alto, Tigre e Cachoeira)

Arqueano

Unidades de alto grau – Complexo Santa Catarina (indiferenciados: unidade Serra Negra e complexo máfico-ultramáfica Barra Velha)

Figura 3.2: Unidades principais do Cinturão Ribeira. Em azul-claro, divisas estaduais. (Retirado de Hasui et al., 2012).

3.2 Estratigrafia

Na área de estudo, como mostra a coluna estratigráfica da Figura 3.3 e o mapa de unidades geológica da Figura 3.4, a unidade do embasamento é datada do Arqueano – Paleoproterozóico e representada pelo Complexo Gnáissico-Migmatítico, tal unidade possui Noritos, meta-quartzo dioritos, metadioritos, metagabros, migmatitos, granitos gnáissicos e suas variações.

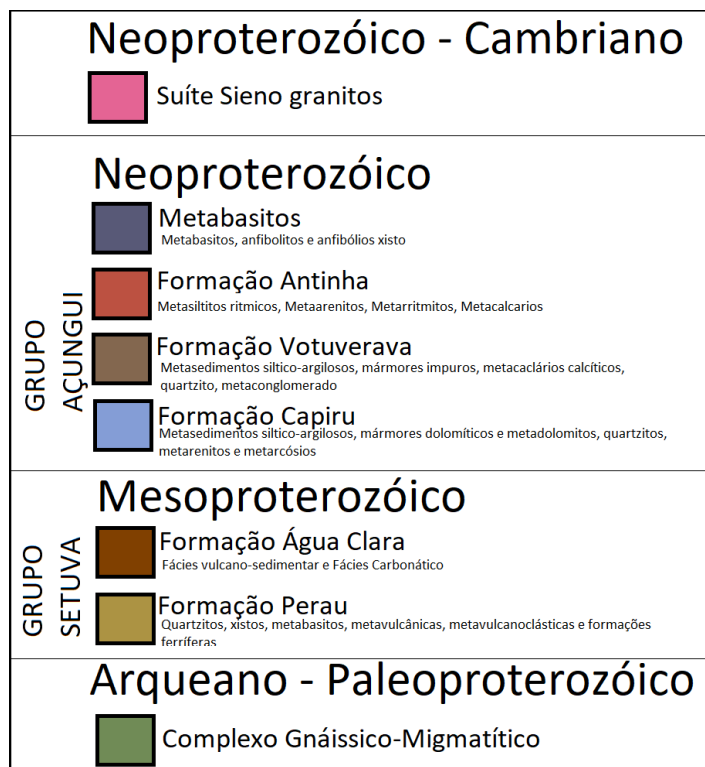
A unidade basal meta-vulcanossedimentar corresponde à Formação Perau, pertencente ao Grupo Setuva, do Mesoproterozóico (Silva et al., 1999), tal unidade é composta por quartzitos, mármore e rochas calciossilicáticas, grafita xisto, cálcio-filitos e formações ferríferas bandadas, com intercalações de metabasaltos toleíticos subalcalinos (Heilbron et al., 2004). A formação Água Clara, também pertencente a esse grupo é predominantemente carbonática, composta por mármore, rochas cálcio-silicáticas, cálcio-filitos, quartzitos e metacherts, associados com anfibólio xistos, granada-clorita-biotita xistos, metatufos básicos e intermediários, e anfibolitos (Heilbron et al., 2004).

As sequências meta-vulcanossedimentares do Grupo Açungui são representantes do Neoproterozóico e se dividem da base para o topo em: Formação Capiru (metassedimentos siltico-argilosos, mármore dolomítico e metadolomitos, quartzitos, metarenitos e metarcósios), Formação Votuverava (metassedimentos siltico-argilosos, mármore impuro, metacalcários calcíticos, quartzitos, metaconglomerado) e Formação Antinha (Metassiltitos ritmicos, metarenitos, metarritmitos, metacalcários), ((Silva, 1990) e (Silva et al., 1999)).

Os metabasitos são datados do Neoproterozóico e apresentam, além de metabasitos, anfibolitos e anfibólio xisto. Na grande área da região de estudo, estão intercalados com a Formação Votuverava e Perau. A Suíte de Sieno granitos do Neoproterozóico-Cambriano é representado, na regional da área de estudo, com o Granito Pula Saco, localizado à Oeste da área.

A área a ser estudada está localizada sobre a Formação Perau, que de acordo com Silva et al., (1999) caracterizam-na por apresentar unidades quartzítica e unidades xistosas. Apresenta metamorfismo na fácies xisto-verde, zona da sericita, com ocorrências de Pb-Zn-Ag (Cu-Ba), ((Silva et al., 1999) e (Silva et al., 2019)). A unidade quartzítica é composta por quartzitos de granulção fina a média, com intercalações de níveis micáceos, feldspáticos, conglomeráticos e, localmente, mármore dolomítico ou calcítico e xisto carbonático (Silva et

al., 2019). A unidade de xisto é a de maior expressão, e é caracterizada por quartzo-biotita xisto e grafita-mica xisto, localmente com granada e estauroлита, nessa unidade ocorre lentes de anfibolitos e lentes de rochas carbonáticas (Silva et al., 2019). Para Daitx (1996) citado em Silva et al. (2019) o ambiente deposicional da Formação Perau corresponde a uma sequência



vulcanossedimentar de fundo oceânico, com geração de depósito tipo SEDEX, que posteriormente foi submetido a metamorfismo.

Figura 3.3: Coluna Estratigráfica da área de estudo (Terreno Apiaí), baseado em (Silva et al., 1999).

3. Caracterização geológica regional da área de estudo

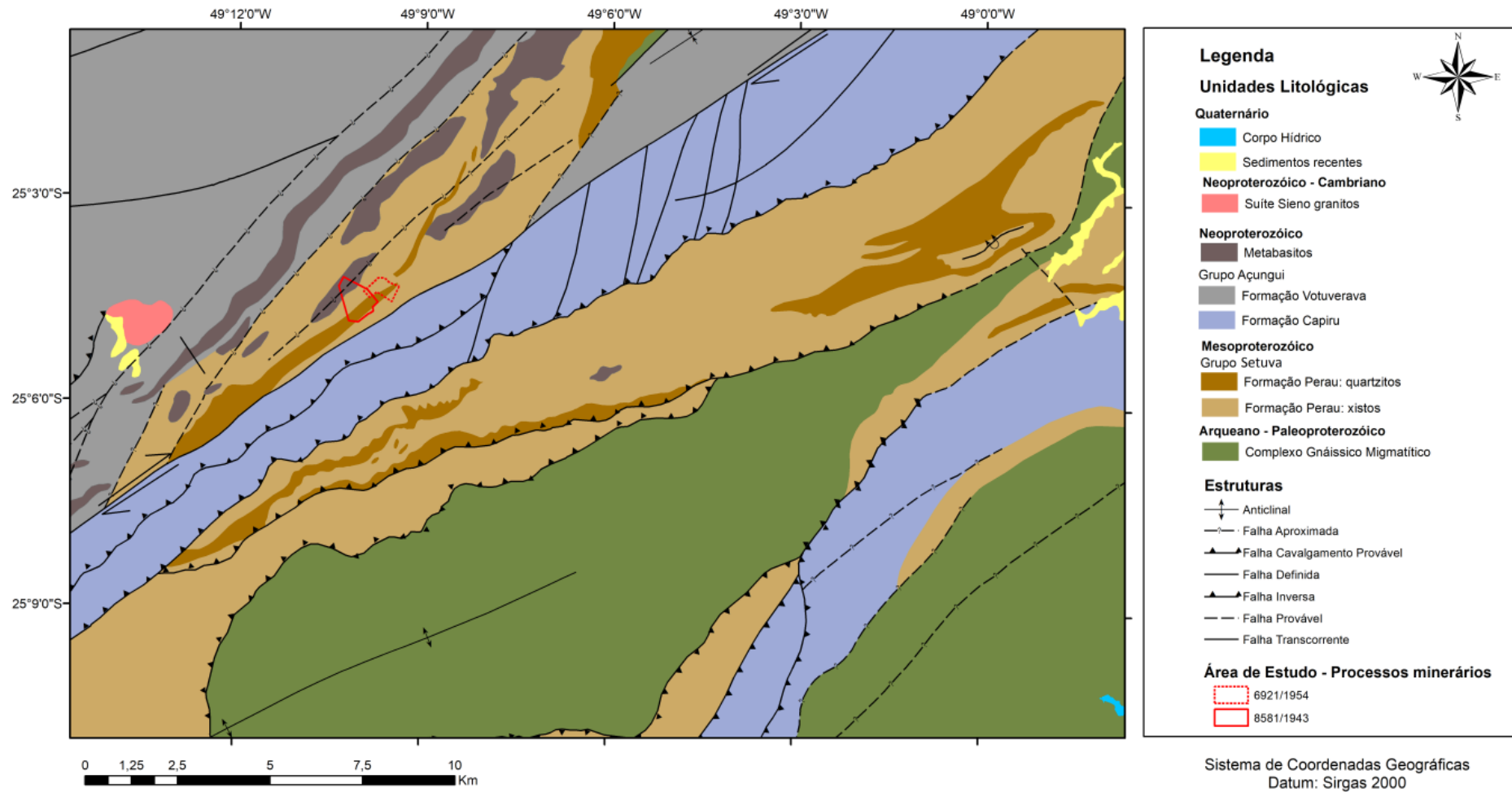


Figura 3.4: Mapa Geológico abrangendo a área de estudo. Baseado em (Silva et al., 1999).

3.3 Geologia Estrutural

De acordo com Campanha & Sadowski (1999) podem ser reconhecidas três principais fases de deformação no Terreno Apiaí. A primeira é representada por um sistema de deformação de compressão, que gerou uma foliação paralela ao acamamento, sub-horizontal e várias dobras entre as camadas. O segundo sistema produziu dobras abertas com superfície axial na vertical e eixos das dobras sub-horizontal. O sistema de transcorrência, com *trend* NE dextral e foi superposto aos dois sistemas anteriores.

Portanto, na região a ser estudada a deformação presente nas rochas são registros de tectônica de cavalgamento e de transcorrências, observa-se uma foliação S_0/S_1 , à qual associa-se uma foliação S_{n+1} penetrativas (Silva et al., 1999).

A estruturação mais preservada é referente a uma forte orientação das foliações para nordeste, que é relacionado à deformação do Ciclo Brasileiro, que tem como reflexo final um expressivo cinturão de cisalhamento transcorrente. Essa deformação foi responsável por retrometamorfismo nas rochas do embasamento, reorientação de foliações anteriores e desenvolvimento de foliações e metamorfismo da fácies xisto verde. Faixas miloníticas com deformação concentrada são frequentes, principalmente em flancos de dobramentos maiores, o que evidencia forte inversão da estratigrafia original (Silva et al., 1999).

3.4 Geologia Econômica

O Vale do Ribeira é uma região conhecida por seus depósitos polimetálicos de Pb-Cu-Zn, com Ag, Au, Ba e F, essa mineralização é associada às sequências Meso e Neoproterozóicas (Silva, 1990). Nessa região, há também mineralizações de P, F, Ba e Terras Raras mais recentes, associadas ao magmatismo alcalino do Cretáceo (Silva, 1990).

As Jazidas do tipo Perau são caracterizadas por apresentarem mineralização sulfetada, estratiforme, singenética, associada a sequência vulcanossedimentar, com mineralogia principal composta por galena, pirita, calcopirita e barita, com escassez de esfarelita. O zoneamento dos elementos, da base para o topo, é Cu-Pb-Ba, seguindo o padrão desses tipos de depósitos. Esse jazimento encontra-se encaixados nas sequências meta-vulcanossedimentar da Formação Perau (Silva, 1990).

As Jazidas do tipo Rocha ou Painéis apresentam mineralização filoleana, concordante e discordante, e exibem um controle carbonático. Esse jazimento se encontra encaixado na Formação Votuverava, principalmente nos níveis de mármore calcínicos escuros (Silva, 1990).

Esse autor também caracteriza os depósitos de fluorita do Vale do Ribeira, e o classifica em dois tipos: estratiforme Sete Barras e carbonatito Mato Preto. Para o tipo sete barras é proposto um modelo genético com soluções mineralizantes provocando a substituição dos calcários por fluorita e sílica ((Dardene, 1985) citado em (Silva, 1990)). Os depósitos do tipo carbonatito mato preto são depósitos de fluorita associados a carbonatitos, desenvolvidos em estágio tardio da diferenciação magmática alcalina.

Na região de estudo, como descrito por Silva (1990) o depósito é do tipo estratiforme, com mineralizações singenéticas de barita, que concordam com o acamamento das sequências hospedeiras. A zona da barita está intercalada com quartzitos, xistos e metachert pertencentes à Formação Perau. O corpo principal da jazida, encaixado nos xistos e quartzitos, encontra-se na sequência estratigráfica a aproximadamente 50 metros acima das ocorrências de Cu-Pb-Zn. A atitude da camada de barita é N10E/20NW concordante com a xistosidade da encaixante, que na área é paralela ao acamamento sedimentar (Silva, 1990).

4. CAPÍTULO 04 – MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1 Considerações Gerais

A Ciência Geofísica, definida conceitualmente por Orellana (1972):

É um ramo da Física Aplicada que se ocupa do estudo das estruturas ocultas do interior da Terra, e da localização de corpos delimitados pelo contraste de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, por meio de observações realizadas na superfície da Terra.

Essa ciência teve origem e desenvolvimento relacionado a um conjunto de técnicas físicas e matemáticas, aplicadas a exploração do subsolo, na busca e estudo de depósitos de substâncias úteis, como petróleo, águas subterrâneas e recursos minerais (Orellana, 1972).

Atualmente, a Geofísica pode ser dividida em duas áreas de atividades principais: Geofísica Global ou Terra Sólida e Geofísica Aplicada. A Geofísica Global estuda questões referentes a zonas profundas da Terra, como a constituição interna e fenômenos de proporções globais, o enfoque principal desse ramo é a pesquisa básica, importantes para o desenvolvimento de novas técnicas tanto para a Geofísica Aplicada quanto para outras ciências. O ramo da Geofísica Aplicada é o estudo do subsolo, com o objetivo de investigar estruturas ou situações pequenas e/ou pouco profundas, buscando resolver problemas de áreas correlacionadas como mineração, recursos hídricos, engenharia civil, meio ambiente, entre outras (Orellana, 1972).

É importante ressaltar que em todas estas investigações, os corpos ou estruturas buscadas só podem ser detectados desde que haja uma discrepância em alguma propriedade física dos corpos que os rodeiam, seja permissividade dielétrica, resistividade elétrica, cargabilidade, velocidade de propagação de onda, permeabilidade magnética, e/ou densidade. Nesse trabalho, as principais propriedades de contraste a ser estudadas são a resistividade e a cargabilidade, fazendo uso dos Métodos Geoeletricos.

Os Métodos Geoeletricos estão dentre os principais métodos geofísicos para estudo de estruturas na parte superior da crosta terrestre, e estudam a distribuição em profundidade de alguma propriedade eletromagnética, podendo ser a permeabilidade magnética (μ), a constante dielétrica (ϵ) ou a resistividade (ρ), sendo essa última a mais estudada, ((Braga, 1997) e (Orellana, 1972)).

4.2 Eletroresistividade

4.2.1 Histórico

A origem dos métodos elétricos provém do século XVIII com trabalhos sobre a resistividade das rochas e o descobrimento de que o solo é um condutor, (Orellana, 1972).

Apesar disso, o desenvolvimento dos métodos é recente (Orellana, 1972). Esse autor divide o desenvolvimento desse método em época primitiva, época clássica e época contemporânea.

A época primitiva se inicia em 1815 com o descobrimento da potencial espontâneo, pelo inglês Roberto Fox, e sua possível aplicação para o estudo do subsolo. A aplicação em depósitos minerais é realizada por Barnes, Brown e Wells, entre 1880 e 1914, e esses, constroem os primeiros eletrodos não-polarizados. Conrad Schulumberger descobre, em 1913, através do potencial espontâneo, o primeiro mineral não magnético prospectado por técnicas geofísicas. Outros pesquisadores dirigiram sua atenção a campos elétricos artificiais, e Brown, em 1883, patenteou um sistema de prospecção com dois eletrodos. Conrad Schulumberger, além de seu êxito com métodos elétricos de campo natural, em 1915, idealizou o dispositivo de quatro eletrodos para medições da resistividade, (Orellana, 1972).

A época clássica se estende de 1918 a 1960, e se divide nas escolas: Francesa, iniciada por Schulumberger e seguida pelos Soviéticos; Norte-americana, de Frank Wenner. A escola que mais se destaca é a Franco-Soviética que desenvolveu e aperfeiçoou o método de sondagens dipolares, para caracterizar e identificar variações estratigráficas e estruturais na prospecção e extração de petróleo.

O progresso da prospecção geofísica segue até os dias atuais, porém, muitas das metodologias e técnicas desenvolvidas até então são ainda utilizadas, sendo algumas modificadas e/ou aprimoradas. Na época contemporânea se destaca a implementação do magnetotelúrico; o surgimento de novas sondagens elétricas de campo artificial, eletromagnéticas, frequências variáveis; desenvolvimento de novos métodos de prospecção, com destaque da polarização induzida (desenvolvida no Canadá), (Orellana, 1972). O aprimoramento da computação permite também melhores alcances nos cálculos e tratamentos dos dados geofísicos, o que possibilita a utilização de tais métodos em substâncias de pouco estudo, como por exemplo, a barita.

4.2.2 Fundamentos Teóricos

O método da eletrorresistividade se baseia na determinação da propriedade física da resistividade (ρ), que é de acordo com Orellana (1972), a medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra ao passar em um determinado material, ou seja, é o inverso da condutividade (σ). Tal método se destaca por ser um dos principais em estudos de prospecção geofísica.

Os materiais geológicos apresentam grandes variações de magnitude em relação à resistividade, isso ocorre, porque a condutividade depende de diferentes mecanismos que estão relacionados com a estrutura do corpo e também com a forma de condução elétrica, quando esse corpo é submetido a um fluxo de corrente (Orellana, 1972).

Portanto o fluxo de corrente elétrica se propaga, em subsuperfície, de maneira diferente a depender da condutividade do material geológico, e pode-se distinguir três tipos de propagação da corrente elétrica: eletrônica, eletrolítica ou iônica e dielétrica. A condutividade eletrônica é típica dos metais, é a mais intensa e mais rara na natureza. Na eletrolítica a corrente é transportada pelos íons em uma taxa mais lenta. A condução dielétrica ocorre nos materiais isolantes ou fracamente condutores, (Telford et al., 1990)

As rochas, no ambiente geológico, normalmente possuem poros em quantidades variáveis, que podem estar preenchidos por eletrólitos, comportando-se então como condutora iônica, quando o material é submetido a um fluxo de corrente. Sendo assim, a condutividade nesse material irá depender da concentração, mobilidade e dissociação dos íons pertencentes ao fluido que preenchem os poros.

A condutividade dos poros de uma rocha varia com o volume e arranjo dos poros e ainda mais com a condutividade e o conteúdo de água, de acordo com a lei de *Archie*:

$$\rho_r = \alpha \emptyset^{-m} S_a^{-n} \rho_a \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde ρ_r é a resistividade da rocha, \emptyset é a porosidade, S é o grau de saturação (fração ocupada pela água em relação ao volume total dos poros) e ρ_a é a resistividade da água. Os parâmetros α e m juntamente com a porosidade (\emptyset) representam fatores de formação da rocha, onde α está relacionado com a textura da rocha e varia entre 0,5 e 1,15 e m é conhecido como parâmetro de cimentação variando de 1,3 a 2,3 (Orellana, 1972). Esses parâmetros só podem ser conhecidos mediante uma serie de determinações laboratoriais sobre amostras da rocha em questão, a falta dessas medições, toma-se os valores de $\alpha=1$ e $m=2$, de acordo com Keller (1966) citado em Orellana (1972), para porosidades compreendidas entre 10 e 30%, que são as mais comuns nas rochas sedimentares. O parâmetro n , junto com a saturação da água, constituem o índice de resistividade, e esse parâmetro possui um valor aproximado de 2.

De todas as propriedades físicas das rochas e minerais, a resistividade é a que mostra maior variação. A resistividade de minerais metálicos pode ser menor do que 10^{-5} ohm.m, enquanto que aquelas secas e maciças pode ser maior do que 10^7 ohm.m, (Telford et al., 1990). Um condutor é usualmente definido como um material de resistividade menor do que

10^{-5} ohm.m, enquanto um isolante possui resistividade maior do que 10^7 ohm.m, entre esses limites estão os semicondutores (Telford et al., 1990).

Em um mesmo tipo de rocha ou mineral a resistividade pode variar consideravelmente a depender de diversos fatores, como saturação em água, grau de porosidade, grau de metamorfismo e o meio ao qual se encontra. A variação da resistividade nas rochas e minerais mais comuns é demonstrado na Figura 4.1, em tal figura é observado uma sobreposição da barita (a ser estudado nesse trabalho) com as rochas metamórficas (encaixante na área estudada), isso realça o desafio do trabalho na tentativa de segregar, através da geofísica (resistividade) o que é barita e o que é encaixante.

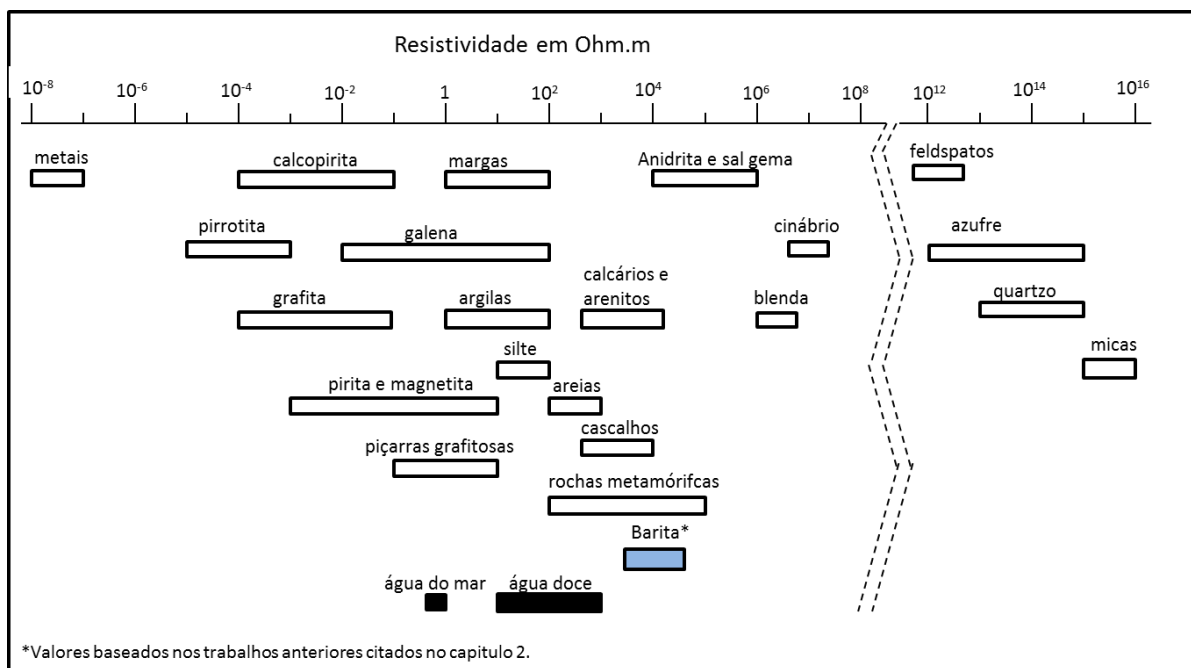


Figura 4.1: Gráfico das margens de variação dos valores de resistividade mais comuns em algumas rochas e minerais. Adaptado de (Orellana, 1972).

Para compreender a medição da resistividade na subsuperfície é necessário entender os fundamentos teóricos do método da eletrorresistividade. Telford et al. (1990) define a resistividade elétrica de um cilindro sólido de comprimento L e seção transversal A , tendo uma resistência R entre as faces, como:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Em função disso a unidade de resistividade no SI será ohm.m, já que a resistência R é dada em Ohm pela lei de Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde ΔV a diferença de potencial elétrico (volt) e I a corrente elétrica (A). A Figura 4.2 representa essa configuração.

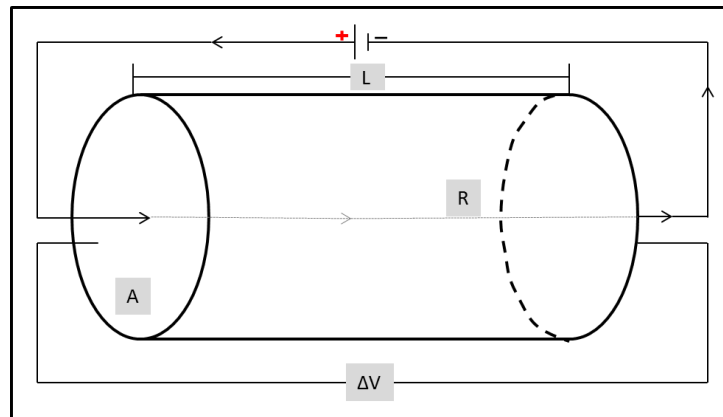


Figura 4.2: Desenho esquemático da lei de Ohm e consequente medida da resistividade. Modificado de (Orellana, 1972).

Em campo, no geral, o método da eletrorresistividade é baseado na inserção de uma corrente elétrica no subsolo, através de um par de eletrodos. A passagem dessa corrente causa uma diferença de potencial que é medida por outros pares de eletrodos de potencial situados na superfície, e consequentemente tem-se a medida da resistência do material em subsuperfície e da resistividade, (Braga, 1997).

Como nos arranjos mais comuns do método da eletrorresistividade utiliza-se um par de eletrodos de corrente (A e B), o potencial medido será afetado por ambos os eletrodos. O esquema da Figura 4.3 mostra a corrente elétrica I sendo introduzida no subsolo pelos eletrodos denominados A e B e o potencial medido pelos eletrodos M e N.

Baseado em Orellana (1972), Telford et al. (1990), (Braga, 2016) e considerando a subsuperfície uma semi-esfera homogênea e isotrópica de resistividade uniforme, área A igual a $2\pi r^2$ e baseado nas Eq. 4.2 e 4.3 a resistividade em determinado ponto localizado a distância r pode ser dada por:

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Como já mencionado, o potencial resultante irá ter influencia da medida nos eletrodos M e N, e portanto, a diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos MN será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (\text{Eq. 4.5})$$

tendo V_M dado por:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

e V_N como:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Sabendo que AM, BM, NA e BN são os valores das distâncias entre os eletrodos de corrente e os de potencial, pode-se calcular o valor da resistividade do meio investigado mediante a seguinte equação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

onde K é o fator geométrico, que irá depender do arranjo de campo utilizado, nesse exemplo, dado por:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Na prática, sabemos que o subsolo não é homogêneo, portanto o valor de resistividade medido representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em determinado volume do material da subsuperfície (Braga, 1997). As medições feitas em campo são, então, consideradas valores de resistividade aparente (ρ_a) que é a variável medida na maioria dos métodos geoeletricos, e é a partir dela que calcula-se a inversão para obtenção da resistividade verdadeira e interpretação final.

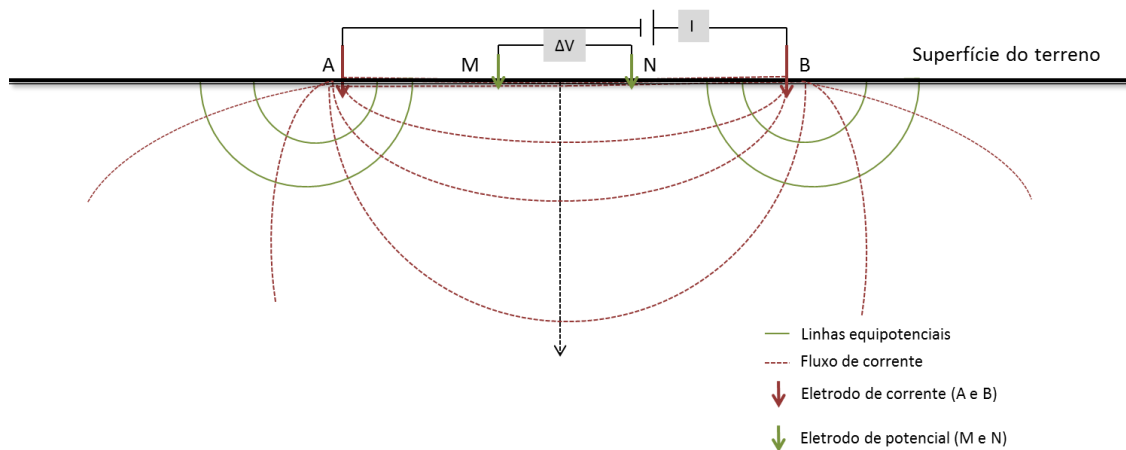


Figura 4.3: Esquema das medições de campo do método da eletrorresistividade com linhas equipotenciais e de fluxo de corrente com visualização 2D (perfil). Modificado de (Orellana, 1972) e (Telford et al., 1990).

4.3 Polarização Induzida

4.3.1 Histórico

De acordo com Sumner (1976) a polarização induzida é o fenômeno elétrico observado quando se injeta uma corrente elétrica na subsuperfície e tem-se o decaimento retardado da voltagem nos materiais terrestres, quando essa corrente é interrompida. Para

Telford et al. (1990) é um método geofísico que tem sido empregado principalmente na exploração de metal base e em águas subterrâneas.

Telford et al. (1990) indica que o efeito IP pode ser medido como função do tempo (IP no domínio do tempo), no qual o decaimento da voltagem é medido como função do tempo, ou em função da frequência, já que a resistividade aparente pode variar com a frequência, constituindo outro método de detecção, o IP no domínio da frequência. Neste trabalho trabalhar-se-á com o IP no domínio do tempo.

Segundo Sumner (1976), Schulumberger foi o primeiro a descrever o efeito IP, em 1920, quando realizava trabalhos com os métodos geolétricos próximos de jazimentos de sulfetos, ele observou que o campo elétrico criado quando se inseria uma corrente elétrica no subsolo não desaparecia abruptamente quando a corrente era interrompida. Esse método, porém, só foi popularizado como uma ferramenta geofísica na década 1950.

O trabalho inicial de desenvolvimento da aplicação sistemática do método IP em exploração mineral, realizado em Newmont Exploration Limited, no ano de 1946, está bem resumido em uma série de artigos fundamentais editados por Wait (1959), como citado por Sumner (1976).

Maden e seus colaboradores contribuíram, entre os anos de 1957 e 1959, com pesquisas teóricas e laboratoriais com o objetivo de enfatizar o efeito IP devido a substâncias não-metálicas, (Sumner, 1976). Vacquier et al. (1957) citado em Sumner (1976) também realizaram trabalhos laboratoriais e de campo para desenvolver técnicas com o IP para o uso em águas subterrâneas, eles propuseram que os efeitos de membrana eram uma causa dominante de polarização induzida.

Nos anos entre 1955 e 1960 muitas universidades, mineradoras e agências governamentais se interessaram nas pesquisas do IP, devido ao sucesso do método para exploração de minerais metálicos (Sumner, 1976). Desde então, as pesquisas e levantamentos de IP mantiveram sua taxa de crescimento.

O IP é um importante método de exploração mineral e uma de suas principais vantagens é a sua capacidade de, sobre condições favoráveis, detectar a presença de pequenas quantidades de minerais metálicos (Sumner, 1976). Ainda segundo esse autor, a magnitude da resposta IP geralmente aumenta com a quantidade de mineralização, o que é comum também para outros métodos geofísicos, ele cita então que a polarização induzida é uma técnica particularmente útil em áreas de mineralização disseminada, onde outros métodos de exploração geofísica não são tão eficazes.

4.3.2 Fundamentos Teóricos

Como já mencionado, o fenômeno da polarização induzida é observado quando se passa uma corrente elétrica por corpos e cria-se um campo elétrico, esse campo não desaparece bruscamente quando se corta essa corrente, e sim de modo mais lento. Sendo assim, em campo, o fenômeno IP no domínio do tempo é medido injetando uma corrente no subsolo e observando as alterações de tensão resultante com o tempo. A partir do momento que a corrente é desligada, a tensão primária (V_p) cai quase imediatamente para um nível de resposta secundária (V_s) e, em seguida, decai em função de uma curva (curva de descarga IP) com o tempo, como mostra a Figura 4.4, (Sumner, 1976).

A observação do decaimento dessa tensão secundária é um meio de medir a polarização de um material, já que a curva de descarga IP está ligada à capacidade dos terrenos de se polarizarem, o que constitui a susceptibilidade IP dos materiais da terra (Braga, 1997).

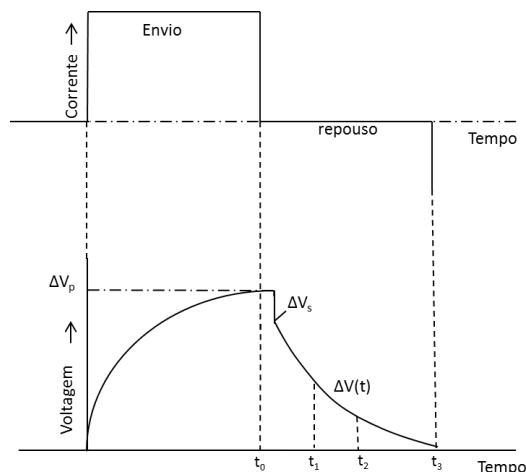


Figura 4.4: Curva de descarga IP no domínio do tempo (variação do potencial elétrico em função do tempo). Modificado de (Sumner, 1976).

A variação no decaimento da curva de descarga IP é devida a uma corrente interna, dentro e ao redor do material polarizado, causada pelo retorno dos íons às suas posições de equilíbrio, atuando sob a influência de campos elétricos previamente induzidos. Portanto, o maior intervalo de tempo da resposta retardada da tensão de decaimento IP em comparação com os tempos curtos, implica que há longos caminhos elétricos condutores (Sumner, 1976).

O parâmetro mais simples e intuitivo para medição do efeito IP seria a relação entre V_s/V_p , segundo Orellana(1974) e demonstrados na Figura 4.4. Porém, o mesmo autor ressalta que é quase impossível medir V_s devido aos fenômenos transientes ligados a interrupção de corrente, fazendo-se então, a medida da tensão sobre a curva de descarga IP ($\Delta V(t)$) em determinados tempos t_1 e t_2 .

$\Delta V(t) \ll V_p$ e a relação entre os dois é o parâmetro chamado cargabilidade (M), que pode ser expresso pela equação:

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Segundo Telford et al.(1990), essa é a quantidade mais usada nas medidas de IP no domínio do tempo. Esses autores também ressaltam a importância da medida em um intervalo de tempo entre 0,1 e 10 segundos a fim de se evitar ruído e a perda da sensibilidade de detecção do equipamento.

4.3.3 Fontes do Efeito IP

Apesar da complexidade dos fenômenos que explicam o armazenamento de alguma energia no material, e conseqüentemente a polarização induzida, Telford et al. (1990) propõe que a energia química é a mais importante. O armazenamento dessa energia pode ser resultado da variação da mobilidade dos íons em fluidos em toda estrutura da rocha ou variação entre condutividade iônica e eletrônica, quando se tem a presença de substância metálica. O primeiro desses efeitos é conhecido como Polarização de Membrana e o outro como Polarização do eletrodo, ambos são descritos abaixo com mais detalhes.

Polarização do eletrodo

De acordo com Orellana (1974) a polarização do eletrodo é a que possui um maior pronunciamento no efeito IP e é comumente a mais aceita para explicar tal efeito. Essa polarização ocorre quando há a presença de material metálico na rocha e o fluxo de corrente é parcialmente eletrônico e parcialmente eletrolítico (Telford et al., 1990).

Logo, quando se aplica uma corrente em tal situação, haverá uma passagem de condução iônica para eletrônica e vice-versa, como mostra a Figura 4.5. Isso faz com que nas duas superfícies opostas do corpo produz-se uma acumulação de íons (Figura 4.5). Quando a corrente é cortada a distribuição dos íons se modifica e volta ao estado de equilíbrio, e para isso gasta um certo tempo, durante o qual existe uma polarização do corpo, atribuída aos efeitos observados, (Orellana, 1974).

Este fenômeno é observado em quase todos os sulfetos, alguns óxidos como magnetita, ilmenina, pirolusita e cassiterita e também em rochas grafitosas. Portanto, esse método pode ser utilizado na prospecção desses insumos minerais. Vale ressaltar que a polarização varia diretamente com a concentração mineral e é maior quando a mineralização é disseminada, o que constitui a grande vantagem da polarização induzida na prospecção desse tipo de mineralização em comparação com outros métodos geoeletricos.

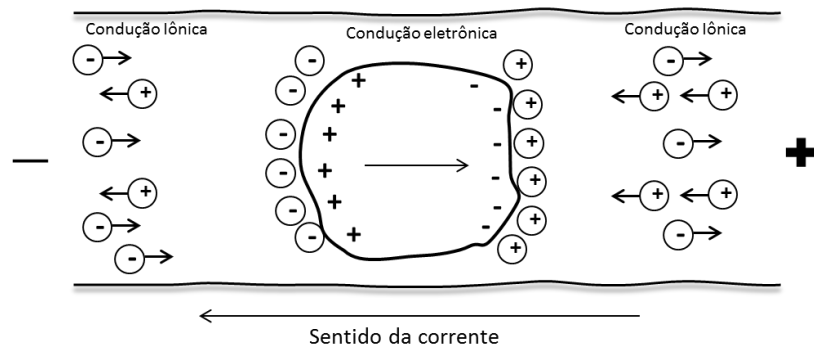


Figura 4.5: Esquema para explicar a polarização do eletrodo. Modificado de (Sumner, 1976).

Polarização de Membrana

A condução iônica ou eletrolítica é a predominante na maioria das rochas que não possui substâncias metálicas e conseqüentemente não produzirão a polarização do eletrodo. Um fenômeno conhecido como efeito IP normal é pronunciado nessas rochas e é devido à polarização de membrana.

A polarização da membrana pode estar presente, mesmo que não haja fluxo de corrente, é observada quando cargas negativas em argilas, faces de clivagem ou em bordas de minerais em camadas e fibrosos atraem uma nuvem difusa de íons positivos e repelem os negativos (Sumner, 1976). Esses íons móveis podem bloquear passagens de poros e então, quando aplicado uma corrente, os ânions migrarão e se acumularão, causando gradientes de concentração. Quando a corrente for desligada, os íons retornam à sua posição de origem, gastando um tempo finito para isso, como ilustra a Figura 4.6, (Telford et al., 1990).

O efeito da polarização de membrana é mais pronunciado na presença de argilominerais, os quais possuem poros particularmente pequenos. A magnitude da polarização, no entanto, não aumenta indefinidamente com a concentração dos argilominerais na rocha, mas sim alcança um máximo e então decresce. Uma concentração ótima varia em diferentes tipos de argilas, sendo menor em Montmorillonitas e maior em caulinitas (Telford et al., 1990).

A principal diferença mensurável entre a polarização da membrana e do eletrodo é a magnitude da resposta, sendo os efeitos de IP da membrana muito menores do que os efeitos IP do eletrodo.

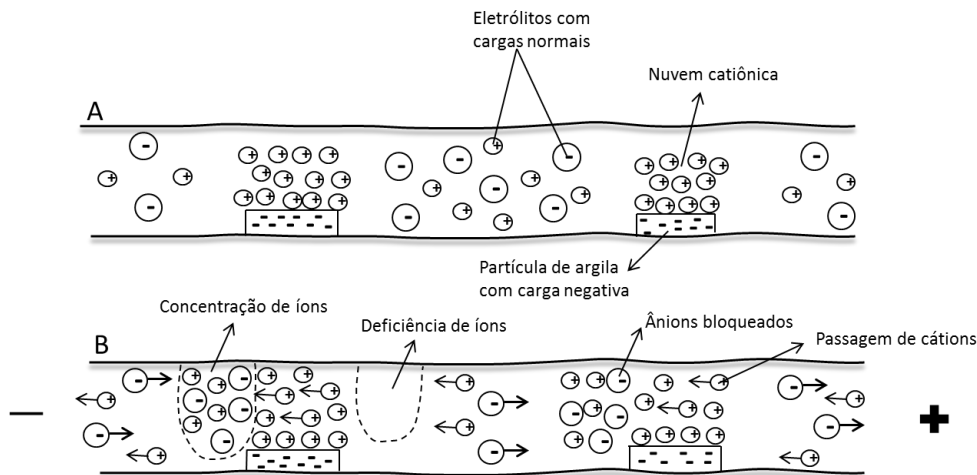


Figura 4.6: Esquema para explicar a polarização de membrana. Em A meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico (posição de equilíbrio) em B meio poroso após a aplicação de um campo elétrico. Modificado de (Sumner, 1976).

4.4 Resistividade Capacitiva – OhmMapper

4.4.1 Histórico

A resistividade capacitiva (CR) é uma técnica geofísica que surge para estender a aplicação da convencional eletroresistividade em ambientes os quais o acoplamento galvânico é notoriamente difícil de alcançar, como por exemplo, em geleiras, estruturas de engenharia como rodovias, rochas duras e solos secos. Sob certas condições, as medições da resistividade por capacitância são equivalentes às obtidas com a técnica tradicional, já que trata-se do mesmo parâmetro medido (Kuras et al., 2006).

O histórico descrito a seguir é baseado na síntese, elaborada por Kuras et al. (2006) e Cavenaghi (2017).

A CR teve seu desenvolvimento nas últimas décadas, sendo que a primeira aplicação geofísica bem-sucedida foi resultado de pesquisas realizadas no início dos anos 50 para o Departamento de Defesa dos EUA. Já o primeiro trabalho pioneiro foi realizado na Rússia, nos anos 70, por Timofeev, que buscava facilitar as medidas de resistividade no gelo.

Na década de 1980 pesquisadores Canadenses e Norte-americanos aprimoram a tecnologia dos equipamentos com operação capacitiva para estudos geofísicos. Estudos posteriores, a partir da década de 1990, incluem uma variedade de informações empíricas, técnicas e teóricas que são utilizadas nos projetos práticos atuais.

Um dos sistemas de medições desenvolvidos é o conceito do quadrupolo (amplamente utilizado no caminhamento elétrico convencional) que foi adaptado por Gard e Tabbagh para equipamentos que operam com cabos capacitivos e realizam a medição da resistividade sem o contato galvânico dos eletrodos. O sistema de eletrodos capacitivos multicanal é descrito por

Shima e seus colaboradores, assim como ferramentas de resistividade de poço com sensores capacitivos foram desenvolvidas e descritas por diversos autores na década 1990.

A partir de então, diversos equipamentos e técnicas foram desenvolvidos no Canadá, EUA, Rússia e Inglaterra o que fez e faz a crescente utilização da resistividade capacitiva para diversas finalidades na geociências.

4.4.2 Fundamentos Teóricos

Conceitualmente, a técnica da resistividade capacitiva baseia-se no conhecido princípio da medição da resistividade na técnica convencional da eletrorresistividade, que usa, predominantemente, dois dipolos para determinar a resistividade do subsolo. A principal diferença encontra-se na ausência eletrodos galvânicos do método tradicional que é substituído pela natureza capacitiva do mecanismo de acoplamento entre sensores e terreno, (Kuras et al., 2006), destaca-se também o uso de corrente alternadas no CR, o que também o diferencia do método convencional.

O conceito da medição da resistividade por acoplamento capacitivo (CCR) é mostrado na Figura 4.7. A tensão é aplicada a um condutor dentro do transmissor CCR o que faz com que surja um campo elétrico entre o condutor e o terreno, sendo estes separados um do outro por um isolante, causando então, o acúmulo de cargas. O condutor e o terreno atuam como duas placas de um capacitor separadas por um resistor dielétrico. A capacitância do condutor e do terreno permite um caminho para que uma corrente elétrica alternada flua para o terreno a partir do condutor. E a partir desse mesmo princípio é possível um receptor CCR detectar as tensões de corrente que foram geradas no solo pelo transmissor, e assim pode-se adquirir a resistividade, (Yamashita et al., 2004).

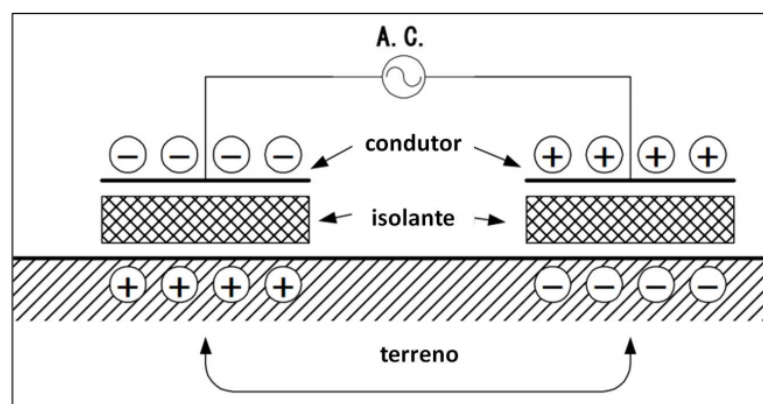


Figura 4.7: Modelo conceitual da medição da resistividade por acoplamento capacitivo. Modificado de (Yamashita et al., 2004).

Para Kuras et al. (2006) a Resistividade Capacitiva faz uso de frequências intermediárias, na faixa de áudio (8 a 32 KHz, (Neukumun et al., 2010)). Fazendo-se uso

dessas frequências intermediárias, as medições operam em um modo quasi-estático, com baixo número de indução, nas quais os efeitos indutivos podem ser desconsiderados e, então, as medidas de resistividade capacitiva podem ser consideradas equivalentes às medidas de resistividade obtidas pelo método convencional. Nesse trabalho foi utilizado o equipamento OhmMapper que trabalha na frequência de 16,5 KHz.

4.5 Técnicas e arranjos de aquisição dos dados

Na geofísica aplicada os métodos geoeletricos são classificados, segundo alguns autores, baseado na origem do campo elétrico, sendo classificados em métodos de campo natural e métodos de campo artificial. Como o segundo grupo é mais numeroso, devido a diferentes fontes e pontos de observação, eles ainda se distinguem em: superficiais, profundos, marinhos e aéreos, (Braga, 1997).

Essas classificações podem causar certas confusões, já que misturam procedimentos de campo, com tipo de método utilizado (parâmetro medido). Nesse contexto o trabalho de Braga, 1988 citado em Braga (1997) propõe uma classificação dos métodos geoeletricos baseada em: método geofísico, técnica de desenvolvimento e arranjo de campo, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Classificação dos métodos Geoeletricos

Método	Parâmetro físico medido	Resistividade, Cargabilidade, Potencial Espontâneo, etc
Técnica	Procedimento para obtenção do parâmetro físico	Sondagens, Caminhamentos e Perfilagens
Arranjo	Disposição dos circuitos para o desenvolvimento da técnica	Schulumberger, Wenner, Dipolo-dipolo, polo-dipolo

4.5.1 Técnicas de aquisição

Como visto na Tabela 4.1 existem três tipos de técnicas de aquisição para prospecção geoeletrica, são elas: Sondagem Elétrica Vertical, Caminhamento Elétrico e Perfilagem elétrica. A diferença básica entre essas três técnicas encontra-se na disposição dos eletrodos em campo ou no interior de furos de sondagens como mostra a Figura 4.8.

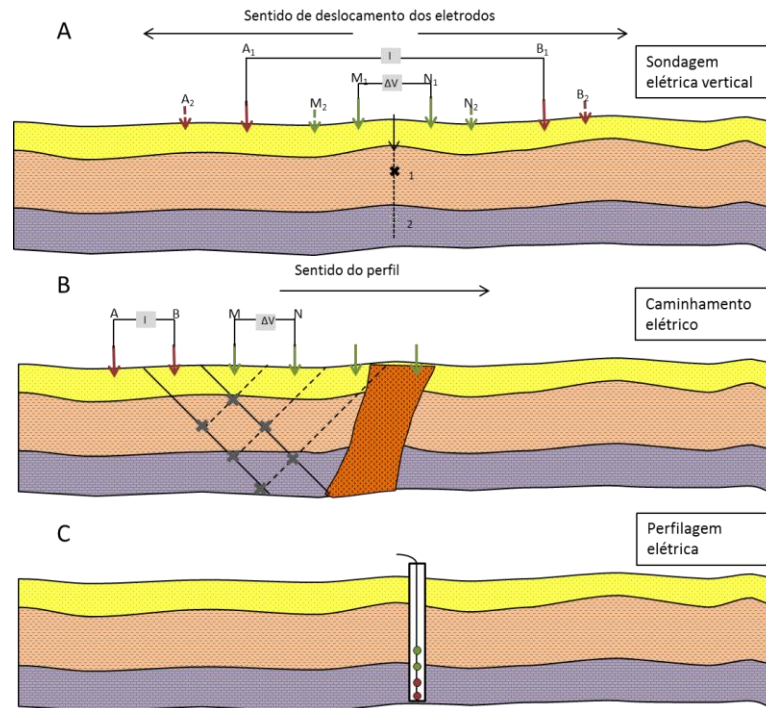


Figura 4.8: Técnica de aquisição dos dados. A: técnica da sondagem elétrica vertical, B: Caminhamento elétrico e C: Perfilagem elétrica. Modificado de (Braga, 1997).

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) consiste na medida do parâmetro físico, seja resistividade ou cargabilidade, em um ponto fixo na superfície, alcançando diferentes profundidades a medida que se aumenta o espaçamento entre os eletrodos. Nesse tipo de aquisição a disposição dos eletrodos na superfície do terreno é simétrica e a direção de afastamento dos eletrodos é fixa, como mostra a Figura 4.8A.

Para Ward (1988) a SEV possui suas limitações, já que ela é aplicada normalmente em meios compostos por camadas lateralmente homogêneas, e a Terra não é inteiramente estruturada dessa maneira. Portanto, para obter a melhor performance dessa técnica, as investigações devem ser efetuadas em terrenos estratificados, com camadas horizontais ou levemente inclinadas (Braga, 1997).

O método possui diversas aplicações, quando em meio estratificado, podendo ser citadas: determinação da estratigrafia, realização de um perfil de solo, determinação de zona saturada, camadas contaminadas, topo do embasamento (quando esse não está muito profundo), (Telford et al., 1990).

A Perfilagem Elétrica (Figura 4.8C) é utilizada no interior de furos de sondagens ou quando se tem poços na superfície do terreno. Esse método possui um caráter investigativo tanto lateral quanto em profundidade, já que o equipamento percorre toda a extensão do

furo/poço. É uma técnica muito utilizada em estudos hidrogeológicos e na prospecção de petróleo.

O Caminhamento Elétrico (CE), retratado na Figura 4.8B, trata-se de um método que estuda as investigações laterais da resistividade do subsolo, motivo pelo qual foi a técnica de aquisição dos dados desse trabalho. É uma técnica utilizada na investigação de contatos geológicos verticais ou inclinados, mudanças laterais de fácies, diques e outros corpos ou estruturas que se apresentem heterogeneidades laterais da resistividade. Essas investigações são, comumente, realizadas ao longo de perfis paralelos no terreno, o que resultada em uma verdadeira cartografia elétrica do terreno, (Orellana, 1972).

O CE, independentemente do arranjo de campo escolhido, é um perfil realizado perpendicular às estruturas aflorantes do terreno, onde todo o arranjo é movido nessa mesma direção com uma separação fixa entre os eletrodos de corrente e os de potencial, (Ward, 1988). A separação entre os eletrodos é definida a depender da profundidade de investigação desejada, já que quanto maior a distancia dos eletrodos, maior a profundidade investigada. Concluindo-se o movimento dos eletrodos ao longo de todo o perfil a ser estudado, ter-se-á investigado lateralmente a propriedade física, seja resistividade ou cargabilidade, do meio.

4.5.2 Arranjos de aquisição

Como visto também na Tabela 4.1 existem diversas formas de disposição dos eletrodos em campo, isto é, o arranjo de aquisição. A escolha de determinado arranjo, irá depender de qual técnica será usada (SEV, CE ou Perfilagem) e inúmeros outros fatores, dentre os quais: razão sinal-ruído, acoplamento eletromagnético, sensibilidade lateral, resolução de estruturas inclinadas e horizontais, profundidade e sensibilidade da investigação, sensibilidade do mergulho, sensibilidade da topografia, sensibilidade das heterogeneidades, são alguns citados por (Ward, 1988).

A Figura 4.9 mostra os arranjos de campo mais comuns e seus respectivos fator geométrico (k), já que, como visto nas equações 4.8 e 4.9, o fator geométrico (K) é dependente do arranjo utilizado. Os arranjos de campo mais comuns aplicados à técnica da sondagem elétrica vertical são Wenner e Schullumberger ((Braga, 1997) e (Loke, 1999)), enquanto que para o caminhamento elétrico (imageamento 2D da subsuperfície) os arranjos mais comuns são: Wenner, Dipolo-dipolo, Wenner-Schullumberger, Polo-polo e Polo-dipolo.

Coggon (1973), após diversas comparações com alguns tipos de arranjo para o levantamento de dados IP, conclui que o arranjo dipolo-dipolo é o que apresenta melhor resolução para esse método. Ward (1988) também mostra que o arranjo dipolo-dipolo é o que

possui maior sensibilidade em identificar heterogeneidades laterais; Telford et al. (1990) ressalta que o acoplamento entre os cabos de potencial e corrente é reduzido com esse arranjo. Além desses Braga (1997) pontua que esse é o arranjo de melhor resolução lateral e de fácil montagem em campo. Portanto, baseado nos objetivos dos levantamentos dos dados desse projeto e nos benefícios de cada arranjo, sabendo-se também que na área a ser estudado tratam-se de pequenos corpos, utilizou-se do arranjo dipolo-dipolo.

No arranjo dipolo-dipolo, como mostra a Figura 4.10, os centros do dipolo se mantêm fixo, o espaçamento entre os eletrodos AB e MN é o mesmo e o espaçamento entre os dipolos AB e MN podem variar quando se utiliza, simultaneamente, vários dipolos MN ao longo da linha. Realizando esse procedimento, consegue-se atingir diferentes níveis de investigação (n), já que cada dipolo MN irá representar um nível a ser investigado.

A profundidade de investigação do arranjo dipolo-dipolo está diretamente relacionada ao espaçamento entre os eletrodos (a) e os níveis de investigação (n). Sabe-se, no entanto, que à medida que se afasta do dipolo AB, menor é o potencial e as medidas se tornam menos precisa, logo, quanto maior o número de níveis de investigação (maior número de dipolos MN), menor a sensibilidade das medidas, (Loke, 1999). Na Figura 4.10 também pode-se observar a profundidade teórica investigada, a depender dos fatores mencionados

Arranjo	Geometria	Fator Geométrico (K)
Dipolo-dipolo		$k = \pi n(n+1)(n+2)a$
Polo-dipolo		$k = 2\pi n(n+1)a$
Polo-polo		$k = 2\pi a$
Wenner		$k = 2\pi a$
Schlumberger		$k = \pi n(n+1)a$

Figura 4.9: Principais arranjos de campo de investigações geolétricas, ilustrando geometria e o respectivo fator geométrico (k). Modificado de (Ward, 1988) e (D. M. Loke, 1999).

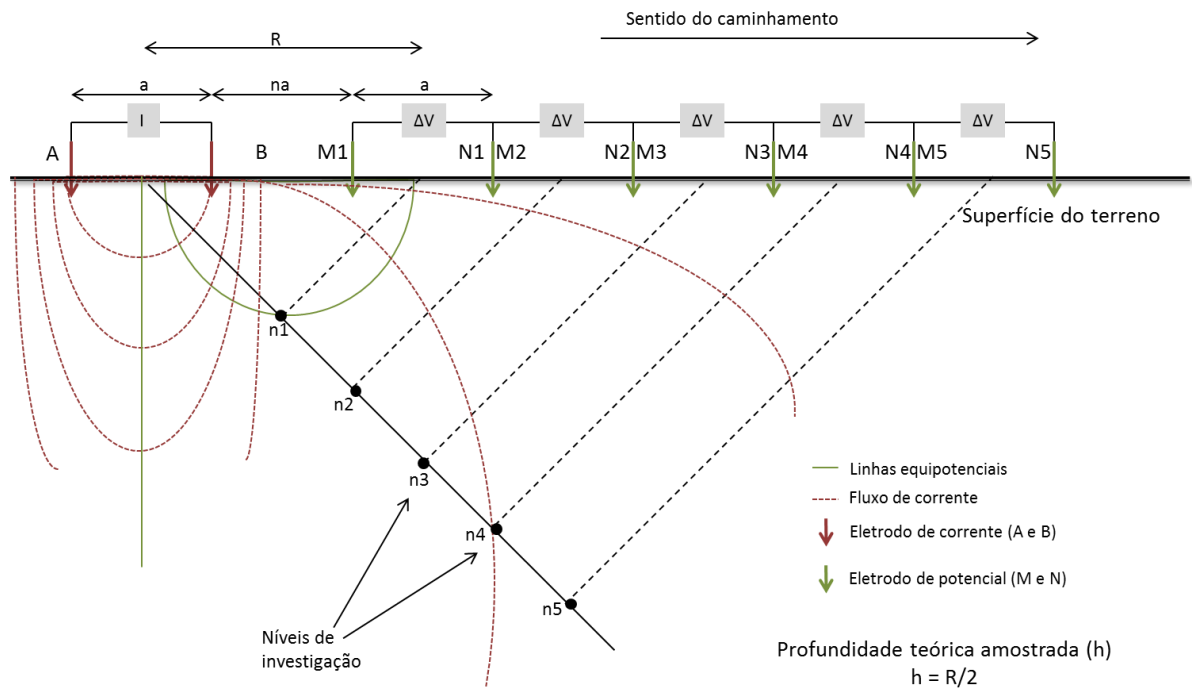


Figura 4.10: Disposição inicial em campo do arranjo Dipolo-dipolo com 5 níveis de investigação. Modificado de (Elis, 1998).

5. CAPÍTULO 05 - AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

5.1 Considerações Gerais

No mês de abril de 2017 foram realizados dois testes preliminares na área de estudo, com o objetivo de investigar a resposta geofísica dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida em corpos de barita conhecido, área 1, e em local de possível ocorrência, área 2; tais métodos investigam os parâmetros de resistividade e cargabilidade, respectivamente. Em julho do mesmo ano, novos dados foram coletados buscando mapear os corpos conhecidos em superfície e nomeados A, B, C, D, E, G e J. A Figura 5.1 mostra os respectivos perfis realizados nessas regiões. Embora sejam veios com controle estrutural, a cobertura vegetal impediu uma adequada orientação das linhas, com base na orientação dos corpos.

Em 2019 um novo teste com o equipamento OhmMapper, que também investiga resistividade, foi realizado na mesma área 1, cujo objetivo foi validar os dados já coletados e investigar a resistividade coletada através do acoplamento capacitivo. A Figura 5.1 também mostra os dois perfis realizados em tal região.

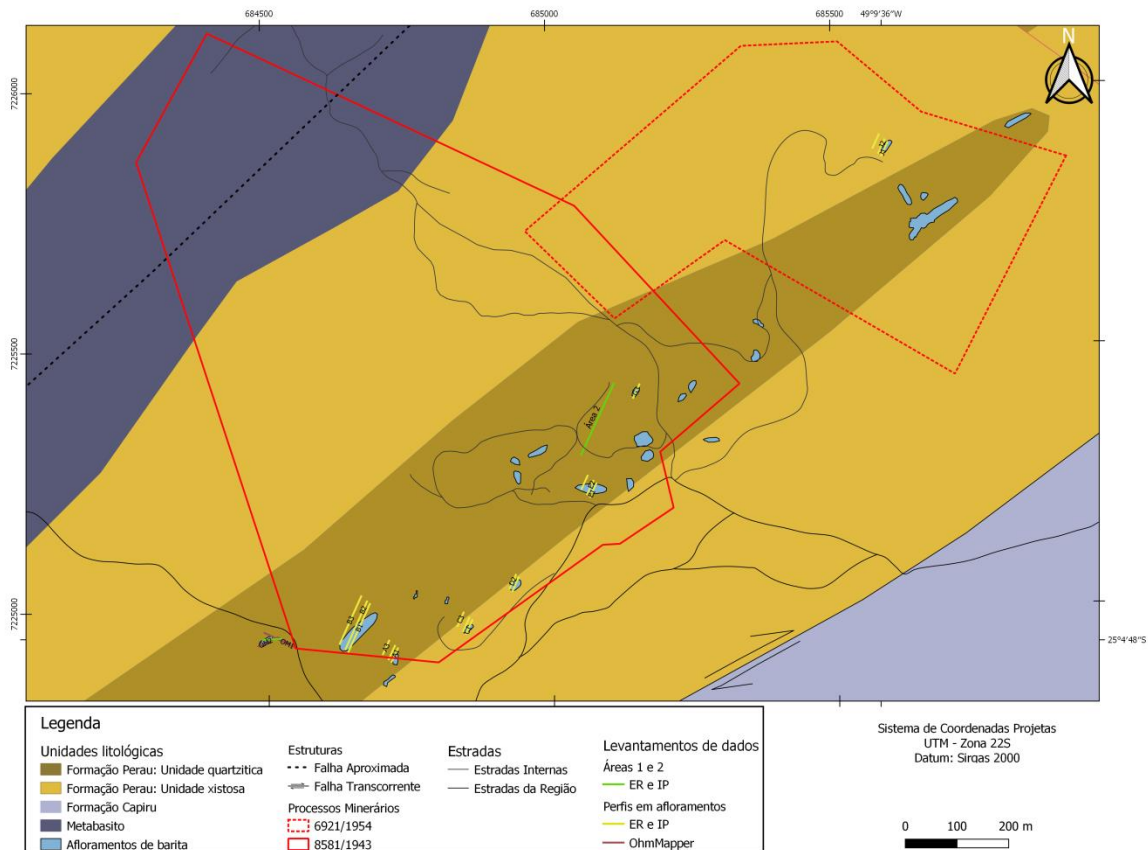


Figura 5.1: Mapa da área de estudo com perfis realizados.

Em um trabalho pós campo, dois testes laboratoriais em amostras de Barita foram realizados. Os testes foram desenvolvidos no departamento de Geofísica do Instituto de

Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, nos laboratórios de Geofísica Aplicada, e visavam a medição da resistividade da amostra.

Um dos testes foi a medição da resistividade da amostra de mão imersa em um caixa de simulação, o outro tratou de medir a resistividade pontual do mineral.

5.2 Equipamentos utilizados em campo

Na aquisição dos dados de resistividade e cargabilidade da primeira campanha foram utilizados o resistímetro Syscal R2 (módulo de transmissão/recepção e conversor 250 W DC/DC) e o Elrec Pro (módulo de recepção), ambos desenvolvidos pela empresa francesa *IRIS Instrument*. Junto com esses equipamentos é necessário o uso de uma bateria 12V, como mostra a Figura 5.2.

A função do Syscal R2 é realizar a transmissão de corrente elétrica (módulo Tx – *only time domain*) e a do Elrec Pro é realizar as medidas de resistividade e cargabilidade aparentes (módulo Rx – *only time domain*). O módulo Tx injeta um valor de corrente pelos eletrodos metálicos, que é informado pelo operador ao módulo Rx, estabelecendo assim um sincronismo pelo formato de onda de corrente; os eletrodos de potencial são conectados ao módulo Rx e detectam os valores de resistividade e cargabilidade aparentes em cada ponto.



Figura 5.2: Equipamentos utilizados na aquisição dos dados. De cima para baixo: bateria 12V, ElrecPro, Sycal R2, Conversor DC DC.

Além dos resistímetros, outros equipamentos são utilizados, como eletrodos metálicos para injeção de corrente (eletrodos de corrente), eletrodos não polarizáveis (poroso)

para medição de potencial (eletrodos de potencial), cabos de conexão, de injeção de corrente e de medição de potencial, solução de sulfato de cobre para os eletrodos de potencial, trenas e marretas para montagem dos perfis de aquisição.

Os eletrodos porosos são constituídos por um tubo de PVC, uma haste de cobre interna em forma de espiral, placa cerâmica na base e a solução de sulfato de cobre preenchendo o recipiente. A haste de cobre fica imersa em solução de seu próprio sal, e a base de cerâmica permite que esta solução vazze lentamente, causando uma resistividade de contato com o solo e minimizando a poluição dos dados por ruídos de polarização do eletrodo.

Na aquisição dos dados de resistividade por acoplamento capacitivo foi utilizado o equipamento OhmMapper, da *Geometrics*. Esse equipamento utiliza de receptores que são conectados entre si através de cabos dipolares e de um transmissor que é ligado ao sistema de recepção por meio de uma corda não condutora; todo esse conjunto é rebocado por um operador ou veículo, como mostra a imagem esquemática da Figura 5.3.

Todos os equipamentos utilizados são pertencentes ao departamento de geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.



Figura 5.3: Equipamento OhmMapper em utilização no campo e com destaque de seus elementos

5.3 Eletrorresistividade e IP

Os dados de eletrorresistividade e IP, como já mencionado, foram adquiridos em duas campanhas. Em ambas foi utilizada a técnica de caminhamento elétrico (CE), já que buscava-se a continuidade lateral da mineralização, e o arranjo Dipolo-Dipolo, devido ao caráter de detalhe e precisão dos resultados, além de ser um arranjo de fácil montagem em campo. Os parâmetros de aquisição IP foram: tempo de integração 2 segundos; tempo de atraso (*delay time*): 0,16 segundos (ou 16 milissegundos) e usou-se mpilhamento (*stacking*) mínimo de 10 medidas.

No primeiro trabalho de campo, duas foram as regiões alvos, uma com ocorrência aflorante de barita e outra com possível ocorrência em profundidade, nesses ensaios também foram coletados dados topográficos. No corpo conhecido, os ensaios de CE foram realizados ao longo de um perfil de 40 metros, primeiramente com abertura de 5 metros entre os eletrodos, posteriormente, com a intenção de obter melhor resolução e detalhe do corpo, o ensaio foi repetido sobre o mesmo perfil com um espaçamento de 2 metros entre os eletrodos. O mapa com destaque para essa região é mostrado na Figura 5.4B.

A região intitulada área 2 com o perfil executado é mostrado na Figura 5.4C. Como nessa região a ocorrência de barita é suspeita, foi realizado um ensaio ao longo de um perfil de 160 metros com abertura de 10 metros entre os eletrodos, com o objetivo de localizar zonas muito resistivas que possam indicar a presença da mineralização.

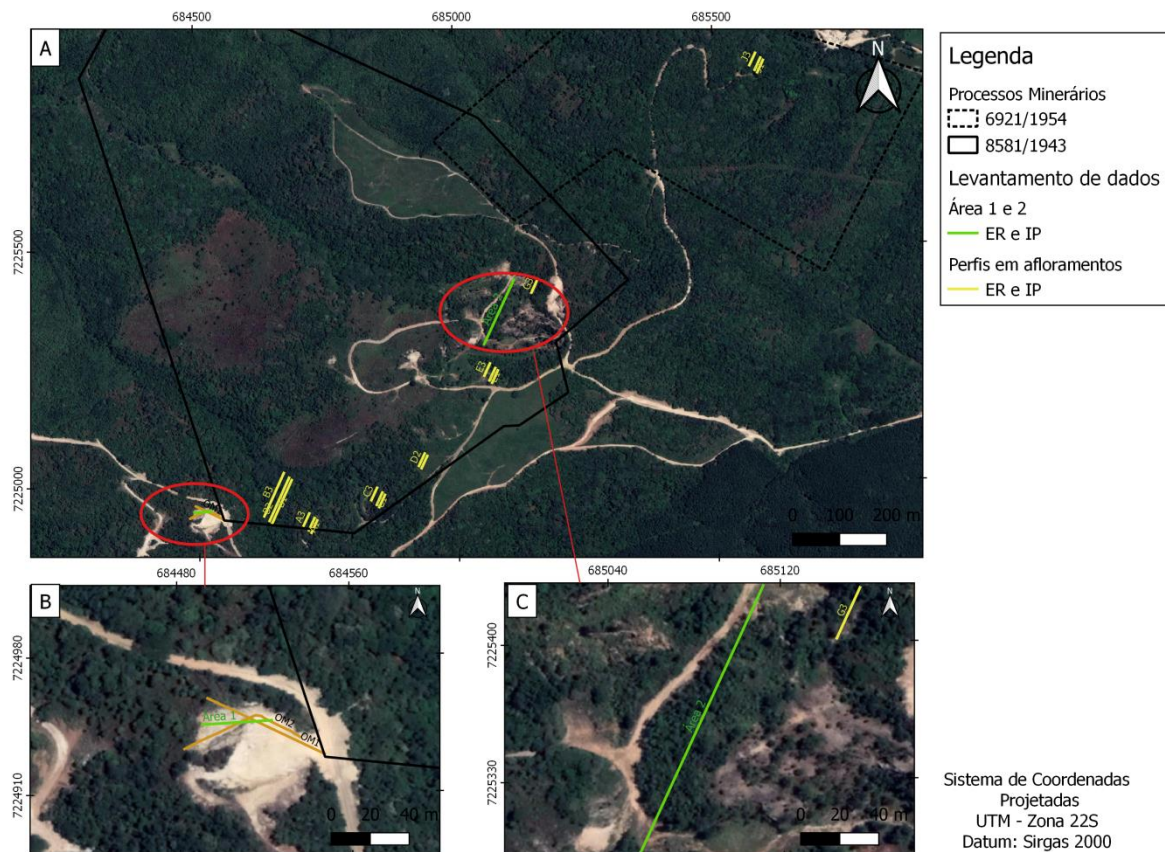


Figura 5.4: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfil da área 1, C: Destaque para perfil da área 2.

Os ensaios realizados posteriormente buscaram mapear lateralmente e também em profundidade os corpos aflorantes, para isso buscou-se realizar perfis paralelos entre si e perpendiculares aos corpos. Como os perfis possuem pequena extensão, foi considerado uma região plana e por isso não foram coletados dados topográficos.

Para todos os perfis dessa campanha foi utilizado um espaçamento entre os eletrodos de 4 metros, e a distância entre os perfis dentro de um mesmo corpo foi de 7,5 metros do primeiro para o segundo perfil e de 15 metros do segundo para o terceiro, quando existente. Como observa-se na Figura 5.5B, sobre os corpos A, B e C foram realizados três perfis, obedecendo o espaçamento entre eles exemplificado a cima, e com comprimento dos perfis de 50 metros para todos àqueles realizados sobre o corpo A, 80, 76 e 76 metros para os perfis B1, B2 e B3, respectivamente, e 48, 48 e 40 metros para os perfis C1, C2 e C3, respectivamente. No corpo D, também observado na Figura 5.5B foram realizados dois perfis distanciados entre si 7,5 metros e com comprimento de 36 metros. A Figura 5.5C detalha a região de realização dos perfis sobre os corpos E e G, no corpo E foram realizados três perfis, seguindo os espaçamentos definidos e com comprimento de 44 metros para o perfil E1, 40 metros para o perfil E2 e 52 metros para o perfil E3. No corpo G, devido a dificuldade do acesso, foi possível a realização de apenas um perfil com comprimento de 44 metros. Os perfis realizados sobre o corpo J é mostrado na Figura 5.5D, na qual é possível observar que foram realizados três perfis sobre esse corpo ao longo de 48 metros.

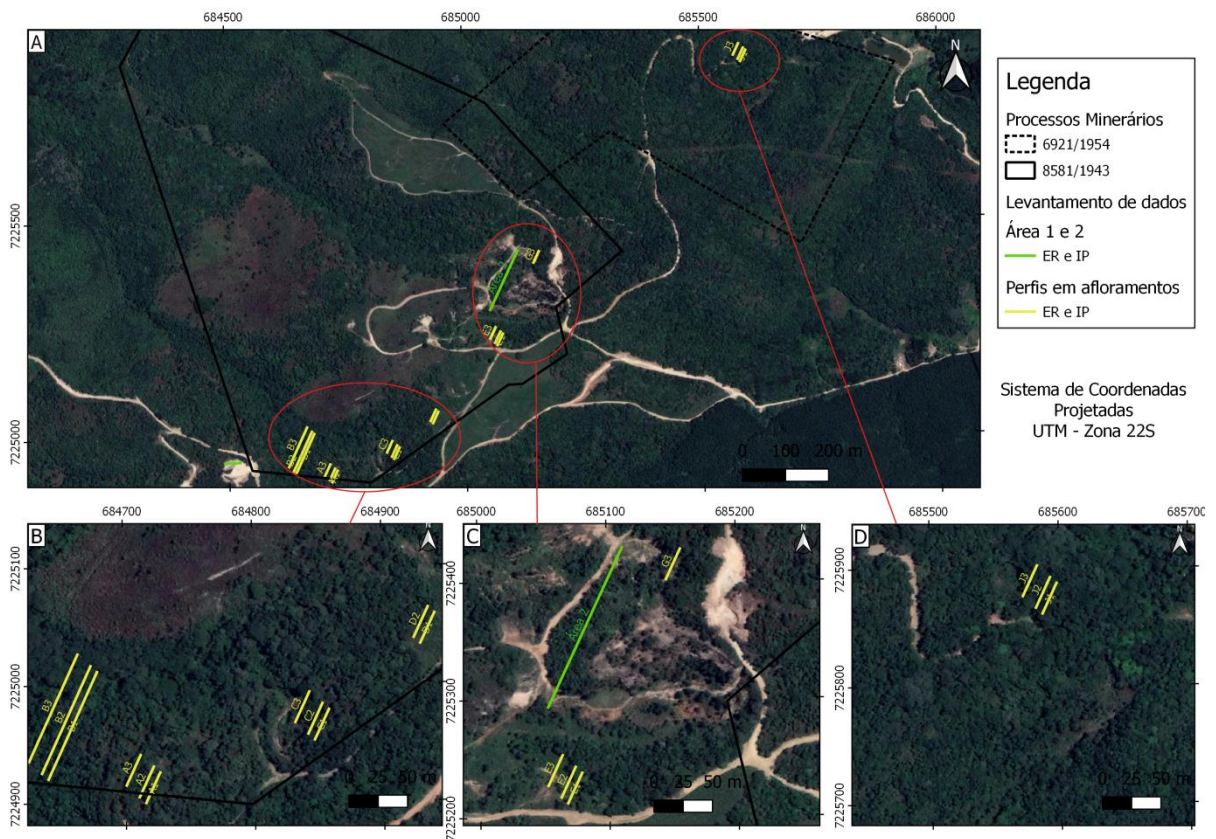


Figura 5.5: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfis sobre os corpos A, B, C e D, C: Destaque para perfis sobre os corpos E e G, D: Destaque para perfis sobre o corpo J.

5.4 OhmMapper

Os dados do equipamento OhmMapper foram coletados em outubro de 2019 e devido às dificuldades no acesso e na realização do trabalho de campo, só foi possível a obtenção de dois perfis. Buscou-se uma região na qual se pudesse fazer uma correlação direta com o afloramento da barita.

A localização da realização dos dois perfis é a área 1 do primeiro trabalho realizado na região. No perfil 1 (OM1) utilizou-se duas aberturas de dipolos, sendo uma de 5,0 metros, com uma corda que separa transmissor dos receptores também desse tamanho, e outra com dipolo de 2,5 metros, com a abertura da corda também com esse valor. No perfil 2 utilizou-se apenas o dipolo de 2,5 metros com a corda também desse tamanho, obtendo-se então níveis de investigação mais rasos. A Figura 5.6B mostra a localização em destaque dos dois perfis realizados.



Figura 5.6: Perfis realizados na área de estudo sobre imagem de satélite. Em A: área de estudo, B: Destaque para perfis com OhmMapper.

5.5 Dados laboratoriais

5.5.1 Simulação em caixa

Para a simulação em caixa foram usados os seguintes materiais: caixa de material plástico, pequenos parafusos para simulação de eletrodo metálico, cabos e conectores do tipo jacaré para montagem do circuito, equipamentos Syscal R2 para envio da corrente e Elrec Pro para leitura do potencial e posterior resistividade e a cargabilidade. Além desses materiais, foi utilizado a amostra de mão de barita (Figura 5.7) e uma mistura de areia com argila para simular a encaixante, esse material possui uma facilidade de acesso e por isso optou-se pelo seu uso.

A Figura 5.8 mostra o desenho esquemático da montagem para simulação (em A) e uma foto do perfil realizado (em B). A caixa utilizada possui espessuras de 53x30x15 cm. A areia e argila são depositadas, encharcadas e compactadas para simular a rocha encaixante. A amostra de barita é colocada entre as posições 21 e 35,5 cm do comprimento da caixa e a uma distância de 4 cm do topo para a base.

Para montagem do circuito é utilizado eletrodos metálicos, nesse caso pequenos parafusos, tanto para os eletrodos de corrente, tanto para os eletrodos de medida de potencial. Utiliza-se, assim como em campo, a técnica de caminhamento elétrico, realizado em um perfil de 50 cm de comprimento e o arranjo Dipolo-Dipolo com espaçamento entre os eletrodos de 4 cm (Figura 5.8).



Figura 5.7: Amostra coletada em campo e utilizada na medição da resistividade em caixa

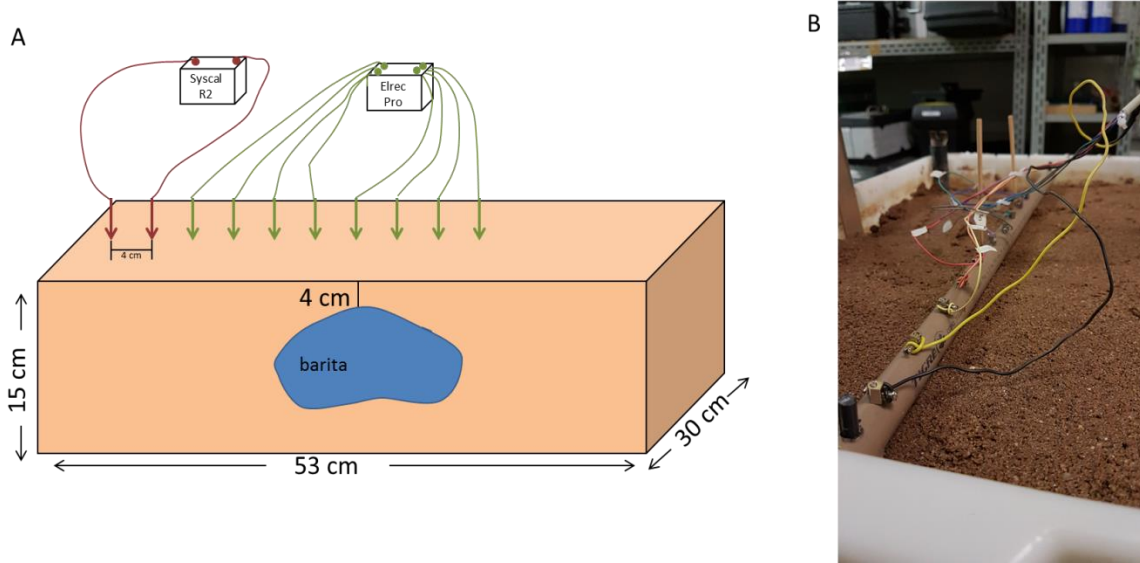


Figura 5.8: Montagem da caixa para medição da resistividade. A: Desenho esquemático da caixa e circuito, B: Foto do perfil realizado.

5.5.2 Medição direta

Para realizar a medida direta da resistividade de um mineral é necessário que esse esteja em um formato regular (Telford et al., 1990). Para esse estudo as amostras de barita foram moldadas no formato regular de um cilindro. Realizou-se medidas em cinco cilindros de diferentes tamanhos e diferentes densidades, para cada cilindro, buscou-se medir potencial e corrente três vezes em cada, para então calcular-se a média da resistividade (experimento 1). Para o experimento 2 foi utilizado apenas um cilindro de barita, e neste realizou-se quatro medidas de potencial e corrente, já que trata-se de um experimento piloto.

Para o primeiro experimento de medição direta da resistividade, desenvolveu-se, com materiais existentes no laboratório de geofísica aplicada, um pequeno arranjo para medição direta da resistividade (Figura 5.9). Os materiais utilizados para esse experimento são: placas de cobre, solução sulfato de cobre, fragmento de tubo PVC (isolante), papel filtro, cabos e conectores tipo jacaré, prensa, fonte e o equipamento Syscal R2. Na montagem os fragmentos de PVC são utilizados como isolantes para evitar a interferência do metal da prensa, sendo então, colocados em contato direto com essa. As placas de cobre funcionam como eletrodos de corrente e de potencial, e portanto, um par é colocado em cada extremidade do cilindro de barita. Entre as placas de cobre utiliza-se o papel filtro e o encharca com a solução de cloreto de cobre, para que se tenha um bom contato elétrico, já que, como exposto por Telford et al. (1990): “A principal dificuldade é fazer um bom contato elétrico, principalmente com os eletrodos de corrente.” Visando um melhor contato elétrico, e baseado no arranjo experimental proposto por Telford et al. (1990), realizou-se também medidas da

resistividade substituindo o papel filtro encharcado com a solução de cloreto de sódio por folha de papel alumínio, que foi colocada entre a amostra e o eletrodo (experimento 2).

Conectam-se os cabos nos respectivos eletrodos de corrente e potencial, no caso, utilizado eletrodo de potencial àquele mais próximo da amostra, e mede-se através do Syscal R2 a corrente e o potencial que passam pela amostra. Como trata-se de uma amostra em geometria regular, é possível calcular sua área transversal, descobrir a resistência e assim calcular a resistividade pontual dessa amostra, baseado nas equações 4.2, 4.3 e 4.4.

Além da aquisição dos dados de resistividade através do procedimento descrito, mediu-se também a densidade dos cilindros de barita. O cálculo desse parâmetro foi realizado utilizando-se uma balança de precisão para obtenção da massa (Figura 5.10), e calculando o volume de cada cilindro de barita com o auxílio de um paquímetro para aferimento das medidas.

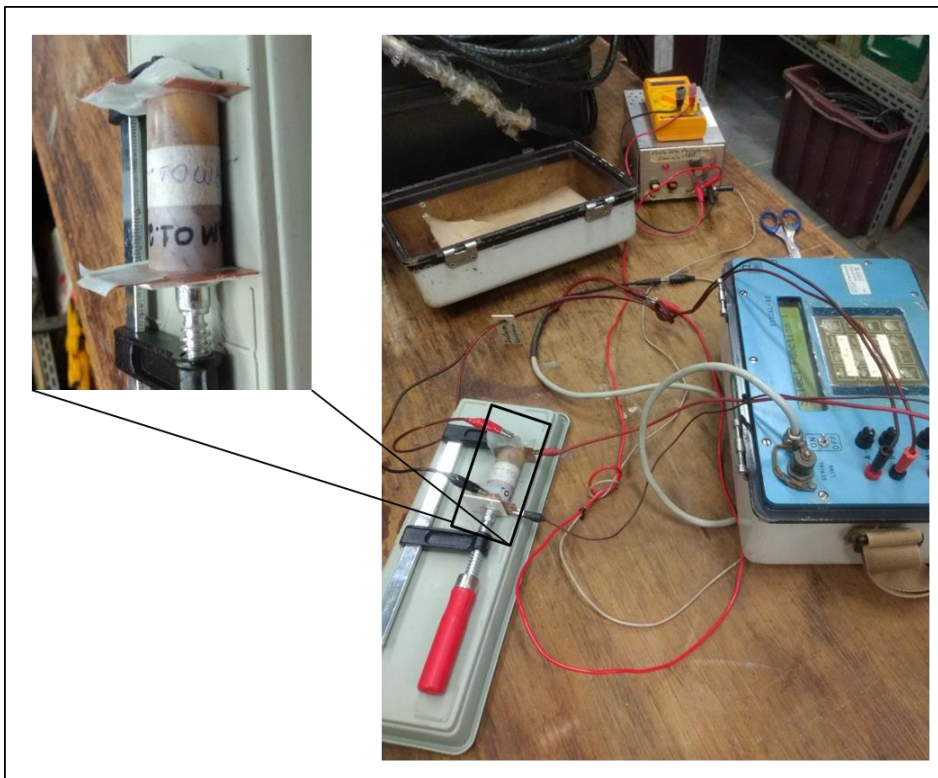


Figura 5.9: Montagem do circuito para medição da resistividade na amostra cilíndrica de barita.

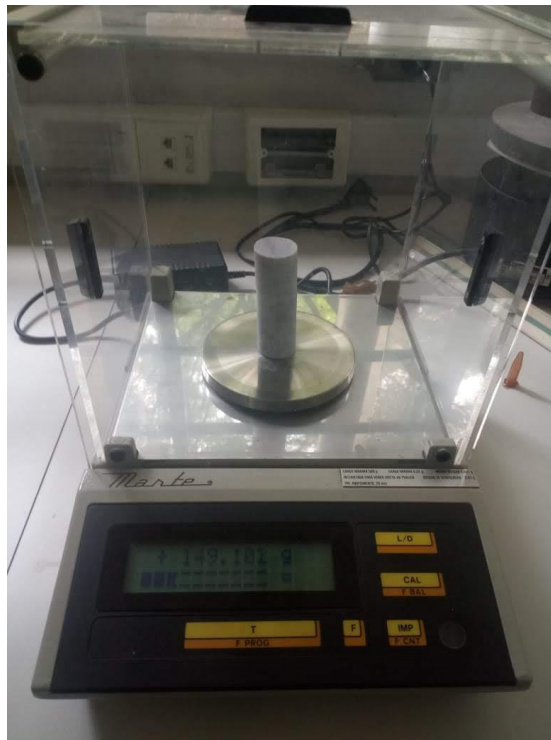


Figura 5.10: Medição da massa dos cilindros de barita em balança de precisão.

5.6 Tratamento dos dados

Para a interpretação quantitativa dos dados faz-se necessário a aplicação de uma rotina de inversão, já que os dados obtidos em campo representam valores aparentes e não verdadeiros. A inversão permite a obtenção de um modelo físico da subsuperfície que esteja de acordo com o dado medido, com uma melhor resolução espacial e maior precisão da profundidade investigada, tudo isso a partir de relações matemáticas. Nesse trabalho utilizou-se *software* RES2DINV para obtenção do modelo e parâmetros verdadeiros.

Após a obtenção do parâmetro verdadeiro, realizou-se a modelagem 3D através do *software* Oasis Montaj, no qual utilizou-se do processo de gridagem. O objetivo da análise 3D das informações de resistividade real objetivou auxiliar a interpretação 2D, com uma melhor visualização das anomalias.

5.6.1 RES2DINV

O RES2DINV é um programa computacional que determina um modelo de resistividade 2D para a subsuperfície a partir de dados obtidos com o imageamento elétrico, (Geotomo, 2004). A rotina de inversão foi feita através do método contrastes de suavização por mínimos quadrados.

O método da suavização por mínimos quadrados realiza a inversão baseado em blocos retangulares nos quais estão divididos o conjunto de dados. Logo, o número de informações é dependente da resistividade elétrica aparente, da posição espacial e da profundidade teórica das medidas feitas em campo, (Loke & Barker, 1996).

Para determinar a resistividade dos blocos retangulares o programa utiliza o método de otimização de Gauss-Newton. Tal método minimiza as diferenças entre os valores calculados e medidos da resistividade aparente, criando um modelo inicial para a subsuperfície o qual é melhorado de maneira iterativa, (Loke & Barker, 1996).

A diferença entre os valores medidos e calculados é conhecido como erro médio quadrático (RMS), e teoricamente quanto menor o RMS de um perfil, maior a semelhança entre os dados medidos e os calculados. Entretanto, modelos com baixos valores do erro RMS podem apresentar variações não condizentes com a realidade geológica da região, e nesses casos o melhor procedimento é escolher o modelo para o qual haja uma convergência do RMS, (Loke, 2004).

5.6.2 Oasis Montaj

A Gridagem refere-se ao processo de interpolação dos dados dentro de um espaçamento das células, (Oasis Montaj, 2014). No processo, utilizou-se dos dados de resistividade verdadeira, obtidos a partir da inversão, e utilizou-se a opção de interpolação por krigagem implícita, isso é, automática, dentro do Oasis.

A krigagem é um método estatístico que determina um valor a cada grid baseado na localização. Determina-se a variação do dado, que irá mostrar sua correlação em função da distância e agrupamento, portanto quanto maior a distância de certa amostra, menor a correlação esperada entre os pontos, (Oasis Montaj, 2014). Basicamente, esse método utiliza-se de pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais e pesos menores nas posições mais distantes e assim cria-se os novos pontos interpolados.

6. CAPÍTULO 06- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados todos os resultados referentes aos dados coletados em campo e em laboratório. Eles serão apresentados em forma de seções geolétricas, modelagem 3D para os valores de resistividade e tabelas. As seções foram processadas no *software* Res2Dinv e as modelagens 3D foram realizadas com o *software* Oasis Montaj.

6.1 Dados de campo

Os dados de campo da eletrorresistividade, IP e OhmMapper serão apresentados em formas de seções geolétricas. Além disso, para os perfis de resistividade realizados sobre os corpos aflorantes buscou-se uma modelagem 3D com *isosurface* de altas resistividades, que podem ser indicativos da presença de barita.

6.1.1 Eletrorresistividade e IP

Os dados de eletrorresistividade e IP, como já mencionado no capítulo 5, foram adquiridos em duas etapas, uma preliminar, na qual houve aquisição de dois perfis e uma outra na qual buscou-se a aquisição de perfis ao longo de corpos aflorantes. Os dois perfis realizados preliminarmente na localidade denominada área 1 (sobre região de barita) são mostrados

na

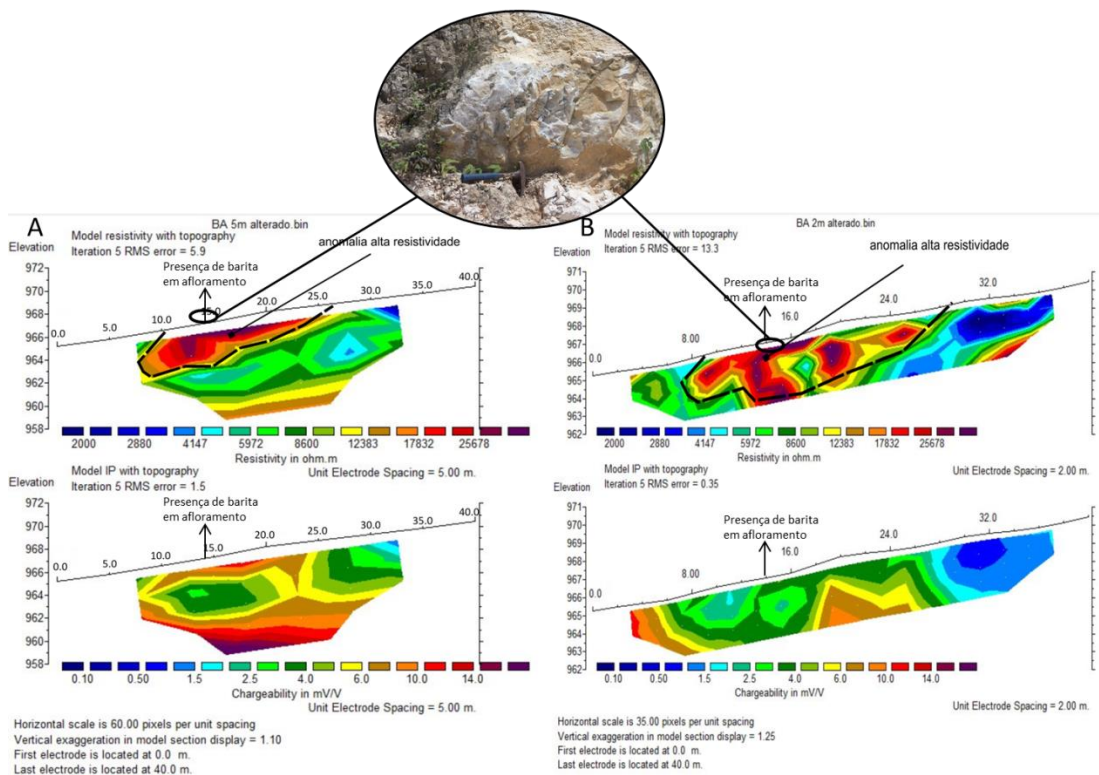


Figura 6.1, já o perfil da área 2 (suspeita de ocorrência da mineralização) é mostrado na Figura 6.2. Para ambos os perfis, tanto para resistividade quanto para cargabilidade, utilizou-se de uma mesma escala de cor e valores, para facilitar a comparação entre eles.

Na

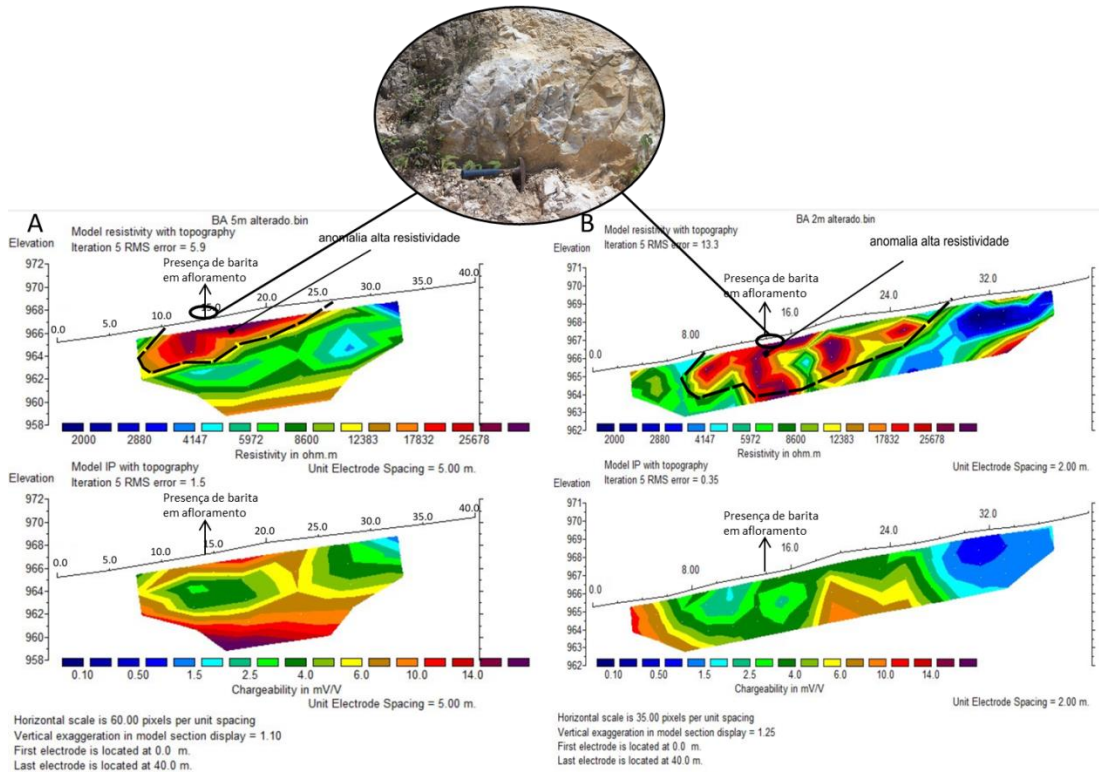


Figura 6.1A pode-se observar o perfil realizado com um espaçamento de 5 metros entre os eletrodos, sendo a seção superior de resistividade e a inferior de cargabilidade. Observa-se uma zona de altíssima resistividade e baixa cargabilidade nas posições entre 13 e 20 metros (contorno tracejado preto), o que corrobora as informações de campo, onde se observou o corpo de barita na posição de 14 metros; nesse perfil, vale ressaltar a presença de uma zona com altos valores de cargabilidade na região basal. Na mesma linha, porém com espaçamento

entre os eletrodos de 2 metros (

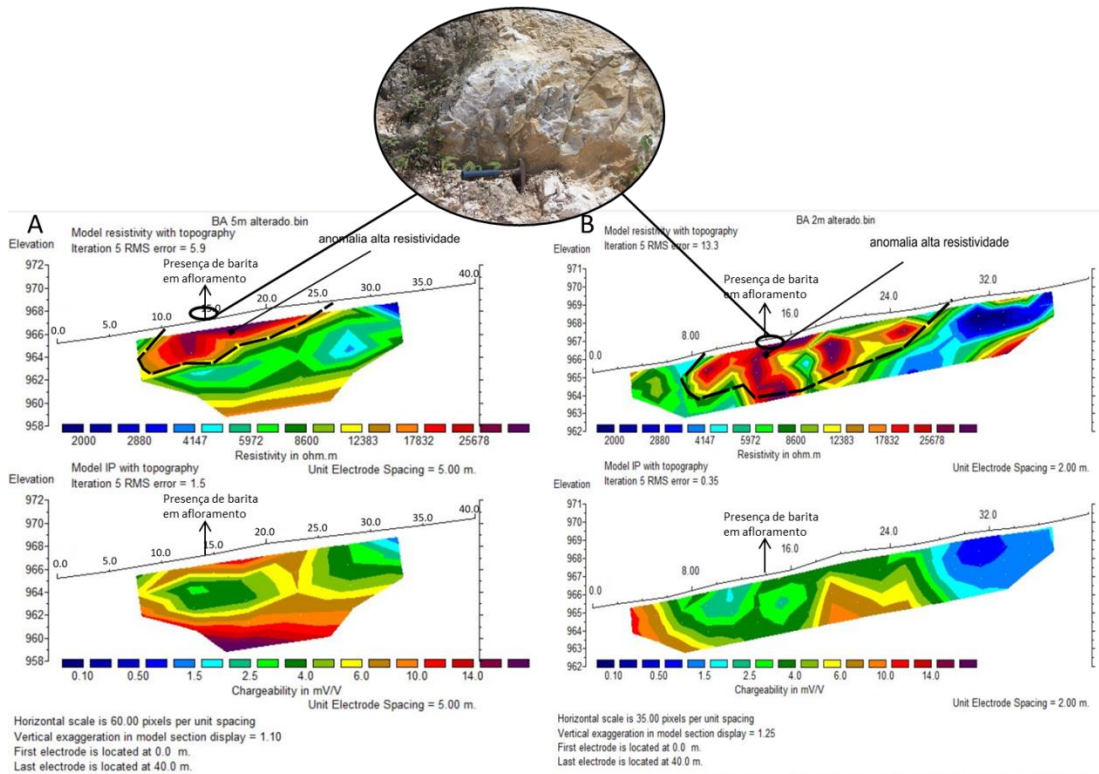


Figura 6.1B), observa-se com melhor definição o corpo mais resistivo da posição de 14 metros e com possíveis ramificações verticais e laterais, nesse perfil a linha tracejada preta também representa toda a zona de maior resistividade, e da mesma forma que o perfil do item A os corpos resistivos apresentam valores intermediários a baixos de cargabilidade. No local com suspeita de ocorrência de barita, área 2, o perfil obtido (Figura 6.2) mostra duas zonas mais resistivas: uma na zona central do perfil, entre 80 e 90 metros, e outra muito resistiva no final do perfil. Em relação à cargabilidade, a área central se mostra com baixos valores, enquanto a região NNE apresenta valores intermediários a altos.

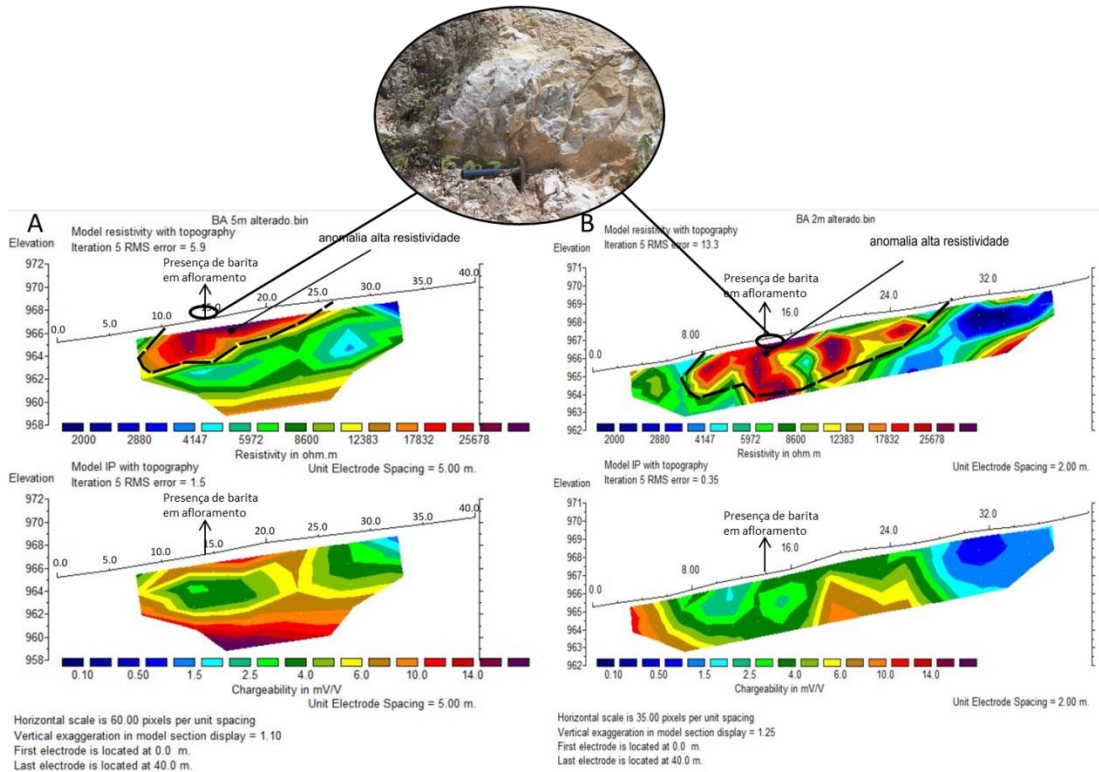


Figura 6.1: Seções geolétricas da área 1, perfis superiores de resistividade e inferiores de cargabilidade. A: Espaçamento dos eletrodos de 5 metros, B: espaçamento dos eletrodos de 2 metros.

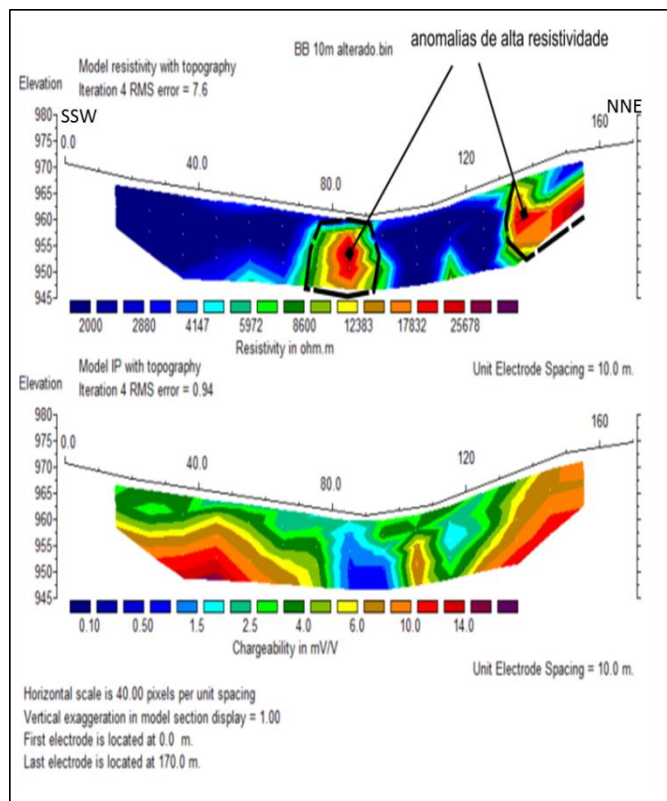


Figura 6.2: Seção geolétrica da área 2, perfil superior de resistividade e inferior de cargabilidade.

Os dados obtidos sobre os corpos aflorantes denominados A, B, C, D, E, G e J são mostrados em seções geoeletricas e também em modelagem 3D. Para todos os perfis realizados nos corpos utilizou-se, tanto para a cargabilidade quanto para resistividade, a mesma escala de cor e valores e o espaçamento entre os eletrodos de 4 metros.

A Figura 6.3 mostra os resultados obtidos através dos três perfis realizados sobre o corpo A, todos com 48 metros de extensão. Os resultados da resistividade podem ser analisados na Figura 6.3A, nessas seções percebe-se entre as posições de 20 a 40 metros nas profundidades de 5 a 13 metros uma zona fortemente resistiva no perfil A1, essa mesma zona possui uma menor intensidade no perfil A2, mas ainda apresenta maior resistividade que o meio circundante, e ela não é observada no perfil A3; nesse último perfil observa-se uma zona resistiva entre as posições de 24 a 32 metros e na profundidade entre 1 e 5 metros. Em relação à cargabilidade (Figura 6.3B), as zonas resistivas possuem valores intermediários desse parâmetro, e uma zona de alta cargabilidade é observada na parte SSW do perfil com uma tendência mais basal, é interessante observar que no perfil A3, a zona de alta cargabilidade se inicia após o término da zona resistiva do mesmo perfil, isso é, após os 5 metros de profundidade. A Figura 6.3C mostra a integração dos três perfis, resultando em um modelo 3D, no qual é possível visualizar a correlação das zonas resistivas. Uma superfície de valores de resistividade maiores do que 9000 ohm.m é mostrada na Figura 6.3D, com ela, percebe-se que não há uma continuidade que interligue todas as zonas resistivas.

Os resultados do corpo B são mostrados na Figura 6.4, em tal corpo também foram realizados três perfis B1, B2 e B3 de extensões 80, 76 e 76 metros respectivamente. A Figura 6.4A mostra as seções de resistividade, nas quais observam-se zonas resistivas mais próximas à superfície (até 5 metros de profundidade) em todos os três perfis, essas zonas são separadas por uma encaixante mais condutora, no perfil B3 observa-se uma zona mais resistiva que as demais entre as posições 63 e 70 metros que se estende também até à profundidade dos 5 metros. Em relação à cargabilidade, não é possível fazer uma correlação direta das zonas resistivas com esse parâmetro, o que observa-se é a predominância de uma zona de alta cargabilidade nos perfis B1 e B2 entre as posições 6 e 24 metros, que se estende de 1 a 7 metros de profundidade, entre os perfis B2 e B3 também observa-se uma zona concordante de alta cargabilidade entre as posições 28 e 56 metros atingindo profundidades de 5 a 10 metros, aproximadamente (Figura 6.4B). A Figura 6.4C mostra o modelamento 3D da integração dos três perfis e a extração da superfície com resistividades maiores do que 9000 ohm.m (Figura 6.4D), que assim como no corpo A mostra uma fragmentação das zonas resistivas.

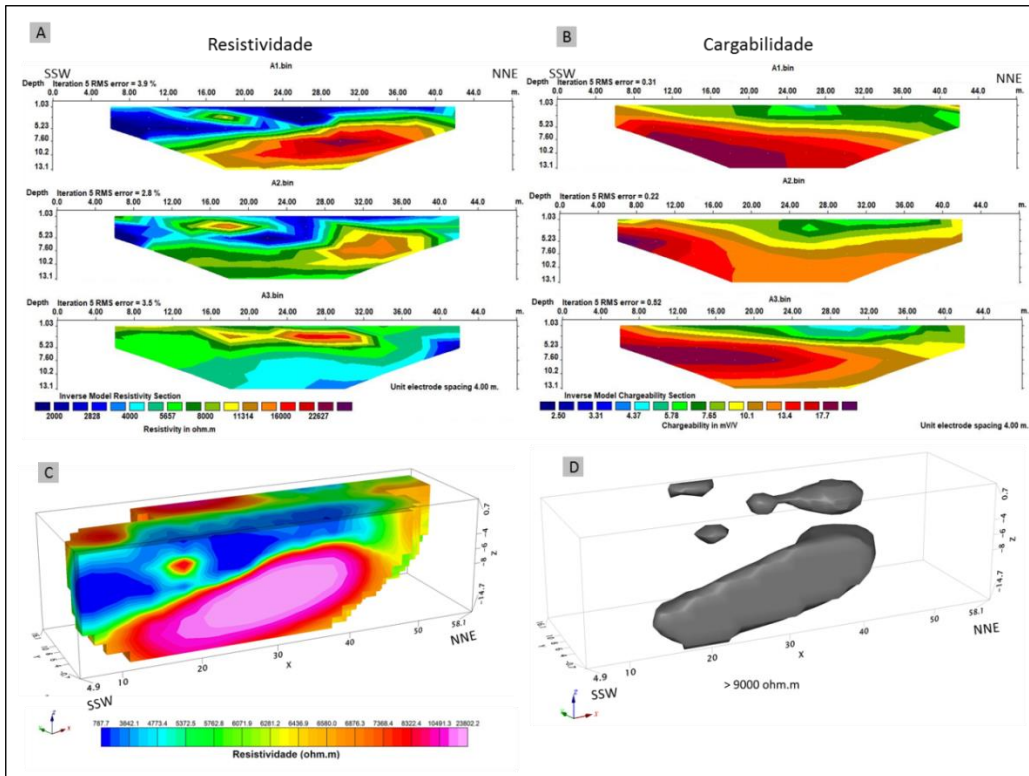


Figura 6.3: Seções Geolétricas e modelagem 3D do corpo A. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.

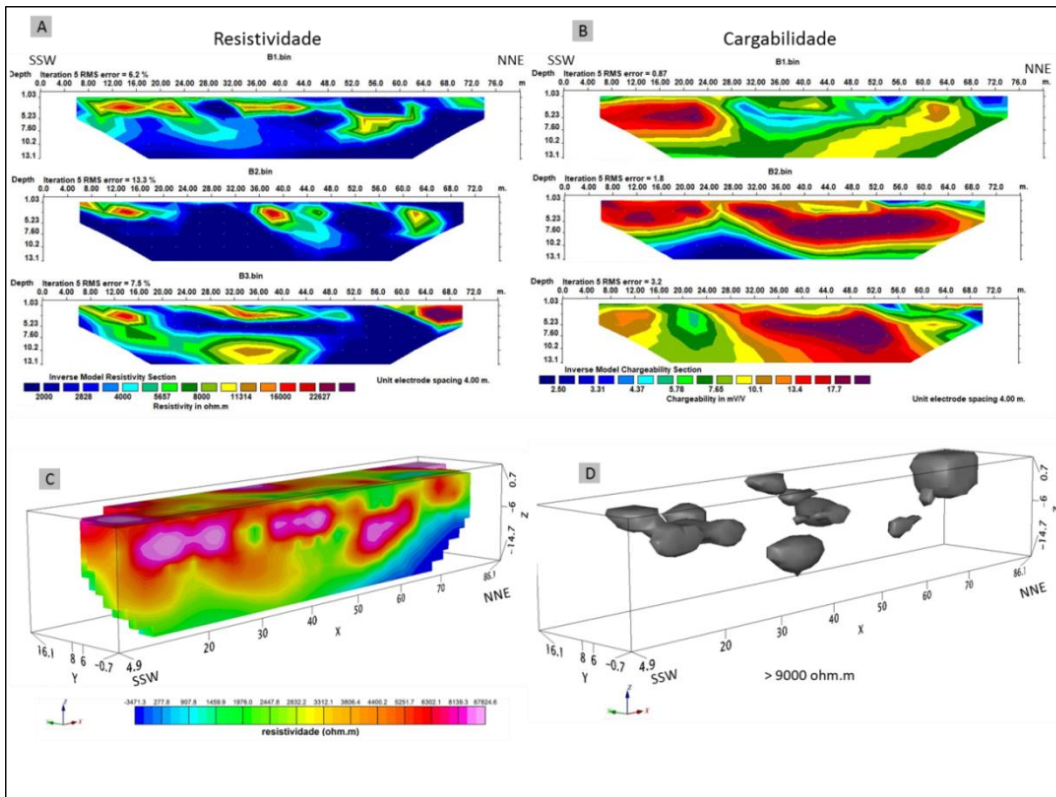


Figura 6.4: Seções Geolétricas e modelagem 3D do corpo B. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.

As seções geoeletricas e modelagem 3D do corpo C são mostradas na Figura 6.5, para tal corpo, também foram realizados três perfis C1, C2 e C3, cujas extensões são: 48, 48 e 40 metros, respectivamente. A Figura 6.5A mostra as seções de resistividade, assim como na Figura 6.5B estão as seções do levantamento de IP (cargabilidade). Nessas seções, assim como nas seções do corpo B, não é possível correlacionar diretamente zonas resistivas com o parâmetro da cargabilidade. O que observa-se nas seções de resistividade, é que essas se mostram com menor intensidade, quando comparado com as seções dos corpos A e B já descritos, ao passo que a intensidade do parâmetro da cargabilidade é mais intenso do que o observado nos demais corpos. No modelo 3D da Figura 6.5C é mais evidente uma zona resistiva na região SSW do corpo, tal zona, atinge profundidades de até 14 metros. Na Figura 6.5D a superfície representada é equivalente àquelas resistividades maiores do que 8000 ohm.m, é evidenciado a zona demarcada pela modelo 3D na região SSW e outras pequenas zonas, nas seguintes posições: entre 10 e 15 metros, 20 metros e entre 35 e 40 metros.

A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos com os dois perfis realizados sobre o corpo D, ambos perfis possuem extensão de 36 metros. Nas seções de resistividades, mostradas na Figura 6.6A, observa-se no perfil D1 zonas resistivas entre as posições 6 e 12 metros e 28 e 30 metros, no perfil D2 há uma zona resistiva rasa entre as posições de 20 e 24 metros, como nos demais corpos não há uma correlação direta entre zonas resistiva e cargabilidade. Os perfis de cargabilidade são mostrados na Figura 6.6B, no perfil D1 observa-se uma zona de alta cargabilidade entre as posições 8 e 22 metros, iniciando na profundidade de 2 metros e atingindo a base da seção, observa-se também um contato bem marcado de uma zona de alta cargabilidade para uma zona de baixa cargabilidade, aproximadamente, na profundidade de 5 metros e entre as posições 24 e 30 metros; no perfil D2 contrastando com a zona de baixa cargabilidade no perfil D1, há uma zona de alta cargabilidade entre as posições de 24 e 30 metros. No modelo 3D da Figura 6.6C também é possível observar as zonas resistivas nas extremidades do corpo, e a superfície de resistividades maiores do que 10000 ohm.m, mostrada na Figura 6.6D, enfatiza que as zonas resistivas estão fragmentadas.

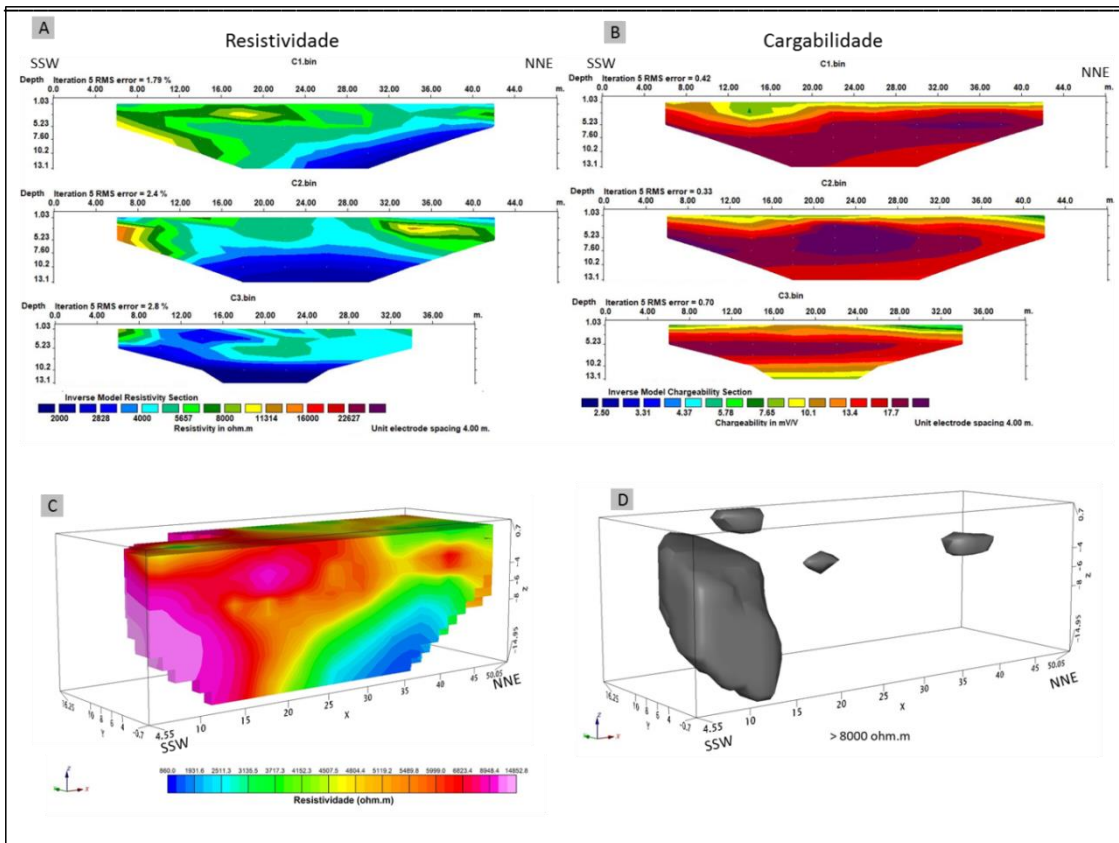


Figura 6.5: Seções Geoelétricas e modelagem 3D do corpo C. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m.

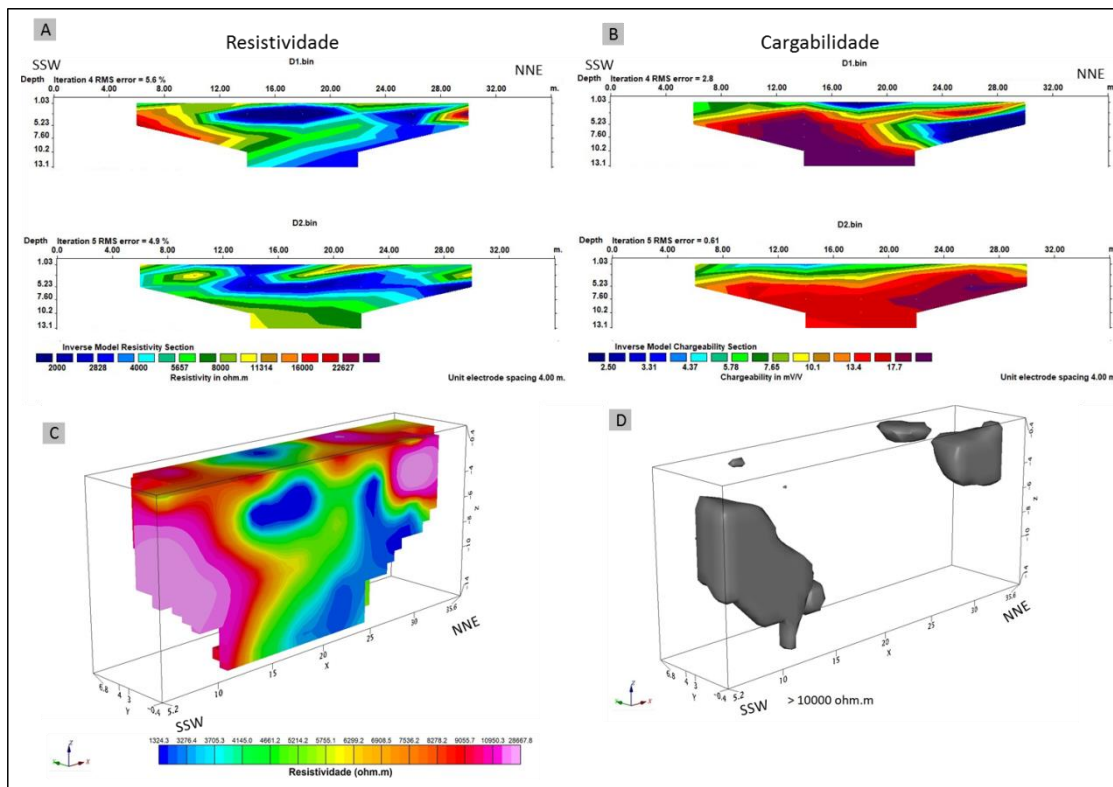


Figura 6.6: Seções Geoelétricas e modelagem 3D do corpo D. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 10000 ohm.m

Sobre o corpo E também foram realizados três perfis geoeletricos, cujas extensões são: 44, 40 e 52 metros (E1, E2 e E3, respectivamente); as seções geoeletricas e os modelos 3D podem ser analisados na Figura 6.7. Nas seções de resistividades (Figura 6.7A), assim como no corpo B a encaixante trata-se de um corpo mais condutivo, com baixos valores de resistividade; em relação às zonas resistivas são observadas, no perfil E1, entre as posições de 32 e 38 metros e próximas à superfície, no perfil E2, entre as posições 20 e 24 metros próximas à superfície, e entre as posições 6 e 12 metros nas profundidades de 5 à 7,6 metros, aproximadamente, no perfil E3, as zonas mais resistivas que se destacam são de menor intensidade, quando comparadas com as duas seções anteriores. Em relação à cargabilidade (Figura 6.7B), as zonas resistivas dos perfis E1 e E2 apresentam cargabilidades intermediárias e altas, no perfil E1 de levantamento IP, há uma zona de alta cargabilidade entre as posições de 12 e 20 metros, e esta se inicia na profundidade que termina a zona resistiva desse mesmo perfil, no perfil E2 a zona de maior cargabilidade é coincidente com a zona resistiva das posições entre 6 e 12 metros, do mesmo perfil, no perfil E3 às cargabilidades também possuem menor intensidade. Na Figura 6.7C observa-se a integração dos perfis, resultando em um corpo 3D, no qual é possível observar às zonas resistivas do perfil E1 e àquela mais superficial do perfil E2 (entre 20 e 24 metros). A Figura 6.7D mostra a superfície equivalente às resistividades maiores do que 8000 ohm.m, onde é possível observar três maiores zonas resistivas.

Sobre o corpo G, devido às condições de campo, só foi possível a realização de um único perfil geoeletrico, com extensão de 44 metros e espaçamento entre os eletrodos de 4 metros, e, portanto não foi possível realizar a modelagem 3D. As seções geoeletricas de resistividade e cargabilidade são mostradas na Figura 6.8A e Figura 6.8B, respectivamente. Nesse perfil é interessante observar a altíssima resistividade em grande extensão, atingindo as posições de 10 a 38 metros até a parte basal da seção. Essa mesma região, em relação ao parâmetro IP, possui altos e intermediários valores de cargabilidades.

A Figura 6.9 mostra as seções geoeletricas e o modelo 3D do corpo J, em tal foram realizados três perfis (J1, J2 e J3) de extensão 48 metros e com um espaçamento de 4 metros entre os eletrodos. Assim como nos perfis B e E, quando observam-se os perfis de resistividade (Figura 6.9A) o meio circundante das zonas resistivas é mais condutor, apresentando baixos valores de resistividade. Os perfis J1 e J2 possuem zonas concordantes de alta resistividade, que estão localizadas entre as posições 34 e 42 metros, já o perfil J3 encontra-se fora do afloramento, como visto na Figura 5.5D e nele não é possível observar

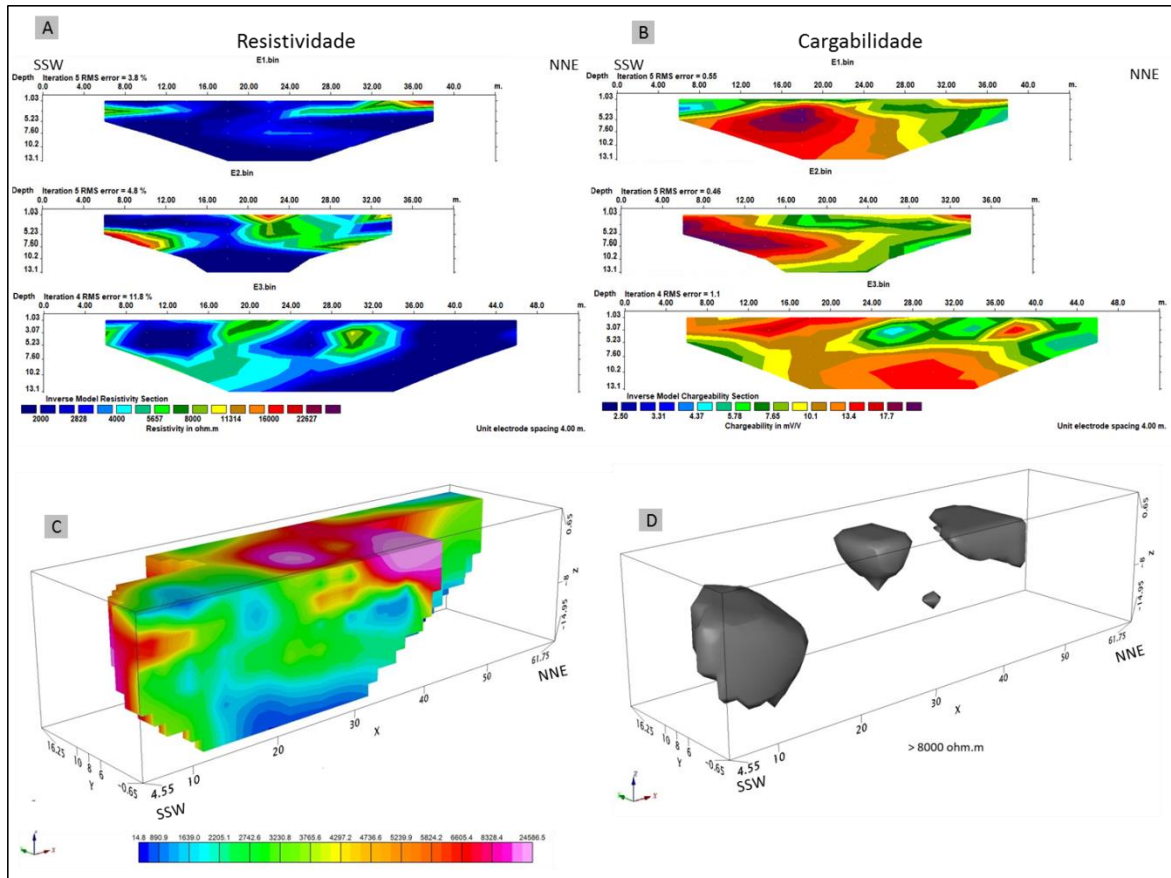


Figura 6.7: Seções Geoelétricas e modelagem 3D do corpo E. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 8000 ohm.m

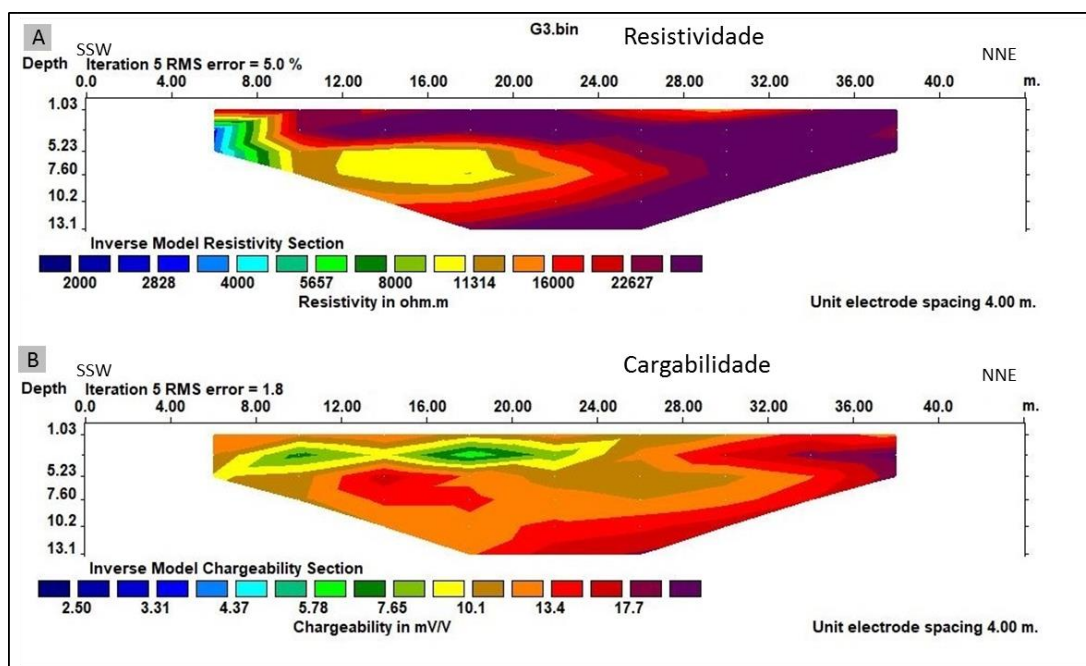


Figura 6.8: Seções Geoelétricas do corpo G. A: Seção de resistividade, B: Seção de cargabilidade.

nenhuma zona resistiva. Em relação à cargabilidade (Figura 6.9B) não há uma correlação direta entre esse parâmetro e os altos resistivos, sendo a única percepção a ausência de baixas cargabilidades nas zonas mais resistivas; em ambos perfis J1 e J2, entre as posições de 24 e 28 metros, nas profundidades de 2 a 5 metros, há uma zona de alta cargabilidade, já no perfil J3 a zona de mais alta cargabilidade é visualizada entre as posições 32 e 42 metros, aproximadamente entre 3 e 6 metros de profundidade. No modelo 3D da Figura 6.9C é bem nítida a zona resistiva concordante entre os perfis J1 e J2, e tal zona representa um único corpo de resistividade maior do que 9000 ohm.m, como observa-se na Figura 6.9D.

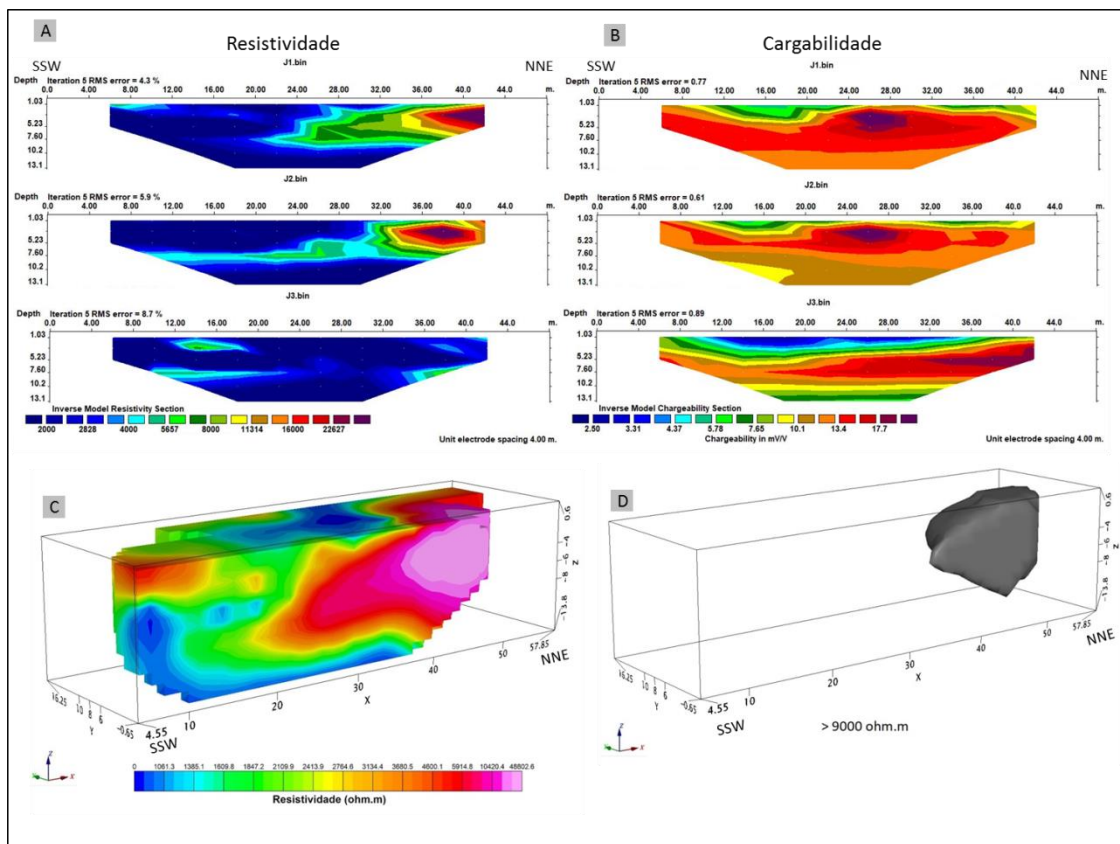


Figura 6.9: Seções Geolétricas e modelagem 3D do corpo J. A: Seções de resistividade, B: Seções de cargabilidade, C: Modelo 3D, D: Superfície de resistividades maiores do que 9000 ohm.m

6.1.2 OhmMapper

As seções de resistividade, obtidas a partir do acoplamento capacitivo com o uso do equipamento OhmMapper, foram realizadas ao longo de dois perfis, nos quais foi possível verificar afloramento da barita. Para esses perfis utilizou-se a mesma escala de cor e valores dos perfis de eletrorresistividade.

A Figura 6.10 mostra a seção de resistividade obtida sobre o perfil denominado OM1. Nessa seção, a primeira zona resistiva é observada entre as posições de 30 e 37 metros

atingindo as profundidades entre 1,5 e 4,0 metros, aproximadamente. A segunda zona resistiva observa-se nas posições 45 a 55 metros, desde à superfície até a base da seção (4,25 metros), essa zona não se mostra contínua, senão que fragmentada. Na parte final do perfil (NW) entre 62 e 67 metros há outra zona mais resistiva que atinge as profundidades de 1,5 a 4,0 metros, apresentam-se também em duas zonas não contínuas. A observação em campo do afloramento de barita na posição de 50 metros corrobora com o obtido na segunda zona resistiva.

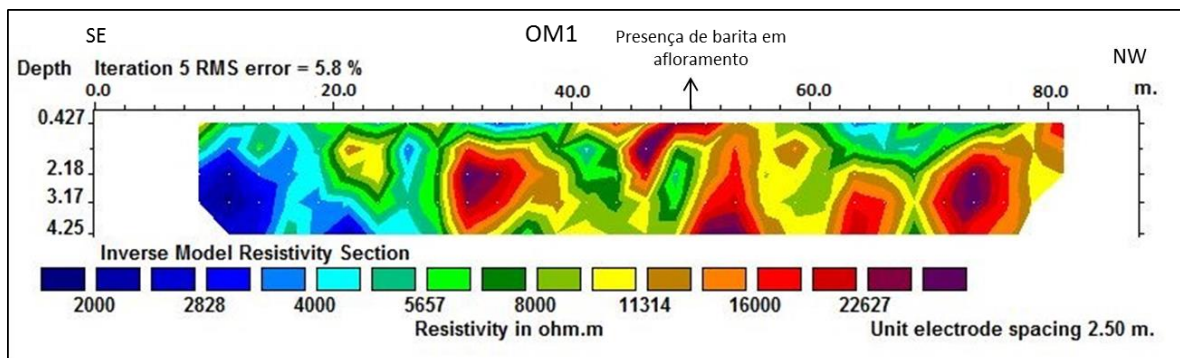


Figura 6.10: Seção de resistividade capacitiva do perfil OM1 com demarcação do afloramento de barita.

A seção elétrica do perfil denominado OM2 é mostrada na Figura 6.11. Observa-se uma grande zona resistiva, contínua entre as posições 22 a 65 metros, a partir da profundidade de 1,2 metros até a base da seção (2,14). Em campo, observou-se afloramentos pontuais de barita entre as posições de 30 a 55 metros no perfil elétrico, a Figura 6.12 esquematiza a localização do perfil sobre os afloramentos.

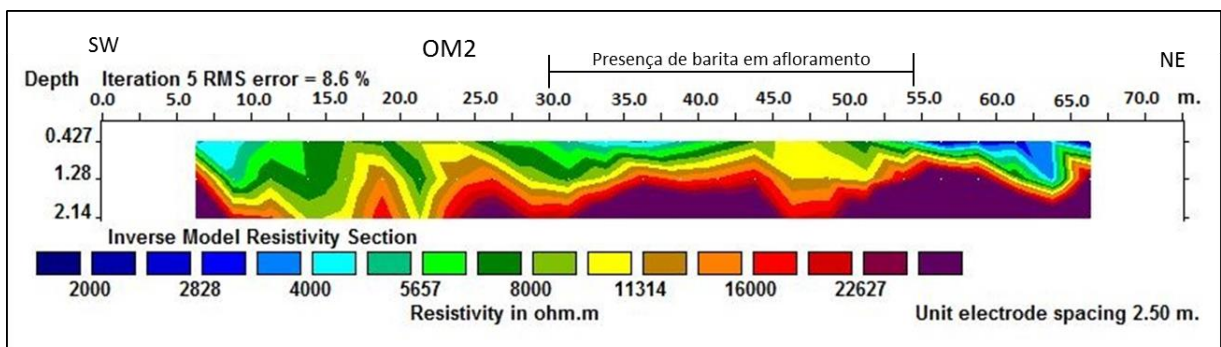


Figura 6.11: Seção de resistividade capacitiva do perfil OM2 com demarcação do afloramento de barita.

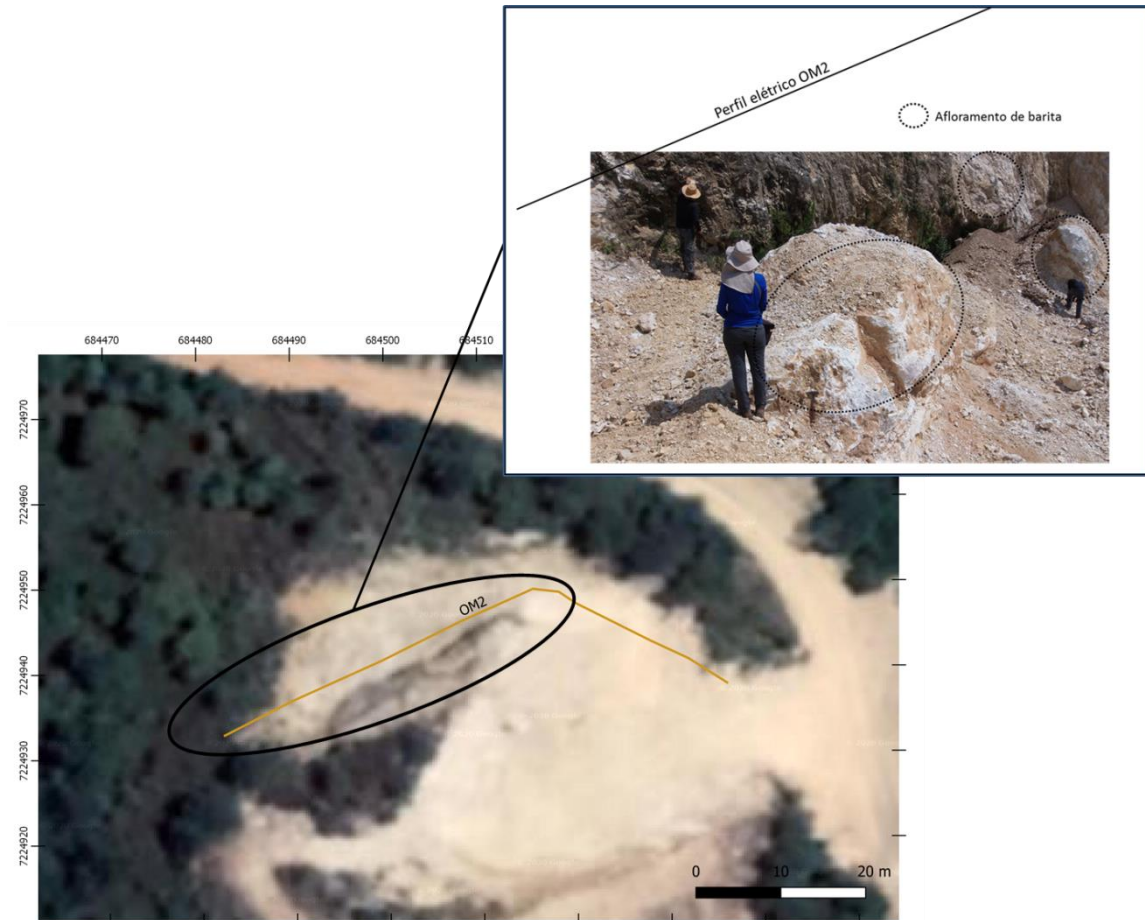


Figura 6.12: Imagem de satélite com localização do perfil OM2 e esquema da localização do perfil elétrico realizado sobre os afloramentos de barita

6.2 Dados Laboratoriais

Os dados laboratoriais serão apresentados também em seção geométrica, que se referem ao perfil realizado sobre a caixa de simulação e tabelas de medidas de densidade e resistividade.

6.2.1 Simulação em caixa

O procedimento da montagem e a realização da simulação em caixa estão descrito no item 5.5.1 do capítulo 5, e sabe-se então que entre as posições de 21 e 35,5 centímetros está localizada a amostra de barita, a uma distancia de 4 centímetros a partir do topo. O resultado do perfil realizado é apresentado em duas seções, uma de resistividade (Figura 6.13) e a outra de cargabilidade (Figura 6.14).

Na seção de resistividade (Figura 6.13), a região que se encontra a amostra de barita é bem demarcada lateralmente, sendo mostrado por maiores valores de resistividade do que o do meio circundante, porém, em profundidade os valores de alta resistividade são observados a partir 1cm; na profundidade de 4cm (onde inicia-se a amostra de barita) e na região central

entre 24 e 28cm, uma anomalia resistiva, fragmentada daquela superior, se estende até à base da seção.

Na seção de cargabilidade (Figura 6.14), a posição lateral da amostra da barita também é bem delimitada com maiores valores de cargabilidade quando comparado à encaixante, com um ressalve de que os maiores valores de cargabilidade se iniciam na posição de 16cm e não em 21cm. Em relação à profundidade, também há uma estimativa de que a amostra se encontra em uma posição mais rasa do que o real, já que os valores de maior cargabilidade iniciam-se em 1cm.

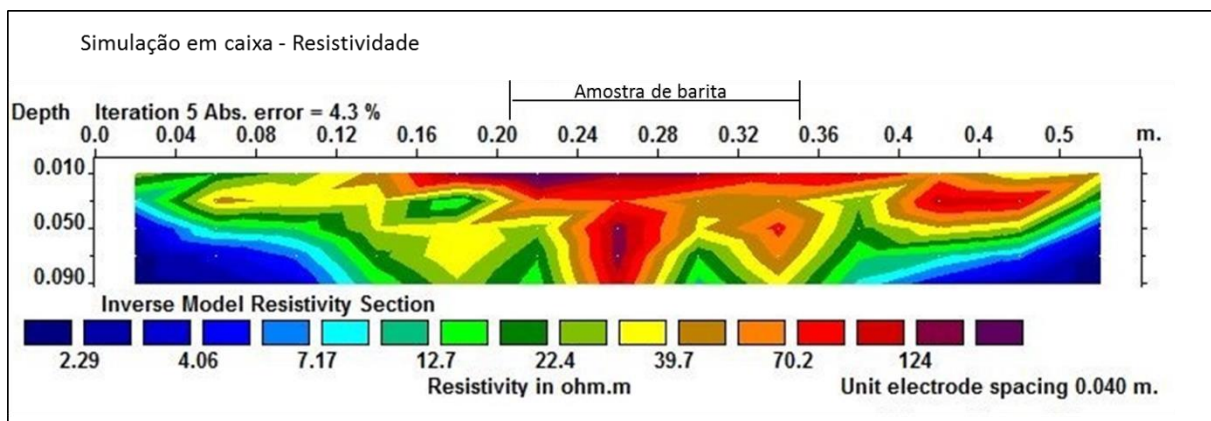


Figura 6.13: Seção elétrica de resistividade da simulação realizada em caixa e com identificação da localização da amostra de barita.

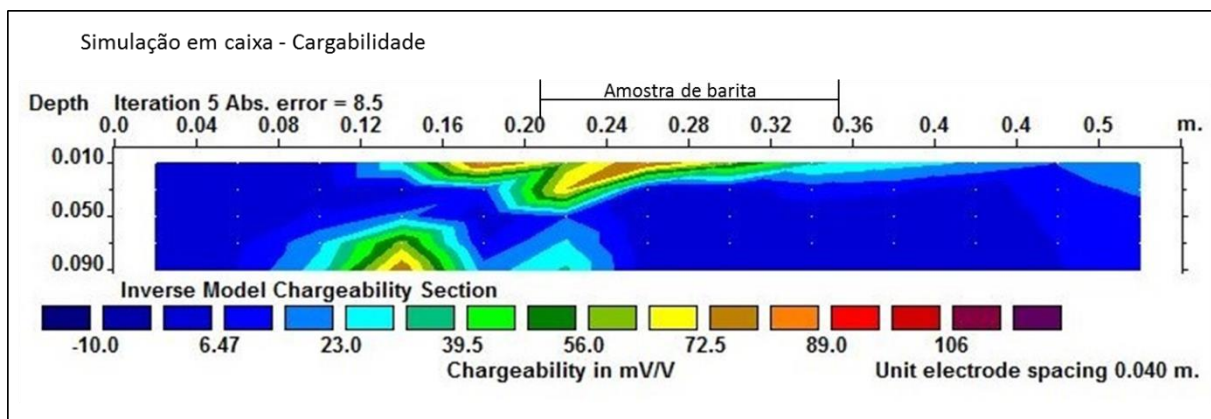


Figura 6.14: Seção elétrica de cargabilidade da simulação realizada em caixa e com identificação da localização da amostra de barita.

6.2.1 Medição direta

A Tabela 6.1 apresenta os resultados de densidade e resistividade obtidos nas amostras de barita no primeiro arranjo de medição, já a Tabela 6.2 mostra os resultados obtidos no segundo arranjo de medição. Os procedimentos dessa medição estão descritos no item 5.5.2 do capítulo 5. Como se pode observar os valores de densidade estão todos entre 4,0 e 4,29

g/cm³, já a resistividade varia entre 290 e 480 ohm.m no primeiro experimento em torno dos 5.000 ohm.m no segundo.

Tabela 6.1: Resultados das medições de densidade e resistividade nos cilindros de barita (experimento 1)

Teste de resistividade e densidade									
Amostra	Massa (g)	Potencial (mV)	Corrente (mA)	Resistência (Ohm)	A (cm²)	L (cm)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)	Resistividade (Ohm.m)
BA 01	120,35	4.000,00	0,10	40.000,00	5,07	5,63	28,53	4,22	360,00
BA 01	120,35	2.584,00	0,09	28.711,11	5,07	5,63	28,53	4,22	258,40
BA 01	120,35	4.311,35	0,15	28.742,36	5,07	5,63	28,53	4,22	258,68
BA 01	MÉDIA							4,22	292,36
BA 02	135,39	3.691,34	0,07	52.733,39	5,07	6,32	32,02	4,23	422,79
BA 02	135,39	4.172,10	0,07	59.601,43	5,07	6,32	32,02	4,23	477,85
BA 02	135,39	4.588,52	0,07	65.550,33	5,07	6,32	32,02	4,23	525,55
BA 02	MÉDIA							4,23	475,40
BA 03	149,11	4.307,35	0,05	86.147,04	5,07	7,20	36,48	4,09	606,27
BA 03	149,11	4.273,91	0,05	85.478,28	5,07	7,20	36,48	4,09	601,56
BA 03	149,11	4.337,48	0,04	108.436,93	5,07	7,20	36,48	4,09	763,14
BA 03	MÉDIA							4,09	656,99
BA 04	75,01	1.582,65	0,07	22.609,21	5,07	3,66	18,55	4,04	313,01
BA 04	75,01	4.750,74	0,21	22.622,58	5,07	3,66	18,55	4,04	313,20
BA 04	75,01	4.193,12	0,19	22.069,05	5,07	3,66	18,55	4,04	305,53
BA 04	MÉDIA							4,04	310,58
BA 05	126,37	3.227,26	0,07	46.103,66	5,07	6,23	31,57	4,00	374,98
BA 05	126,37	3.588,00	0,08	44.850,00	5,07	6,23	31,57	4,00	364,78
BA 05	126,37	3.667,79	0,08	45.847,31	5,07	6,23	31,57	4,00	372,89
BA 05	MÉDIA							4,00	370,88

Tabela 6.2: Resultados das medições de densidade e resistividade nos cilindros de barita (experimento 2).

Teste de resistividade e densidade									
Amostra	Massa (g)	Potencial (mV)	Corrente (mA)	Resistência (Ohm)	A (cm²)	L (cm)	Volume (cm³)	Densidade (g/cm³)	Resistividade (Ohm.m)
BA 06	52,267	882,93	0,003	294.310,00	5,07	2,56	12,97	4,03	5.828,72
BA 06	52,267	960,30	0,0035	274.372,29	5,07	2,56	12,97	4,03	5.433,86
BA 06	52,267	1.018,91	0,004	254.727,00	5,07	2,56	12,97	4,03	5.044,79
BA 06	52,267	1.011,33	0,004	252.832,00	5,07	2,56	12,97	4,03	5.007,26
BA 06	MÉDIA							4,03	5.328,66

7. CAPÍTULO 07- DISCUSSÕES

Com a análise conjunta das

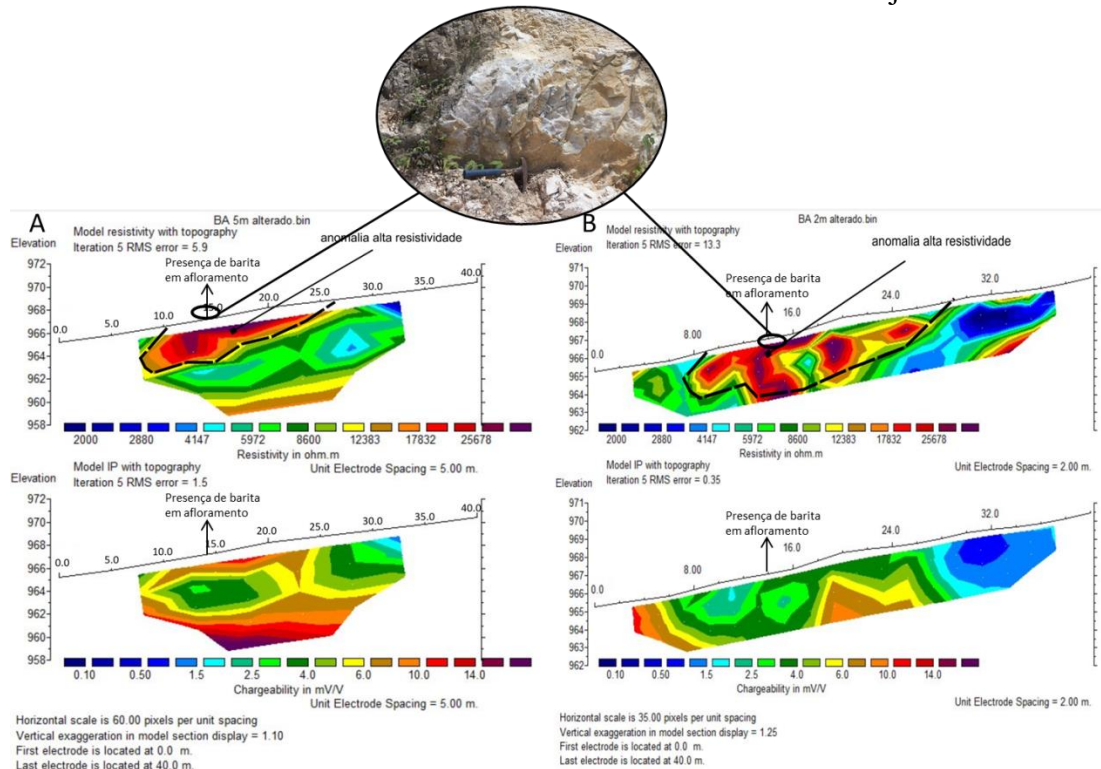


Figura 6.1 A e B nota-se que o corpo resistivo demarcado entre as posições 13 e 20 metros não se mostra contínuo, podendo indicar pequenos corpos e ramificações tanto na vertical como na horizontal. Os valores obtidos de resistividades maiores do que 12000 ohm.m, tanto para as anomalias da área 1 como para às da área 2, são superiores àqueles encontrados no estudo de Ehirim et al. (2016) que atribuiu valores de 1500 a 5500 ohm.m para região com suspeitas de ocorrência da barita. Na Figura 6.2A (área 2), os altos valores de resistividade em duas regiões da seção podem ser indicativos da presença de barita em profundidade, já que nessa região não são aflorantes.

Em relação à cargabilidade, para esses perfis, não é possível fazer uma correlação direta, ou seja, a barita não polariza; o que é evidente nesse parâmetro são seus altos valores

na seção basal da

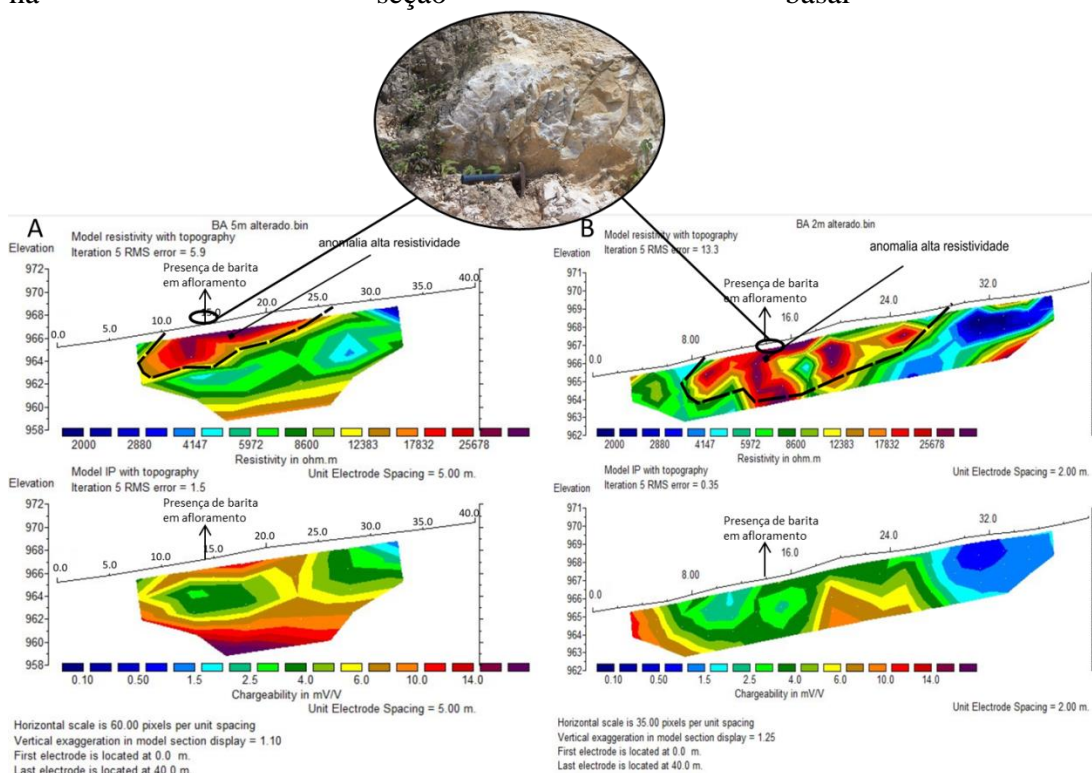


Figura 6.1A. Como já mostrado por Orellana (1974) e Telford et al. (1990) a polarização do eletrodo é a que possui um maior pronunciamento do efeito IP e tal polarização ocorre quando há a presença de material metálico, principalmente se tratando de sulfetos disseminados, portanto os altos valores visualizados nessa região basal indicam uma concentração de sulfeto metálico disseminado, já que para depósitos do tipo SEDEX, como o da região, há um zoneamento vertical na estratigrafia de Cu-Pb-Ba, da base para o topo, ou seja, o Bário é o último a se cristalizar, (Silva, 1990). Além disso, a cargabilidade pode indicar também uma contaminação de sulfeto, e consequentemente, uma necessidade de um processamento mais complexo na lavra da barita. A posição em relação à fonte, também pode ser inferida com a cargabilidade, isso é, linhas com maiores contribuições do efeito IP estariam mais próximas da fonte (com presença de sulfeto metálico) e linhas sem pronunciamento do efeito IP representam as regiões mais distais dos depósitos do tipo SEDEX, onde há um enriquecimento de Bário.

Os resultados obtidos sobre os corpos aflorantes, na segunda campanha de campo, foram essenciais para a determinação de um valor base de resistividade que pode estar relacionado com a presença de barita. Nas Figuras 6.3 a 6.9 observam-se anomalias de alta resistividade, sendo o valor base entre 8000 e 10000 ohm.m referentes aos corpos de barita, os quais são também superiores ao proposto por Ehirim et al. (2016), essas medidas obtidas sobre os corpos aflorantes servirão de padrão para as obtidas sobre corpos cegos. A diferença

nos valores de resistividade pode estar relacionada ao grau de impurezas, intemperismo, teor de humidade ou fraturamento do mineral, sendo então, aqueles que apresentarem os valores mais altos de resistividade serão os minerais mais puros e consequentemente de maior valor agregado. Nos modelos 3D desses corpos é possível observar a não continuidade da zona resistiva, indicando uma fragmentação e descontinuidade dos corpos, tanto lateral como verticalmente.

As encaixantes dos corpos de barita para a região, de acordo com Silva (1990) e dados de campo, são quartzitos e xistos. Nos perfis de resistividade das Figuras 6.4, 6.7 e 6.9 a encaixante possui valores de resistividade menores do que 2000 ohm.m, o que é coerente com regiões mais xistosas, já as demais seções apresentam valores de resistividade entre 2000 e 5000 ohm.m sendo indicativo de uma encaixante mais quartzosa.

O parâmetro cargabilidade (efeito IP) não pode ser correlacionado diretamente com os afloramentos de barita e tampouco com a resistividade, esse está relacionado com a presença de sulfetos. Com relação a esse parâmetro é notável a presença de altos valores abaixo das zonas resistivas, assim como observado na

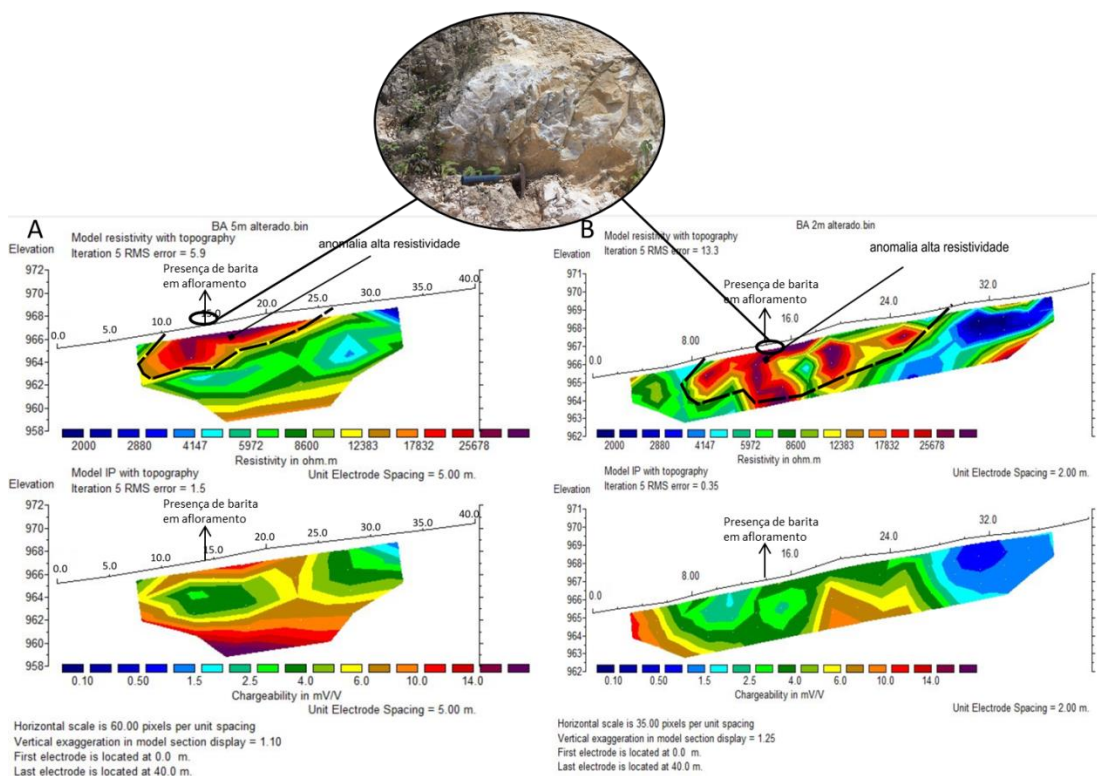


Figura 6.1A (área 1), e como já mencionado pode estar relacionado com alguma concentração desses sulfetos disseminados.

Para os perfis elétricos por capacitância (Figuras 6.10 e 6.11) buscou-se uma área onde fosse possível relacioná-los com afloramentos, e tal região é coincidente com a área 1. Os valores de resistividade abaixo do afloramento de barita são maiores do que 11000 ohm.m no

perfil OM1 e maiores do que 20000 ohm.m no perfil OM2, indicando mais uma vez a correlação de zonas altamente resistivas com corpos de barita. Os valores extrapolantes do perfil OM2 podem estar relacionados a um corpo de barita sem impurezas e sem fraturas. No perfil OM1 observa-se também regiões com a mesma intensidade de resistividade e que atingem profundidades de até 4 metros, essas regiões podem ser indícios de barita não aflorante.

Os dados de laboratório comprovam àqueles observados em campo. Na simulação em caixa (Figura 6.13 e 6.14), a região que se encontra a amostra de barita apresenta altos valores de resistividade (maiores do que 70 ohm.m) quando comparado com o meio circundante. Nesse experimento houve uma boa delimitação lateral do corpo de barita, tanto na seção de resistividade como na de cargabilidade, porém a profundidade foi superestimada, podendo ser causada pela própria inversão no Res2Dinv, que não estima com precisão a profundidade. Os valores não tão altos de resistividade podem ser resultado de: a) a amostra de barita é pequena em relação ao espaçamento, então a resistividade está muito influenciada pelo meio circundante; b) a corrente fica confinada à caixa, de forma bem diversa ao meio natural, c) há um maior teor de humidade. Portanto esse experimento mostra que é possível detectar a barita, mas não quantificar sua resistividade real.

Para esse experimento a amostra não continha sulfetos e, portanto, não foi observado nenhuma anomalia de alta cargabilidade nessa região. Assim enfatiza-se o fato que os altos valores de cargabilidade observados em campo podem estar relacionados a sulfetos metálicos de Cu-Pb.

As amostras utilizadas para medição direta de resistividade foram submetidas também a medidas de densidade, o que comprovou seus altos valores de densidade, entre 4,0 e 4,29 g/cm³, bem próximos dos valores propostos por Hanor (2000) de 4,48 g/cm³. Os valores de resistividade do primeiro experimento encontram-se na mesma ordem de grandeza daqueles medidos na simulação em caixa, isso se deve ao fato da amostra ter sido previamente mergulhada em água e também à contaminação pela solução de sulfato de cobre, que percolou por micro fraturas da amostra e contribuiu para uma diminuição nas medidas de resistividade. No segundo experimento, a amostra não foi saturada e tampouco houve a contaminação pelo cloreto de cobre, já que não utilizou-se dessa solução, portanto, os resultados obtidos são coerentes com àqueles de campo, em torno dos 5.000 ohm.m Esses experimentos devem ser mais detalhados, realizando-se mais medidas em diferentes cilindros, já que nesse trabalho,

foi apresentado como um teste piloto baseado em Telford et al., 1990, com o objetivo de melhorar a resistência de contato sem contaminar a amostra.

8. CAPÍTULO 08- CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Nesse trabalho foi possível correlacionar diretamente medidas de campo de resistividade e cargabilidade com corpos de barita, visto que os perfis foram realizados sobre e fora dos afloramentos, e conseqüentemente é possível o desenvolvimento de uma lavra responsável e seletiva, já que houve a delimitação e detalhamento dos alvos. Além disso, os dados de laboratório foram cruciais para a comprovação dos resultados obtidos em campo, e recomenda-se sempre que possível a utilização do laboratório para validação dos dados de campo.

Propõe-se, então, a utilização do método da eletrorresistividade para localização de corpos de barita. Visando o objetivo da delimitação lateral desses corpos, o caminhamento elétrico é a técnica de aquisição mais adequada, e nesse trabalho o arranjo dipolo-dipolo também se mostrou um arranjo eficaz. Nos dados obtidos os valores da resistividade dos corpos de Barita foram bem mais resistivos ($\gg 8000$ ohm.m) do que as encaixantes – xistos e quartzitos – que mantiveram valores inferiores a 5000 ohm.m. Os dados de laboratório corroboram os de campo e sustentam os altos valores de resistividade para a barita.

O método da polarização induzida não se mostrou eficaz para a delimitação dos corpos de barita, já que não foi possível nenhuma correlação direta dos valores de cargabilidade com os corpos de barita, concluindo que esse mineral não polariza. Em contrapartida os altos valores do parâmetro abaixo das zonas resistivas indicam uma concentração de sulfetos disseminados. Sabe-se que o Vale do Ribeira é uma importante província de Sulfetos polimetálicos (Pb-Cu-Zn) os quais são caracterizados como do tipo SEDEX. Nesses depósitos há um zoneamento vertical na estratigrafia de Cu-Pb-Ba, da base para o topo. Sendo coerente, portanto, encontrar depósitos de sulfetos metálicos nas regiões abaixo das zonas da barita. Outro fato que sustenta tal hipótese são os dados laboratoriais da simulação em caixa, nesse experimento a amostra não continha sulfeto e logo não resultou em anomalias para o efeito IP.

Para os dados laboratoriais, sugere-se um melhor detalhamento do experimento da caixa, fazendo testes sem amostras, com diferente teor de umidade e também com diferentes arranjos e diferentes aberturas. No experimento da medição direta, o ideal é o uso do arranjo proposto por Telford et al., 1990, evitando assim a contaminação pela solução de sulfato de cobre e permitindo a obtenção de uma resistência de contato ideal.

A integração dos dados de geologia regional e local com os dados elétricos de campo e laboratório permitiu a constatação que os corpos de barita são referentes aos altos valores de

resistividades, e assim realizar um detalhamento do alvo. Além disso, a região, que a princípio seria uma mineração de pequeno porte para barita, pode ser desenvolvida também para exploração de sulfetos metálicos. Os altos valores de cargabilidade são indícios que devem ser estudados e trabalhados, realizando aquisições mais criteriosas do efeito IP e posteriormente a utilização de um método de prospecção direto, como a sondagem rotativa, para confirmação dos resultados e investigação da viabilidade para exploração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akpan, A. E., Ebong, E. D., Ekwok, S. E., & Joseph, S. (2014). Geophysical and geological studies of the spread and industrial quality of Okurike Barite deposit. *American Journal of Environmental Sciences*, 10(6), 566–574. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.566.574>
- Almeida, F. F. M. (1977). O Craton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349–364. <https://doi.org/10.5327/rbg.v7i4.128>
- ANM. (2020). <http://www.anm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine>
- Araújo, C. C. de, & Marcedo, A. B. (2004). Geoprocessamento De Dados Geológicos Para Mapeamento De Favorabilidade Para Cobre, Chumbo E Zinco No Vale Do Ribeira (Sp-Pr). *Revista Brasileira de Geociências*, 34(3), 317–328. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2004343317328>
- Arndt, N., & Ganino, C. (2012). *Metals and Society: An Introduction to Economic Geology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22996-1>
- Barbour, A. P., & De Oliveira, M. A. (1979). Pb, Zn, Cu e Ba do distrito do Perau - modelo sedimentar para sulfetos do vale do Ribeira. *Boletim IG, Instituto de Geociências, Universidade de Sao Paulo*, 10, 97–119. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8978.v10i0p97-119>
- Barnes, D. F., Mayfield, C. F., Morin, R. L., & Brynn, S. (1982). Gravity Measurements Useful in the Preliminary Evaluation of the Nimiuktuk Barite Deposit, Alaska. *Economic Geology*, 77, 185–189.
- Bhattacharya, B. B., Jain, S. C., & Mallick, K. (1974). Geophysical Prospecting 32,157-158,1984. *Geophysical Prospecting*, 22, 421–429.
- Braga, A. C. de O. (1997). Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica- Formações Rio Claro e Corumbataí no município de Rio Claro-SP. In *Rio Claro*. Universidade Estadual Paulista.
- BRAGA, A. C. de O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia*. Oficina de texto.
- Campanha, G. A., & Sadowski, G. R. (1999). Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiaí Domain). *Precambrian Research*, 98(1–2), 31–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(99\)00027-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00027-3)
- Cavenaghi, V. L. S. (2017). *Caracterização geoeletrica de alvos rasos no Sítio Controlado de Geofísica Rasa-II - IAG/USP através do uso de resistividade capacitiva*. Universidade de São Paulo.
- Coggon, J. H. (1973). Coggon 1973. *Geophysics*, 38(4), 737–761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1190/1.1440372>
- Daitx, E. C. (1996). *Origem e evolução dos depósitos sulfetados tipo Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Canoas e Perau (Vale do Ribeira, PR)*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita.
- Dardene, M. A. (1985). Os depósitos de fluorita da região Sul do Brasil. *2º Simpósio Sul Brasileiro de Geologia*, 201–214.
- Egeh, E. U., Ekwueme, B. N., & Akpeke, B. G. (2004). The appraisal of a proosed barite quarry in akpet area.pdf. *Global Journal Of Geological Sciences*, 2(2), 171–175.
- Ehirim, C. N., Ebeniro, J. O., & Ofoegbu, C. O. (2016). Baryte mineral exploration in parts of the lower Benue Trough, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*, 11(21), 279–286. <https://doi.org/10.5897/ijps2016.4552>
- Elis, V. R. (1998). *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Universidade Estadual de São Paulo.
- Emsbo, P., Seal, R. R., Breit, G. N., & Diehl, S. F. (2016). Sedimentary Exhalative (Sedex) Zinc-Lead-Silver Deposit Model. In *Mineral Deposit Model for Resource Assessment*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20105070N>
- Faleiros, A. M., Campanha, G. A. da C., Faleiros, F. M., & Bello, R. M. da S. (2014). Fluid regimes, fault-valve behavior and formation of gold-quartz veins - The Morro do Ouro Mine, Ribeira Belt, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 56, 442–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.05.002>
- Faleiros, F. M. (2008). *Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto*

- Alto Turvo (SP, PR)* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.44.2008.tde-02092008-113513>
- Faleiros, F. M., Campanha, G. A. da C., Martins, L., Vlach, S. R. F., & Vasconcelos, P. M. (2011). Ediacaran high-pressure collision metamorphism and tectonics of the southern Ribeira Belt (SE Brazil): Evidence for terrane accretion and dispersion during Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 189(3–4), 263–291. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.013>
- Fernandes, F. R. C., Matos, G. M. M. de M., Castilhos, Z. C., & Luz, A. B. (2007). Tendências tecnológicas Brasil 2015: Geociências e tecnologia. In *Caderno de Geografia* (Vol. 26, Issue 47). CPRM/CETEM. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26n47p759>
- Geotomo, S. (2004). Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. In *Manual for Res2dinv ver. 3.54* (Vol. 3, p. 71).
- Hanor, J. S. (2000). Barite-celestine geochemistry and environments of formation. *Sulfate Minerals: Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance*, 40(1), 193–275. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.4>
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. (Eds.). (2012). *Geologia do Brasil* (1ª). Editora Beca.
- Heilbron, M., Cordani, U. G., & Alkmim, F. F. (2017). São Francisco Craton, Eastern Brazil. In *Regional Geology Reviews* (Issue December). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0>
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos Neto, M., Da Silva, L., Trouw, R. A., & Janasi, V. (2004). Província Mantiqueira. In *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 203–234). Beca Produções Culturais Limitada.
- Johnson, C. A., Piatak, N. M., & Miller, M. M. (2017). Barite (Barium). In K. J. Schulz, J. H. DeYoung, R. J. Seal II, & D. C. Bradley (Eds.), *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/pp1802D>
- Kuras, O., Beamish, D., Meldrum, P. I., & Ogilvy, R. D. (2006). Fundamentals of the capacitive resistivity technique. *Geophysics*, 71(3). <https://doi.org/10.1190/1.2194892>
- Loke, D. M. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*.
- Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 2004 Revised Edition. *Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, July, 136.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Luz, A. B., & Baltar, C. A. M. (Eds.). (2005). Barita. In *Rochas e Minerais Industriais* (2nd ed., pp. 263–277).
- Martins, C. A., Terenci, E. R., Tomi, G., & Tichauer, R. M. (2016). Impact of Geophysics in Small-Scale Mining. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 05(04). <https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000172>
- Neukumun, C., Grutzner, C., Azzam, R., & Reicherter, K. R. (2010). Mapping Buried Karst Features with Capacitive-Coupled Resistivity System (CCR) and Ground Penetrating Radar (GPR). *Advances in Research in Karst Media*, June 2014, 429–434.
- Oasis Montaj, G. (2014). *Oasis montaj Gridding* (pp. 1–20). <https://www.geosoft.com/>
- Obi, D. A., Ekwuem, B. N., & Akpeke, G. B. (2014). Reserve Estimation of Barite Deposits using Geological and Geophysical Investigations in Cross River State South Eastern, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(10), 16–31.
- Oladapo, M. I., & Adeoye-oladapo, O. O. (2011). Geophysical investigation of barite deposit in Tunga, Northeastern Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*, 6(20), 4760–4774. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.337>
- Orellana, E. (1972). *Prospeccion Geoelectrica en corriente continua* (1st ed.). Paraninfo.
- Orellana, E. (1974). *Prospeccion Geoelectrica por campos variables*. Paraninfo.
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Publishing.

- Silva, A. C. G. A. (1990). *A Jazida de Barita de Água Clara no âmbito do Precambriano do Vale do Ribeira, Estado do Paraná*. Universidade de São Paulo.
- Silva, A. D. R., Campos, F. F., Brumatti, M., Salvador, E. D., & Pavan, M. (2019). *Mineralizações Polimetálicas (Pb-Zn-Ag-Cu-Ba) associadas à Formação Perau, Cinturão Ribeira Meridional*. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21258>
- Silva, P. C. S., Yamato, A. A., Vasconcelos, C. S., & Jr. Lopes, I. (1999). *Curitiba - Folha SG.22-X-D-I*.
- Sumner, J. S. (1976). *Principles of Induced Polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific publishing company.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). University of Cambridge.
- Uhley, R. ., & Sscharon, L. (1954). Gravity Surveys for residual barite deposits in Missouri. *Mining Engineering*, 6, 52–56.
- Visarion, M., Rosca, V., & Sava, C. S. (1974). High Accuracy gravity surveys applied to locate barite ores. *Revista Roumaine Geologic, Geophysique, Geographic*, 18, 115–125.
- Ward, S. H. (1988). The Resistivity and Induced Polarization method. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1988.*, 109–250. <https://doi.org/10.4133/1.2921804>
- Yamashita, Y., Groom, D., Inazaki, T., & Hayashi, K. (2004). Rapid near surface resistivity survey using the capacitively-coupled resistivity system : OhmMapper. *Proceeding of the 7th SEGJ International Symposium*, 292–295.