

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MAURÍCIO BAZZETTO JÚNIOR**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO  
INDUZIDA APLICADA À PROSPECÇÃO DE COBRE, MINA DO SEIVAL,  
CAÇAPAVA DO SUL-RS**

**Caçapava do Sul**

**2025**

**MAURÍCIO BAZZETTO JÚNIOR**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO  
INDUZIDA APLICADA À PROSPECÇÃO DE COBRE, MINA DO SEIVAL,  
CAÇAPAVA DO SUL-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Geofísica da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Daniele Pantoja Monteiro

Coorientador: Lenon Melo Ilha

**Caçapava do Sul**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B364i Bazzetto, Maurício Júnior

Integração de dados de eletrorresistividade e polarização  
induzida aplicada à prospecção de cobre, Mina do Seival,  
Caçapava do Sul-RS / Maurício Júnior Bazzetto.

44 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2025.

"Orientação: Daniele Pantoja Monteiro".

1. Exploração Mineral. 2. Geofísica Aplicada. I. Título.

**MAURÍCIO BAZZETTO JÚNIOR**

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA  
APLICADA À PROSPECÇÃO DE COBRE, MINA DO SEIVAL, CAÇAPAVA DO SUL-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 9 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

---

Prof. Dra. Daniele Pantoja Monteiro  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Everton Frigo  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **DANIELE PANTOJA MONTEIRO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 18:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 18:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EVERTON FRIGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1933605** e o código CRC **D9BAEF08**.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maurício Bazzetto e Lindinalva Aparecida de Lira Bazzetto, pela forma como me criaram e pelo apoio incondicional que me foi dado durante os anos de faculdade, permitindo que eu focasse totalmente em meus estudos e ambições acadêmicas, sem eles, nada disso seria possível.

Agradeço aos meus professores, em especial aos professores Dr. Marcus Vinicius e Dr. Everton Frigo, pela parceria desde meu ingresso na universidade, assim como por terem despertado em mim a vontade de seguir o caminho de geofísico.

Agradeço aos meus orientadores, Dra. Daniele Pantoja Monteiro e Dr. Lenon Melo Ilha, pela amizade, paciência, puxões de orelha, parceria, dedicação e apoio durante a realização deste trabalho, que é uma das fases mais importantes de minha vida.

Agradeço aos meus colegas e amigos de curso, com quem dividi alegrias e tristezas durante este tempo na universidade. Agradeço especialmente a Bruno Greco Perez, Guilherme Elias Diadosk e Felipe Batistelli por participarem da árdua aquisição de campo realizada durante este trabalho. Agradeço à Sissa Kumaira pela amizade, ajuda, paciência e apoio durante este ano puxado.

Agradeço ao Laboratório de Equipamentos Geofísicos (LEG) pelo apoio logístico para realização do campo, liberação dos equipamentos e transporte, e ao Laboratório de Análise de Sinais Geofísicos (LASG) pelos computadores com software de processamento, que permitiram a realização deste trabalho. Agradeço também à Universidade Federal do Pampa por disponibilizar, de forma gratuita, educação superior de qualidade em um curso tão importante quanto a Geofísica.

A todos, muito obrigado por terem passado pela minha vida.

“Success is the progressive realization of a worthy goal or ideal”.

Earl Nightingale

## RESUMO

O cobre, assim como diversos outros minerais, é essencial para a humanidade, especialmente em consequência da transição energética, aumentando sua demanda. A procura deste mineral, na tentativa de evitar sua escassez, tem impulsionado a reavaliação, assim como a prospecção de novas jazidas. A região de Caçapava do Sul - RS representa uma área de grande potencial para exploração, possuindo longo histórico de mineração cuprífera. A Mina do Seival, localizada no extremo oeste do município, constitui um conjunto de minas com ocorrência de cobre. Na mina Alcides, alvo de estudo deste trabalho, o cobre ocorre de forma disseminada, em sulfetos. A limitada integração da geofísica com outras técnicas contribuiu para que a região fosse pouco explorada. Os métodos Geoelétricos, como a Eletrorresistividade e Polarização Induzida, são amplamente empregados na prospecção mineral devido à diferença de propriedades elétricas, resistividade e cargabilidade. Neste contexto, regiões de potencial mineralização apresentam valores de baixa resistividade e alta cargabilidade. Este trabalho utilizou os métodos da Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), na identificação de potenciais áreas para exploração de cobre na Mina do Seival. Foram realizados quatro perfis de 360 metros com profundidade de investigação de aproximadamente 70 metros. Os dados foram processados utilizando o software Res2Dinv, que emprega algoritmos de inversão para a geração de modelos 2D das propriedades físicas. As seções das linhas apresentaram valores de resistividade baixos, menores que 380 *ohms.m*, e foram identificadas zonas de alta cargabilidade com valores superiores a 12 *mV/V*. Em síntese, os resultados evidenciaram zonas de possível potencial mineralização nas linhas de aquisição, identificadas por meio de áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade, coerente com as informações geológicas e geofísicas disponíveis.

Palavras-chave: eletrorresistividade, polarização induzida, inversão, sulfeto, cobre, exploração mineral.

## ABSTRACT

Copper, like several other minerals, is essential to humanity, especially as a result of the energy transition, which has increased its demand. To prevent shortages, the search for this mineral has driven both the reappraisal and the prospecting of new deposits. The region of Caçapava do Sul (RS) represents an area of great exploration potential, boasting a long history of copper mining. The Seival Mine, located in the far west of the municipality, consists of a set of mines with copper occurrences. In the Alcides mine, the object of this study, copper occurs in disseminated form within sulfides. Historically, the limited integration of geophysics with other techniques has contributed to the region being under-explored. Geoelectrical methods, such as Electrical Resistivity and Induced Polarization (IP), are widely used in mineral prospecting due to differences in electrical properties, specifically resistivity and chargeability. In this context, regions of potential mineralization exhibit low resistivity and high chargeability values. This study utilized Electrical Resistivity (ER) and Induced Polarization (IP) methods to identify potential areas for copper exploration at the Seival Mine. Four 360-meter profiles were conducted with an investigation depth of approximately 70 meters. Data were processed using the Res2Dinv software, which employs inversion algorithms to generate 2D models of the physical properties. The line sections displayed low resistivity values, below 380 *ohms.m*, and high chargeability zones were identified with values exceeding 12 *mV/V*. In summary, the results highlighted zones of possible mineralization potential across the acquisition lines, identified by areas of low resistivity and high chargeability, consistent with the available geological and geophysical information.

Keywords: Electrical Resistivity, Induced Polarization, Inversion, Sulfide, Copper, Mineral Exploration

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo, Mina do Seival. ....	14
Figura 2 – Mapa esquemático da geologia do Escudo Sul-rio-grandense. ....	15
Figura 3 – Mapa geológico Folha SH.22-Y-A-IV. ....	16
Figura 4 – Mapa Geológico da Mina do Seival. ....	17
Figura 5 – Amostra de Rocha com Mineralização de Malaquita. ....	18
Figura 6 – Lei de Ohm para um condutor linear. ....	22
Figura 7 – Esquema de aquisição do método de eletrorresistividade. ....	23
Figura 8 – Polarização de Membrana em (a) e polarização de eletrodo em (b). ....	25
Figura 9 – O fenômeno de polarização induzida, com decaimento do potencial após desligamento da corrente. ....	25
Figura 10 - Representação de um Eletrodo Poroso. ....	26
Figura 11 – Esquema de Aquisição de uma Sondagem Elétrica Vertical. ....	27
Figura 12 – Esquema de Aquisição do Caminhamento Elétrico. ....	27
Figura 13 – Arranjo Schlumberger. ....	28
Figura 14 – Mapa de Localização das Linhas de Aquisição, numeradas em ordem de aquisição. ....	31
Figura 15 – Equipamentos para Aquisição de dados. a) resistivímetro Syscal Pro, b) bateria 12V, c) bobinas de cabo multicanal, d) GPS. ....	32
Figura 16 – Materiais para Aquisição de dados. a) caixas com 72 eletrodos não polarizáveis, b) solução de $CuSO_4$ , c) zoom nos eletrodos não polarizáveis e d) conexão dos eletrodos ao cabo multicanal. ....	33
Figura 17 – Fluxograma do Processamento de Dados. ....	34
Figura 18 – Pseudo-seções com distribuição espacial dos pontos medidos. ....	35
Figura 19 – Seção 2D. ....	35
Figura 20 – Linha 1 de Resistividade e Cargabilidade. ....	36
Figura 21 – Linha 2 de Resistividade e Cargabilidade. ....	37
Figura 22 – Linha 3 de Resistividade e Cargabilidade. ....	37
Figura 23 – Linha 4 de Resistividade e Cargabilidade. ....	38

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resistividade de Rochas e Minerais.....	29
Tabela 2 - Cargabilidade de Litologias .....	30

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	12
<b>2.1. Objetivo Geral</b> .....	12
<b>2.2. Objetivos Específicos</b> .....	12
<b>3. JUSTIFICATIVA</b> .....	13
<b>4. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	14
<b>4.1. Localização e Acesso</b> .....	14
<b>4.2. Geologia Regional</b> .....	15
<b>4.3. Geologia Local</b> .....	17
<b>4.4. Histórico de exploração</b> .....	19
<b>4.5. Trabalhos Anteriores</b> .....	20
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	21
<b>5.1. Método da Eletrorresistividade</b> .....	21
<b>5.2. Método da Polarização Induzida</b> .....	24
<b>5.3. Técnicas de Investigação e Arranjo de Eletrodos</b> .....	26
<b>5.4. Propriedades Físicas dos Minerais e Rochas</b> .....	28
<b>6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS</b> .....	31
<b>6.1. Aquisição de Dados</b> .....	31
<b>6.2. Processamento de Dados</b> .....	33
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	36
<b>7.1. Seções 2D</b> .....	36
<b>8. CONCLUSÃO</b> .....	39
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	40

## 1. INTRODUÇÃO

A grande abundância e diversidade de recursos minerais presentes no Brasil conferiu ao país uma economia historicamente ligada à atividade minerária. Entre esses recursos, destaca-se o cobre, um metal amplamente empregado na indústria de eletrônicos e construção civil, devido às suas propriedades como bom condutor de eletricidade, alta durabilidade e resistência à corrosão. De acordo com estimativas da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento, a demanda mundial por cobre deverá aumentar mais de 40% até 2040, com a oferta não acompanhando esse crescimento (UNCTAD, 2025). Este aumento está associado à transição para fontes de energias limpas e ao avanço das tecnologias digitais, que exigem grandes quantidades desse mineral para a fabricação de componentes eletrônicos. Nesse contexto, a identificação de novos depósitos, bem como a reavaliação de depósitos com histórico de produção de cobre, torna-se essencial para atender à demanda futura.

A Mina do Seival, localizada entre os municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, é historicamente reconhecida pela intensa atividade de exploração mineral, principalmente de cobre, iniciada na segunda metade do século XX. Localmente, a Mina do Seival é dividida por um conjunto de Minas (Reischl, 1978), denominadas Barita, João Dahne, Morcego, Meio, Cruzeta e Alcides, que contêm mineralizações cupríferas e vários prospectos com aproximadamente 0,20 Mt de rochas mineralizadas com teor médio de 1,40% de Cu (Reischl, 1978; Lopes, 2018). Na mina Alcides, ocorre mineralização de cobre sulfetado na forma de calcosina e a malaquita (Lopes et al., 2014). Atualmente, a Mina do Seival está inativa.

Apesar da intensa exploração na Mina do Seival, os principais estudos disponíveis consistem sobre a sua caracterização geológica (por exemplo, Bettencourt, 1972; Paim et al., 2000, 2014; Fragoso Cesar et al., 2000; Wildner et al., 2002; Lopes et al., 2014; 2018; Oliveira et al., 2014) e um número reduzido utilizando métodos geofísicos (por exemplo, Moreira et al., 2012; 2020, Lenhare et al., 2020). Essa limitação, especialmente decorrente da baixa densidade de informações geofísicas, compromete o conhecimento sobre a disposição dos depósitos minerais da área.

A prospecção mineral compreende estudos geológicos em diferentes escalas, sondagens diretas e a aplicação da geofísica. Os métodos geofísicos são não invasivos e não destrutivos, com medições indiretas de parâmetros físicos do meio geológico (Braga, 2006). Os métodos Geoelétricos, como a Eletrorresistividade (ER) e Polarização Induzida (IP), são amplamente empregados na prospecção mineral devido à diferença de propriedades elétricas, resistividade

e cargabilidade, que os minerais de interesse possuem em relação à rocha encaixante (Orellana, 1972; Telford et al., 1990; Kearey et al., 2013; Reynolds, 2011). Dentre as técnicas de investigação, o Caminhamento Elétrico permite a visualização em seções 2D da variação destas propriedades lateralmente e em vários níveis de profundidade. Em geral, em áreas de alteração hidrotermal (Allis, 1990), as zonas de mineralização de cobre podem representar anomalias de baixa resistividade e alta cargabilidade.

O método da Eletroresistividade investiga a subsuperfície a partir de medições da propriedade física da resistividade, que representa a dificuldade de uma corrente elétrica atravessar um determinado volume de material (Telford et al., 1990). Neste método são realizadas medições das diferenças de potencial geradas por uma fonte de corrente e, conhecendo a geometria do arranjo (distâncias entre os eletrodos) é possível calcular o valor da resistividade do meio investigado. Estes valores podem variar de acordo com diversos fatores, tais como o tipo de rocha, conteúdo de água, porosidade e presença de minerais condutivos (Orellana, 1972), usados para determinar as litologias em profundidade.

A Polarização Induzida é um método especialmente eficaz na detecção de materiais que possuem a capacidade de armazenar carga elétrica temporariamente, como certos tipos de minerais metálicos. Quando uma corrente elétrica é aplicada, alguns materiais subterrâneos (como sulfetos metálicos, argilas ou óxidos) armazenam carga por um curto período, como um capacitor. Interrompendo-se a corrente, é possível observar uma tensão remanescente (voltagem residual) que decai com o tempo, e esse fenômeno é chamado de polarização induzida (Kearey et al., 2013).

Neste trabalho foram utilizados os métodos Geométricos da Eletroresistividade e Polarização Induzida para investigação mineral da Mina Alcides, utilizando tomografia elétrica, com arranjos de eletrodos Schlumberger, mantendo-se uma separação crescente entre os eletrodos de emissão de corrente com os eletrodos de medição de tensão centrais. A aplicação conjunta dos métodos permitiu diminuir as incertezas e a ambiguidade na interpretação dos dados geofísicos. A interpretação dos resultados obtidos indicou uma clara correlação entre os parâmetros físicos (cargabilidade e resistividade) e a ocorrência de zonas sulfetadas e alterações hidrotermais, coerente com a literatura da geologia regional.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Aplicar os métodos geoeletricos de ER e IP na Mina Alcides para fins de prospecção mineral de cobre, bem como promover e potencializar futuros programas de pesquisa mineral regional subsidiados por investigações geofísicas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- I. Adquirir dados de resistividade e cargabilidade elétrica em perfis lineares 2D (pseudoseções de resistividade aparente e cargabilidade);
- II. Processar e inverter dados obtidos gerando modelos 2D das propriedades físicas resistividade e cargabilidade;
- III. Demonstrar a viabilidade dos métodos geofísicos para exploração mineral na região, com intuito de promover e potencializar futuros programas de pesquisa mineral.

### **3. JUSTIFICATIVA**

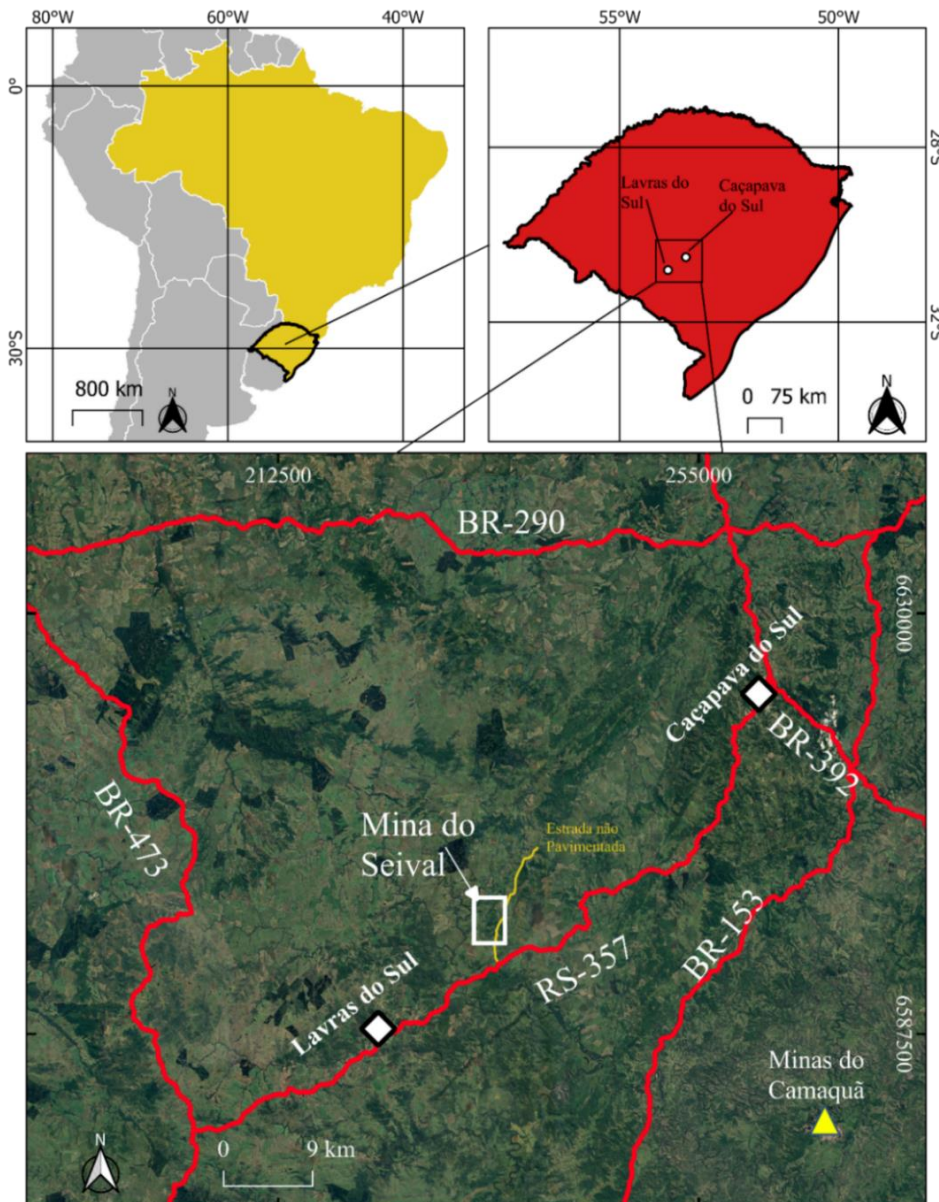
O cobre vem ganhando importância, sendo um material bruto vital para uma ampla gama de aplicações industriais, emergindo como um precursor do progresso econômico em certos campos, como energia, transporte e eletrônicos (IBRAM, 2023). O aumento da necessidade deste metal com o aumento em seu preço torna a descoberta de novos depósitos cada vez mais atrativa para um país exportador, como o Brasil. Por consequência destes fatores, este trabalho é justificado pela importância da pesquisa mineral. Para tanto, propõem-se identificar e reavaliar os depósitos minerais de cobre na Mina Alcides, pertencente à Mina do Seival, além de demonstrar a geofísica como ferramenta essencial para estudos de mineração.

## 4. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. Localização e Acesso

A mina Alcides, pertencente à mina do Seival, está localizada entre os municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul, inserida na carta topográfica Folha Arroio América (SH.22-Y-A-IV), entre as coordenadas planas (UTM) 6604000-6596000 m N e 232000-236000 m E (Figura 1). O acesso à Mina do Seival é feito pelas rodovias BR-290 e BR-392, percorrendo 57 km pela rodovia RS-357, sentido SW, até os limites de Lavras do Sul.

Figura 1 – Localização da área de estudo, Mina do Seival.



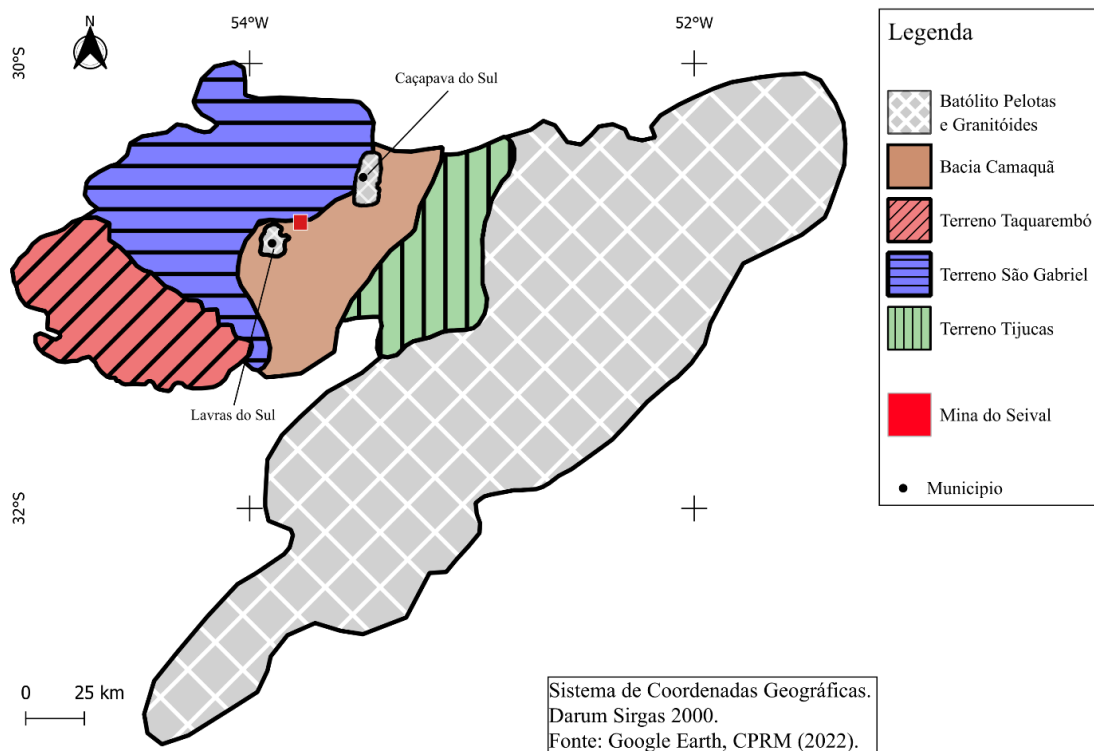
Fonte: Adaptado de Cruz (2022) e Google Earth.

## 4.2. Geologia Regional

No sul do estado do Rio Grande do Sul predominam rochas ígneas e metamórficas antigas pertencentes ao Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), cuja formação remonta ao Pré-Cambriano, especialmente ao Proterozóico (Chemale Jr., 2000; Hartmann et al., 2007). Formado durante a Orogênese Brasileira, diferentes blocos continentais, como o Cráton Rio de la Plata e Kalahari, terrenos metavulcano-sedimentares e arcos magmáticos, colidiram e se consolidaram, originando o Cinturão Dom Feliciano (Almeida et al., 1981). Esse processo deu origem a extensas áreas de rochas metamórficas e graníticas, como gnaisses, migmatitos, granitos e granodioritos, que formam o embasamento cristalino da região.

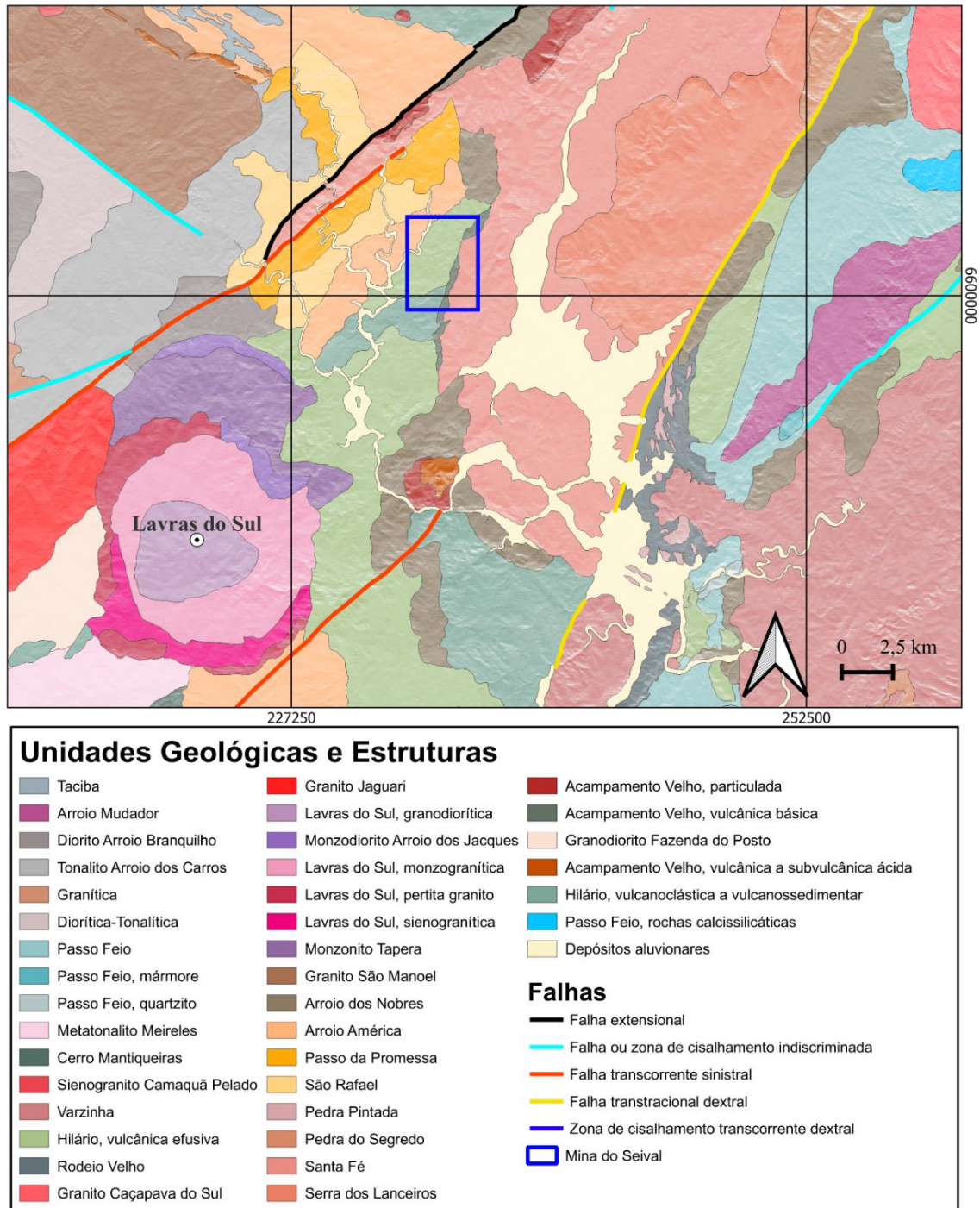
A Mina do Seival, área de estudo, está inserida no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O ESRG é formado por quatro terrenos tectônicos: Taquarembó, São Gabriel, Tijucas e o Terreno Pelotas (ou Batólito Pelotas). Associada a este escudo, encontra-se a Bacia do Camaquã (plutono-vulcano-sedimentar) (Chemale Jr., 2000; Hartmann et al., 2007), apresentado na Figura 2. O embasamento desta bacia é composto de rochas metavulcano-sedimentares, gnaisses e paragneisses, divididas em quatro grupos: Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas, e múltiplas formações geológicas (Chemale Jr., 2000), mostradas na Figura 3.

Figura 2 – Mapa esquemático da geologia do Escudo Sul-rio-grandense.



Fonte: Adaptado de Hartmann et al. (2007).

Figura 3 – Mapa geológico Folha SH.22-Y-A-IV.



Fonte: adaptado de Cruz (2022).

O Grupo Maricá pertencente à Formação Maricá, consiste em um pacote sedimentar de clastos vulcânicos (Borba et al., 2008) de 4.000 metros de espessura (Paim et al., 2000).

O Grupo Bom Jardim é uma sequência de rocha vulcano-sedimentar da Formação Hilário, representada por lava andesítica de fluxo (Nardi e Lima, 1985) e rochas piroclásticas (Lopes et al., 2014) e sedimentares. O Complexo Intrusivo de Lavras do Sul corta esta formação

e, é composto de um núcleo de fase plutônica (Gastal et al., 2015) e intrusões superficiais de rochas monzoníticas (Gastal et al., 2006).

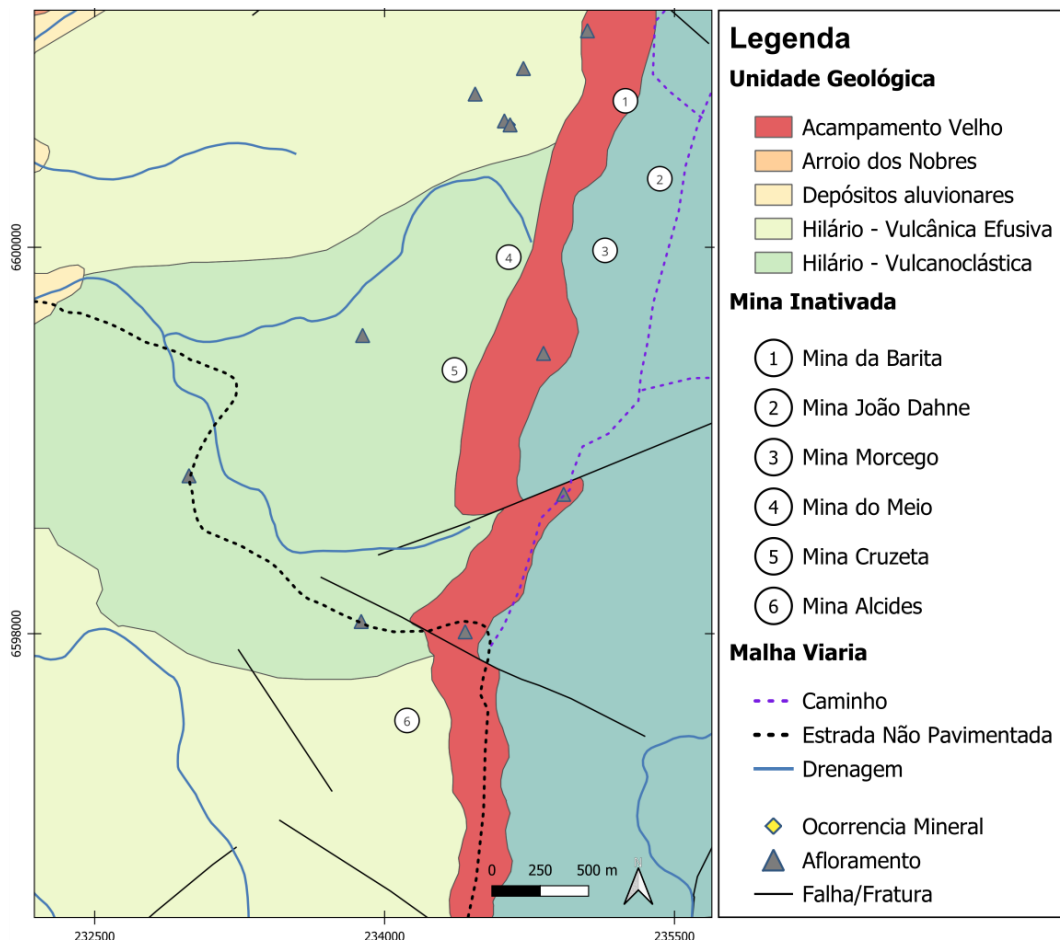
O Grupo Santa Bárbara é subdividido em Formação Santa Fé (Rochas vulcano-sedimentares), Formação Santa Bárbara (rochas sedimentares) (Bicca et al., 2013; Oliveira et al., 2014) e Formação Acampamento Velho (rochas vulcânicas bimodais) (Sommer et al., 2011; Almeida et al., 2012).

O Grupo Guaritas engloba as formações Rodeio Velho, Pedra Pintada e Guaritas, compostas por rochas vulcânicas e sedimentares, respectivamente (Almeida et al., 2012; Oliveira et al., 2014).

### 4.3. Geologia Local

A Mina do Seival é subdividida em seis minas classificadas pelas suas ocorrências minerais: (i) Mina Barita; (ii) Mina João Dahne; (iii) Mina Morcego; (iv) Mina do Meio; (v) Mina Cruzeta; (vi) Alcides (Reischl, 1978), ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Mapa Geológico da Mina do Seival.



Fonte: adaptado de Reischl (1978); Lopes et al. (2014).

As caracterizações petrográfica, geoquímica e estrutural da Mina Alcides são detalhadas por Lopes (2011, 2013, 2018). A Mina Alcides apresenta seis principais características estruturais: cinco com orientação N-NE na superfície e uma com orientação E-W. Inseridas nessas estruturas, quatro cavas orientadas E-W correspondem às áreas onde se encontram os depósitos de cobre. A mina é predominantemente formada por rocha vulcânica fragmentada, especificamente lapili-tufo e brecha-tufo. A matriz que envolve esses fragmentos apresenta textura afanítica com alteração para clorita. Essa rocha contém fragmentos de variação centimétrica que são compostas por andesito (uma rocha vulcânica), com textura porfirítica e amigdalóide composta por plagioclásio e anfibólio e/ou piroxênios.

A Mina Alcides exhibe veios de calcita em fraturas subverticais, indicando atividade hidrotermal (interação com fluidos quentes). Essas fraturas estão preenchidas com calcita, barita, malaquita, carbonato, azurita e quartzo vuggy. A presença do quartzo vuggy, em particular, sugere um controle de sílica resultado de alterações por fluidos ácidos ao longo das falhas geológicas. Além disso, foram encontrados sulfetos disseminados nas rochas (como a calcita, frequentemente oxidada) e malaquita fina (0,1-2 mm).

As fraturas presentes na mina apresentam orientação predominante nas direções NE e NW. De acordo com Reischl (1978) e Lopes et al. (2014), o enriquecimento de minerais valiosos como cobre, ouro e prata, está associado a diques de andesito intrudidos na região. O cobre ocorre na forma de sulfetos (Figura 5), calcosina e malaquita, produto da oxidação desses sulfetos devido ao processo de intemperismo. A mineralização tende a se concentrar em áreas de fraturas e falhas, especialmente orientadas nas direções N-NE e NW.

Figura 5 – Amostra de Rocha com Mineralização de Malaquita, retirada da Mina Alcides.



#### 4.4. Histórico de exploração

O histórico de exploração da Mina do Seival, juntamente com o contexto regional, foram descritos por Lopes (2018). A prospecção de ouro no sul do Brasil levou à identificação de depósitos de cobre no Rio Grande do Sul. Por volta de 1930, na primeira metade do século XX, as minas do Seival destacaram-se como o principal local de exploração de cobre, favorecidas por melhores vias de comunicação e acesso em relação as outras reservas (Reischl, 1978).

A exploração mineral na região iniciou-se em 1901, com pesquisas realizadas por companhias particulares e estatais até 1931 (Lopes, 2018). Em 1937, a mina foi explorada, revelando um teor de 4,7% de Cu. Para fins de comparação, teores entre 0,5% e 2% de Cu indicam concentrações economicamente viáveis. A Cia Indústria Eletro-Químicas S/A assumiu a exploração entre 1939 e 1942. Entre 1935 e 1962, a lavra ocorreu de forma intermitente, resultando em cobre eletrolítico e sulfato de cobre; nesse período, especificamente entre 1955 e 1962, a produção mensal alcançou cerca de 1.000 toneladas de minério com teor médio de 1,6% de Cu. Paralelamente, entre 1942 e 1964, estimou-se que a Mina da Barita continha aproximadamente 64.000 toneladas de minério com 1,71% de cobre e 70 ppm de prata. Em 1957, a Mina João Dahne foi alvo de exploração superficial, extraíndo minério de baixo teor. Por fim, a Mina Alcides passou a focar na produção de sulfatos para uso agrícola.

A Companhia Brasileira do Cobre (CBC), nos anos de 1977 e 1978, realizou uma série de pesquisas na região, incluindo campanhas de sondagem, o que evidenciou um forte controle estrutural, associado ao fraturamento e falhas da rocha ligadas às mineralizações. Com base nesses e em outros dados, Reischl (1978) categorizou e nomeou as ocorrências minerais da área da seguinte forma:

- Mina da Barita: Um depósito lenticular de minério orientado NE-SW com inclinação de 50° para NW, contendo calcosina em bolsões irregulares associados a falhas. Suas reservas eram estimadas em 64.000 toneladas com 1,7% de Cu (sulfetado e oxidado), além de altos teores de prata (70 ppm) e barita como principal mineral de ganga.
- Mina João Dahne: Explorada em 1957 através de uma longa trincheira, apresentava baixo teor mineral, orientação NE-SW e mergulho íngreme.
- Mina do Morcego: Considerada inviável economicamente devido à alta proporção de minerais oxidados (70%), com calcosina e malaquita finamente dispersas na superfície, próximas a zonas de fratura em lavas andesíticas, com orientação N-S a NE-SW.
- Mina do Meio: Caracterizada por concentrações irregulares de malaquita controladas por fraturas em tufo andesítico, com direção N-S a NE-SW.

- Mina da Cruzeta: Apresentava calcosina em veios ao longo de fraturas (e raramente disseminada), com orientação NE-SW e NW-SE quase vertical, em lava andesítica porfírica.
- Mina Alcides: Consiste em bolsões de calcocitos finamente disseminados em lapili-tufo com ganga de barita, preenchendo falhas de direção N-S.

#### 4.5. Trabalhos Anteriores

Estudos prévios na área de interesse e a nível internacional demonstram a eficácia da prospecção geofísica e da descrição geológica, empregando-se os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida, na investigação de depósitos hidrotermais.

Irvine & Smith (1990), por exemplo, na Austrália, demonstraram que a alteração hidrotermal reduz significativamente a resistividade elétrica das rochas vulcânicas, devido à substituição de minerais primários por argilominerais e zeólitos. Zonas específicas de alteração podem ser identificadas por altas concentrações de sulfetos e argilominerais, resultando em valores elevados de cargabilidade.

Côrtes et al. (2016) identificaram uma zona sulfetada de baixa resistividade e alta cargabilidade no Capão Grande, Rio Grande do Sul, circundada por áreas de alta resistividade indicativas de silicificação, com sulfetos de cobre disseminados em *stockwork* e fraturas. Adicionalmente, uma zona de argilização foi inferida pela abundante ocorrência de carbonatos aflorantes.

Moreira et al. (2012) investigaram a Colônia de Santa Bárbara, Rio Grande do Sul, revelando contrastes de cargabilidade entre litotipos (1,8  $mV/V$  em metaconglomerados e andesitos; 70  $mV/V$  em tufos vulcânicos). As zonas mineralizadas apresentaram alta cargabilidade (70  $mV/V$ ) e baixa resistividade (1100  $ohms.m$ ), localizando-se em interseções de falhas, sugerindo sulfetos disseminados na área de tufos vulcânicos.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. Método da Eletrorresistividade

Os princípios físicos do método da eletrorresistividade descritos abaixo foram baseados nos livros de Orellana (1972), Telford et al. (1999) e Reynolds (2011). A eletrorresistividade é um método geofísico que investiga a subsuperfície por meio da estimativa da resistividade elétrica dos materiais geológicos quando uma corrente elétrica é introduzida em subsuperfície. Baseia-se no princípio de que as rochas e solos possuem propriedades elétricas distintas, as quais refletem suas características como alteração, fraturamento e saturação, o que permite identificar os diferentes tipos de litologias indiretamente. A corrente elétrica se propaga no meio geológico, principalmente pela movimentação de íons dissolvidos nos fluidos saturados dos poros. Fisicamente, a corrente elétrica se propaga de duas maneiras: condução eletrônica e condução iônica.

A condução eletrônica baseia-se no movimento dos elétrons. Em um material condutor metálico, os elétrons de valência estão fracamente ligados aos átomos e formam o que é frequentemente denominado "mar de elétrons" ou nuvem eletrônica. Quando uma diferença de potencial (tensão) é aplicada, esses elétrons livres adquirem um movimento ordenado. Fisicamente, como possuem carga negativa, os elétrons se deslocam do polo negativo (menor potencial) em direção ao polo positivo (maior potencial), o que constitui o sentido real da corrente. No entanto, por convenção adotada na análise de circuitos, considera-se o sentido da corrente, fluindo do polo positivo para o negativo (movimento hipotético de cargas positivas) (Halliday et al., 2012).

A condução iônica, por outro lado, depende do movimento de íons, que são átomos ou moléculas com carga elétrica. Este tipo de condução é predominante em eletrólitos (soluções salinas, ácidos e bases), em sais fundidos e em certos sólidos iônicos (eletrólitos sólidos). Na condução iônica, a aplicação de um campo elétrico gera um fluxo bidirecional de massa e carga: os íons positivos (cátions) movem-se no sentido do campo elétrico (do positivo para o negativo), enquanto os íons negativos (ânions) movem-se na direção oposta (do negativo para o positivo) (Halliday et al., 2012).

De acordo com a Lei de Ohm, a resistividade elétrica  $\rho$ , uma propriedade física intrínseca de cada material, expressa em *ohms.m* no Sistema Internacional de Unidades (SI), tem relação com a resistência  $R$  (*ohm*) de um condutor homogêneo cilíndrico (Figura 6), por meio da equação:

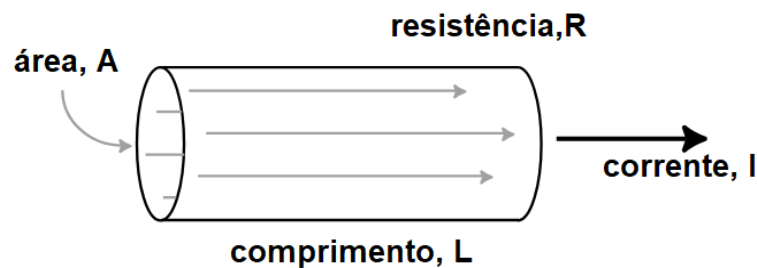
$$\rho = \frac{RA}{L}, \quad (1)$$

em que  $L$  (m) é o comprimento e  $A$  (m<sup>2</sup>) é a área da seção transversal do corpo.

A resistência  $R$ , de acordo com a primeira Lei de Ohm, é a razão entre a diferença de potencial ( $V$ ) em um condutor e a corrente elétrica ( $I$ ) que o atravessa,

$$R = \frac{V}{I}. \quad (2)$$

Figura 6 – Lei de Ohm para um condutor linear.



Fonte: adaptado de Everett (2013).

Para que ocorra a propagação do campo elétrico no meio físico, são utilizados um par de eletrodos de corrente (A e B) e um par de eletrodos de potencial (M e N). A corrente é injetada no solo em A e B e realizam-se as medidas de diferença de potencial (ddp) em M e N (Orellana, 1972). Ao considerar um modelo de subsuperfície homogêneo e isotrópico, o potencial elétrico diminui radialmente conforme a distância da fonte (eletrodos de corrente A e B), de modo a constituir superfícies semiesféricas concêntricas com o mesmo valor de potencial (Figura 7). As linhas de fluxo de carga elétrica são estabelecidas em direções perpendiculares às superfícies equipotenciais, no sentido do maior para o menor potencial elétrico.

O potencial medido para determinada posição de um dos eletrodos MN, pode ser expresso por:

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3)$$

em que  $r_1$  e  $r_2$  são as distâncias do ponto aos eletrodos, respectivamente. Para um arranjo com eletrodos de corrente A e B, os potenciais nos pontos M e N são dados por

$$V_m = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (4)$$

e

$$V_n = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right). \quad (5)$$

A diferença de potencial  $\Delta V$  é dada por

$$\Delta V = V_m - V_n = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (6)$$

A equação (6) pode ser reescrita em função da resistividade, propriedade física intrínseca das rochas,

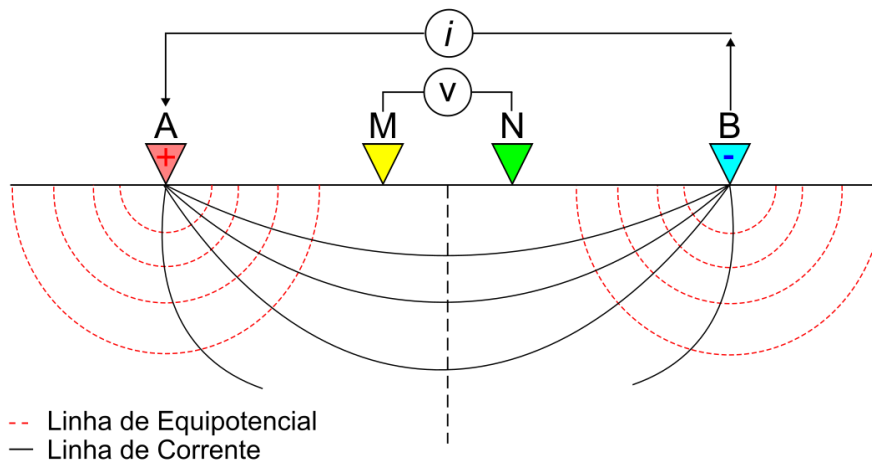
$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (7)$$

em que

$$K = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}, \quad (8)$$

denominado de fator geométrico, definido de acordo com a geometria do arranjo de eletrodos.

Figura 7 – Esquema de aquisição do método de eletrorresistividade.



Fonte: Adaptado de Kearey et al. (2013).

A resistividade obtida a partir da equação (7) assume que a Terra é homogênea e isotrópica, ou seja, têm valor constante. Porém, na prática, o meio geológico é caracterizado por diversas camadas, com variação de suas propriedades físicas. Essa propriedade não representa a resistividade real de um único material, mas sim um valor médio ou equivalente da resistividade de todas as camadas de solo e rocha que contribuem para a medição. Assim, a resistividade medida representa um valor aparente  $\rho_a$ , expressa por

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}. \quad (9)$$

## 5.2. Método da Polarização Induzida

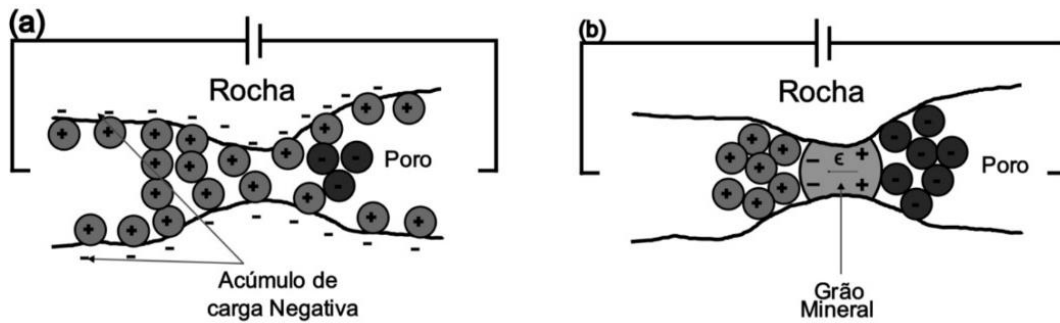
Os princípios físicos do método da polarização induzida descritos abaixo foram baseados nos livros de Orellana (1972), Telford et al. (1999) e Reynolds (2011). O método de polarização induzida baseia-se na medição das variações de voltagem em função do tempo ou da frequência. Este método mede a voltagem residual ou cargabilidade que decai alguns segundos após o desligamento da corrente, fornecendo informações sobre a presença e a distribuição dos materiais no subsolo (Kearey et al., 2013). O terreno age como um capacitor armazenando carga elétrica, tornando-se eletricamente polarizado (Lowrie, 2007). O mesmo fenômeno ocorre quando a corrente é ligada e, após um repentino aumento inicial da voltagem, esta aumenta gradualmente durante um intervalo de tempo discreto até um valor estável.

A IP pode ser observada nos domínios do tempo e da frequência. Um fenômeno complexo que se assemelha à descarga de um capacitor no domínio do tempo ou à variação de impedância de uma corrente alternada no domínio da frequência (Lowrie, 2007). Os fenômenos físico-químicos que poderiam explicar a polarização induzida são muito complexos. A maior parte dos autores concordam em distinguir duas origens possíveis para a polarização induzida: polarização de membrana e polarização de eletrodo.

O fenômeno da polarização de membrana (Figura 8a) ocorre em rochas carentes de substâncias metálicas, por consequência da diferença de mobilidade entre os ânions e cátions, produzida pela presença de minerais de argila. Tais minerais carregam-se negativamente, atraindo uma "nuvem catiônica", que permite a passagem dos portadores positivos, mas não dos negativos (Orellana, 1972), exercendo o efeito de uma membrana semipermeável.

O fenômeno da polarização de eletrodo (Figura 8b) ocorre nos limites de um corpo ou partícula metálica submetida a uma corrente elétrica. A passagem da condução iônica para a eletrônica, e vice-versa, resulta no fato de que em duas superfícies opostas do corpo são produzidas concentrações de íons, não cedendo suas cargas ao corpo (Orellana, 1972). Cortando-se a corrente, esta distribuição de íons se modifica e volta a seu estado inicial levando, para isto, um certo tempo, durante o qual existe uma polarização no corpo, atribuída aos efeitos observados (Kearey et al., 2013). A IP é mais intensa no fenômeno da polarização de eletrodo, associada a metais disseminados nos poros das rochas, tornando-o um método apropriado para pesquisa mineral.

Figura 8 – Polarização de Membrana em (a) e polarização de eletrodo em (b).



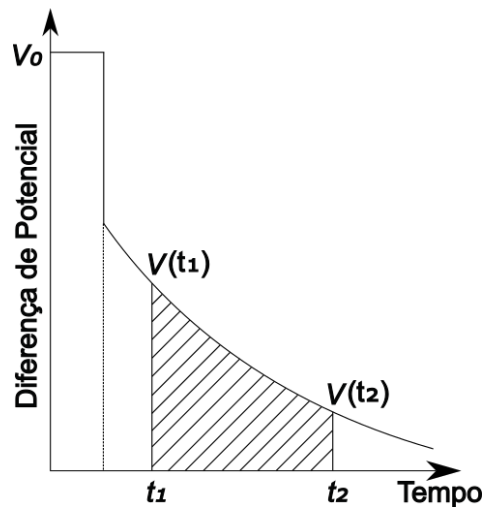
Fonte: adaptado de Kearey et al. (2013).

A medição da cargabilidade pode ser realizada tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo pode ser obtida a partir da área do gráfico de decaimento da voltagem em relação ao tempo, alguns segundos após a corrente ser desligada (Figura 9). A voltagem inicial  $V_0$  é registrada, enquanto a corrente está ligada, e comparada com o decaimento residual da voltagem  $V(t)$  após ser desligada. Registrando-se as voltagens ao longo do tempo é gerado um gráfico de decaimento em função do tempo. A área deste gráfico, no intervalo de tempo definido entre  $t_1$  e  $t_2$ , é chamada de cargabilidade  $M$ , expressa por

$$M_{t_1 t_2} = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt, \quad (10)$$

em que  $M$  é a cargabilidade, com unidades de medida em %, milissegundos ( $ms$ ) e mais comumente em  $mV/V$ .

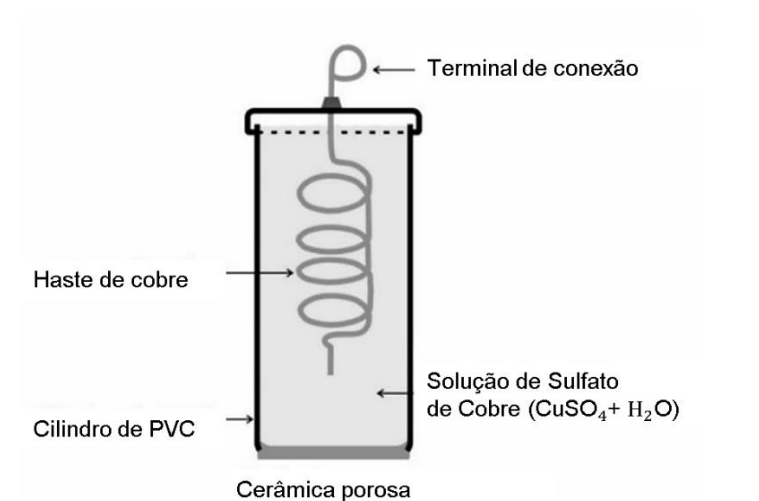
Figura 9 – O fenômeno de polarização induzida, com decaimento do potencial após desligamento da corrente.



Fonte: adaptado de Kearey et al. (2013).

Na aquisição de IP no domínio do tempo, empregam-se eletrodos porosos, os quais são não polarizáveis e, dessa forma, minimizam o efeito de polarização eletrodo-solo. Cada eletrodo poroso é composto por um cilindro de PVC cuja base é constituída por cerâmica porosa, através da qual a solução de sulfato de cobre infiltra gradualmente até atingir o solo (Fachin et al., 2010). A solução tem o objetivo de reduzir a resistência de contato, minimizando a geração de correntes parasíticas (Eddy Current) geradas por eletrodos metálicos. Uma haste de cobre é conectada internamente à tampa, permitindo o contato com a solução de  $\text{CuSO}_4$ , enquanto um terminal externo é acoplado para conexão ao cabo de potencial (Figura 10).

Figura 10 - Representação de um Eletrodo Poroso.

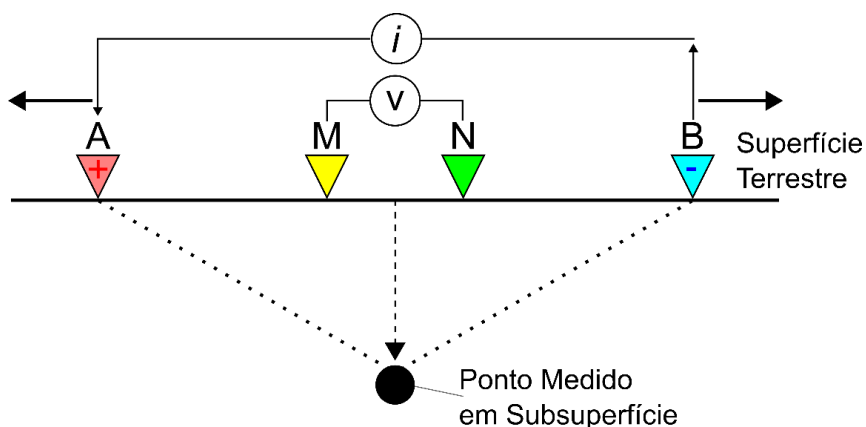


Fonte: Adaptado de França (2015).

### 5.3. Técnicas de Investigação e Arranjo de Eletrodos

As principais técnicas empregadas nos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida são a sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). A SEV é uma técnica de investigação voltada para medições pontuais da variação vertical das propriedades elétricas da região, realizadas a partir de um ponto fixo localizado no ponto médio entre os eletrodos (Figura 11). As medidas são realizadas com o afastamento progressivo dos eletrodos. A profundidade aumenta com a abertura dos eletrodos de corrente, deslocados simetricamente em relação a um ponto central.

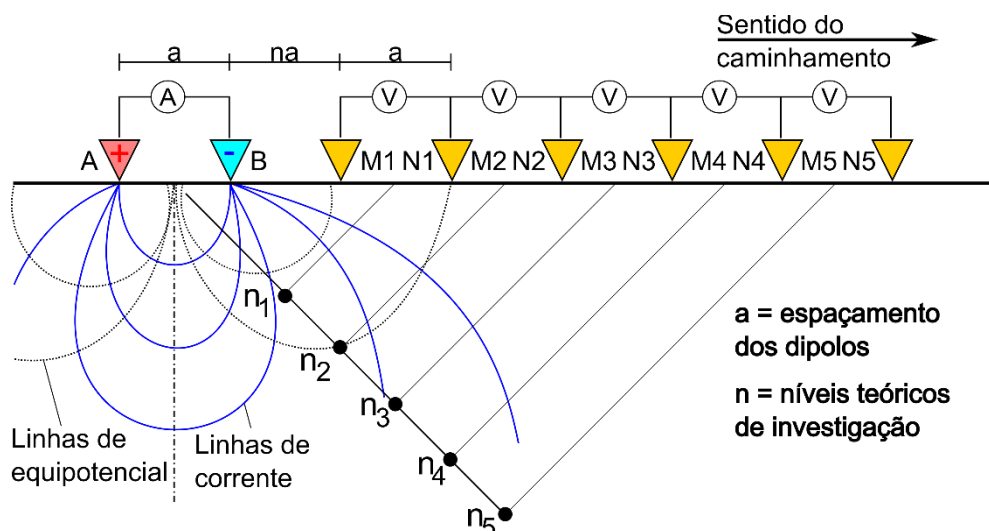
Figura 11 – Esquema de Aquisição de uma Sondagem Elétrica Vertical.



Fonte: Adaptado de Braga (2006).

O CE é uma técnica que investiga as variações horizontais de um parâmetro físico (resistividade e/ou cargabilidade), a uma ou várias profundidades por meio de medições efetuadas na superfície do terreno (Figura 12). As medidas são realizadas com o deslocamento lateral dos eletrodos. Os resultados obtidos são apresentados na forma de uma pseudo-seção, mostrando suas variações laterais e verticais.

Figura 12 – Esquema de Aquisição do Caminhamento Elétrico.



Fonte: Adaptado de Braga (2006).

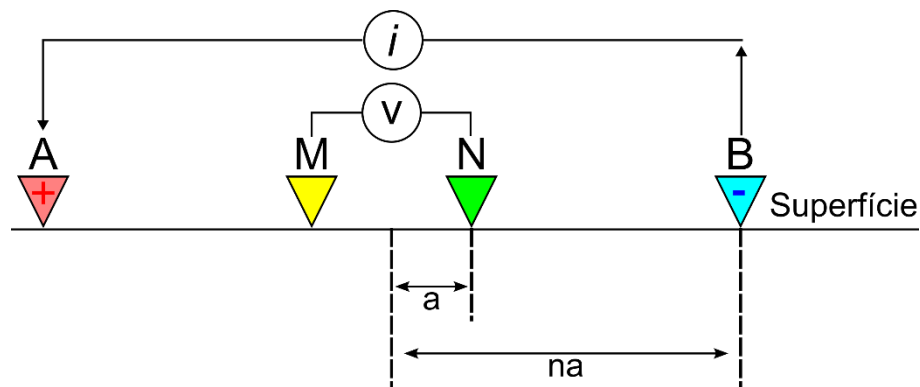
Diversas configurações de arranjos de eletrodos podem ser utilizadas em pesquisa de campo, principalmente os arranjos Wenner, Schlumberger, polo-dipolo (Reynolds, 2011). Neste trabalho, foi empregado o arranjo Schlumberger, configurado por 4 eletrodos colineares, com aumento progressivo da distância entre os eletrodos de potencial e eletrodos de corrente, aumentando a profundidade de investigação. Este arranjo foi escolhido devido a sua praticidade de execução, boa profundidade de investigação teórica, maior sensibilidade a corpos horizontais e baixo erro amostral devido sua configuração em campo (Reynolds, 2011).

O arranjo Schlumberger (Figura 13) foi projetado principalmente para sondagem, ou seja, para determinar o perfil de profundidade da resistividade da subsuperfície abaixo de um único local. Neste arranjo os eletrodos de potencial são mantidos fixos na porção central com separação  $2a$ . As medidas são realizadas conforme AB aumenta, no ponto central do arranjo. O fator geométrico para este arranjo é dado por:

$$K = \frac{(n - 1)(n + 1)\pi a}{2}. \quad (11)$$

A resistividade aparente,  $\rho_a$ , para este arranjo é calculada substituindo  $K$  na equação 9.

Figura 13 – Arranjo Schlumberger.



Fonte: Adaptado de Reynolds (2011).

#### 5.4. Propriedades Físicas dos Minerais e Rochas

Nos métodos geofísicos são medidos a resistividade aparente  $\rho_a$ , na eletrorresistividade, e a cargabilidade  $M$ , na polarização induzida. Segundo Orellana (1972), a resistividade dos materiais geológicos é uma propriedade física que varia amplamente (Tabela 1) devido a uma complexa interação de fatores, principalmente a saturação e salinidade da água, porosidade, formação e fraturação da rocha, assim como sua composição mineralógica, presença de minerais condutores (minerais metálicos) e de minerais argilosos. Outros fatores como temperatura, em geral, diminuem a resistividade dos materiais geológicos com seu aumento, enquanto, a pressão e compactação aumentam proporcionalmente a resistividade. A presença de contaminantes altera a salinidade da água no solo ou rocha, impactando diretamente sua resistividade.

A cargabilidade é um parâmetro físico medido nos métodos geoeletricos da Polarização Induzida, representando a capacidade de um material geológico de se polarizar quando uma corrente elétrica é aplicada e depois interrompida. A polarização pode ser de natureza metálica

(eletrônica), ocorrendo em minerais condutores, ou de membrana (iônica), associada à presença de minerais de argila, o que a torna útil para diferenciar litologias (Tabela 2), como argilas de areias, e na prospecção de minérios e estudos ambientais.

Tabela 1 - Resistividade de Rochas e Minerais.

Resistividades elétricas ( <i>ohms. m</i> )			
Rochas e sedimentos		Minérios	
Calcário	$10^{12}$	Pirrotita	$10^{-5}-10^{-3}$
Quartzo	$10^{10}$	Calcopirita	$10^{-4}-10^{-1}$
Halita	$10^6-10^9$	Xistos grafitos	$10^{-3}-10^{-1}$
Granito	$500-10^6$	Pirita	$10^{-4}-10^1$
Arenitos	35-4000	Magnetita	$10^{-2}-10^{-1}$
Moraina	8-4000	Hematita	$10^{-1}-10^2$
Calcários	120-400	Galena	$10^{-2}-300$
Argilas	1-120	Cobre	$10^{-8}$

Fonte: adaptado de Parasnis (2012).

Tabela 2 - Cargabilidade de Litologias.

Cargabilidade ( $mV/V$ )	
Tipo Litológico/Material	Cargabilidade ( $mV/V$ )
Zona Não Saturada	0,4 a 23,4
Sedimentos Argilosos	1,5 a 1,9
Sedimentos Argilo-Arenosos	7,1 a 45,5
Sedimentos Siltosos	Alta polarização
Areias Puras / Areia Quartzosa Pura	Quase nenhum efeito IP
Camadas Arenosas	0,1
Sedimentos Silte-Arenosos	0,1 a 5,8
Argilito	0,1 a 1,9
Arenito	0,1 a 5,8
Basalto/Diabásio	20,0 a 30,0
Granito/Gnaiss	10,0 a 20,0
Aquíferos/Argilas com Águas Salgadas	Pequenos efeitos IP

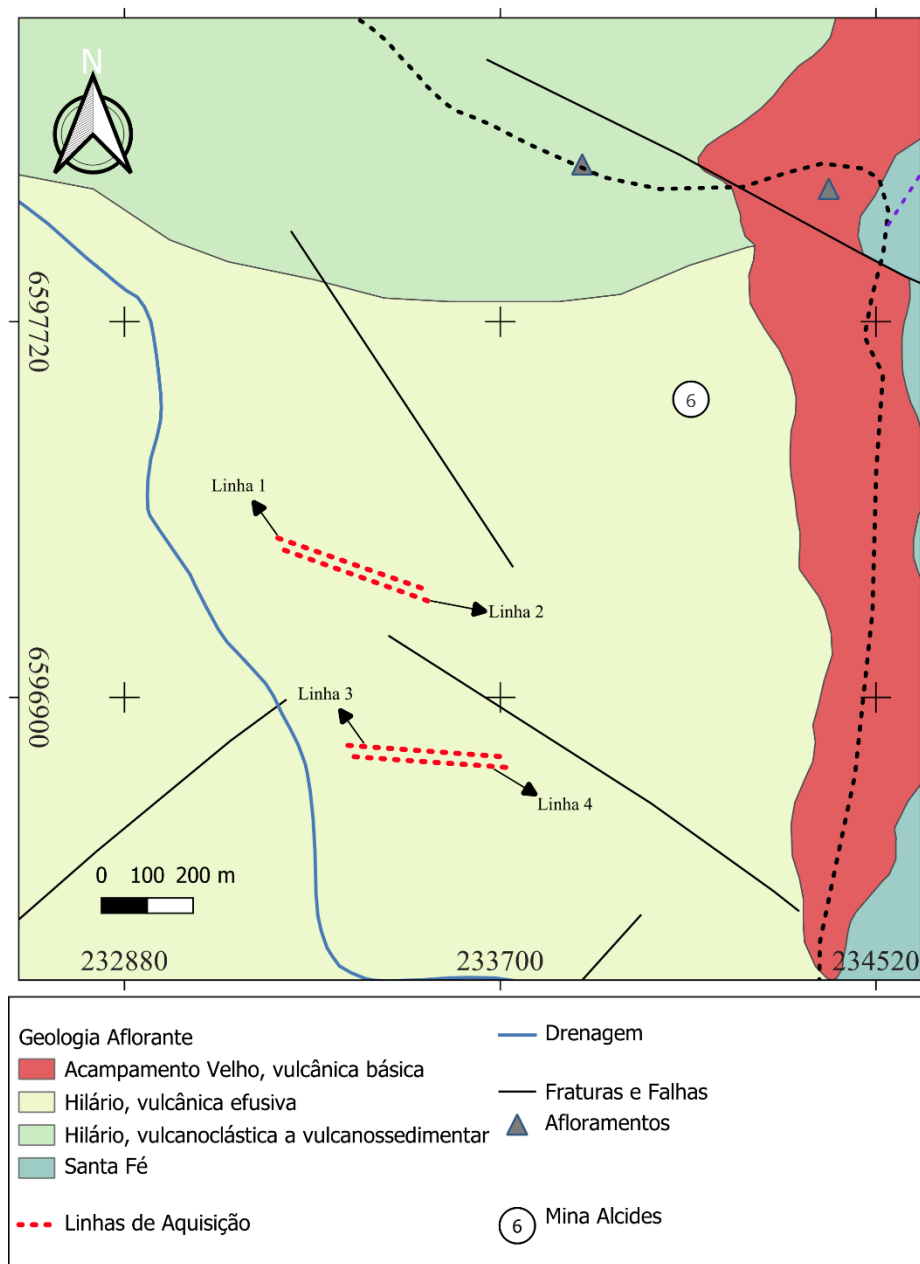
Fonte: Adaptado de Braga (2006).

## 6. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

### 6.1. Aquisição de Dados

O levantamento geofísico consistiu na realização de leituras de resistividade elétrica e cargabilidade com o uso da técnica de caminhamento elétrico e arranjo Schlumberger, em quatro linhas de investigação, com comprimento individual de 360 metros dispostas paralelamente (Figura 14).

Figura 14 – Mapa de Localização das Linhas de Aquisição, numeradas em ordem de aquisição.

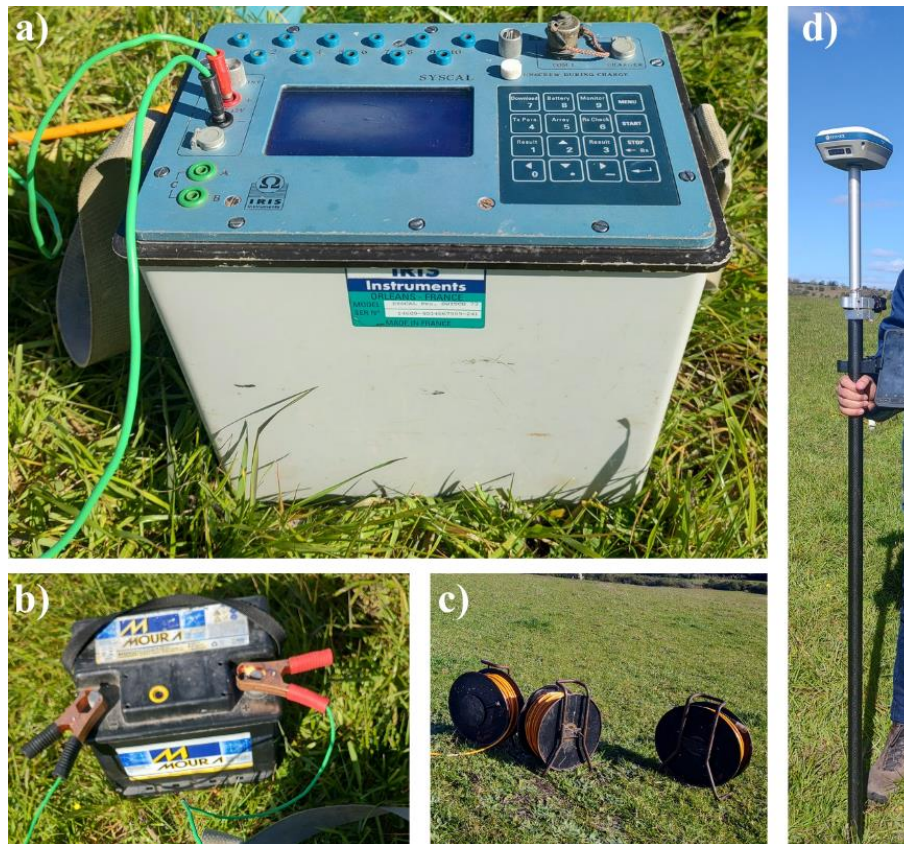


Fonte: Adaptado de Cruz (2022).

As leituras foram realizadas em perfis com sentido aproximadamente E-W com o objetivo de cruzar perpendicularmente o lineamento estrutural das minas (N-S). O equipamento geofísico utilizado para realizar as medições foi o resistímetro Syscal Pro (Figura 15a), fabricado pela IRIS Instruments (França), constituído de um módulo único de transmissão e recepção de sinais automatizados a partir de programação prévia, com potência de 250 W, resolução de 1  $\mu$ V e corrente máxima de 2,5 A. O equipamento permite a realização de ensaios de potencial espontâneo (SP), eletrorresistividade (ER) e polarização induzida (IP) por meio de ciclos periódicos de transmissão e recepção de sinais.

Outros equipamentos auxiliares foram utilizados como bateria externa de 12V (Figura 15b) para alimentação do sistema, cabo multicanal com espaçamento de 5 m (Figura 15c) com “jacarezinho” para a conexão entre os eletrodos e os cabos conectados no Syscal, e GPS (Figura 15d) para medição das coordenadas e topografia. O resistímetro Syscal e os demais materiais utilizados na aquisição de dados pertencem ao Laboratório de Equipamentos Geofísicos (LEG) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), cedidos para realização do levantamento.

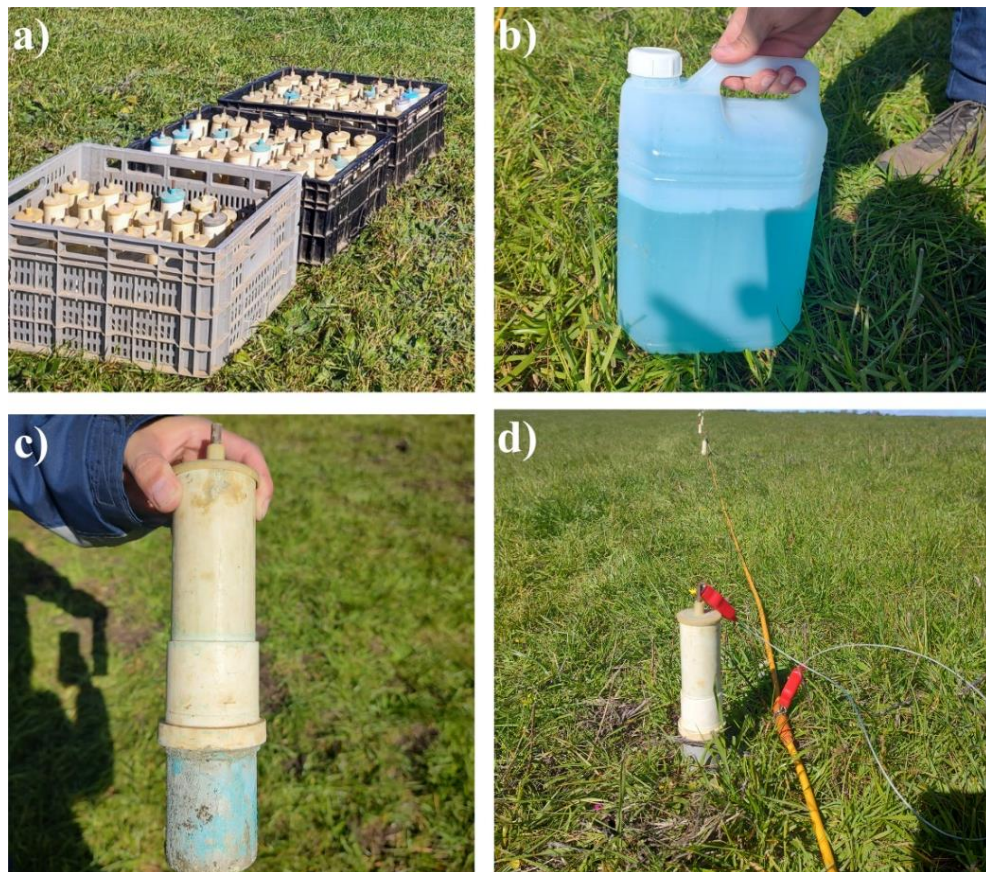
Figura 15 – Equipamentos para Aquisição de dados. a) resistímetro Syscal Pro, b) bateria 12V, c) bobinas de cabo multicanal, d) GPS.



Fonte: Autor.

Para cada linha foram utilizados 72 eletrodos não polarizáveis (Figura 16a) preenchidos por solução de sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ) (Figura 16b), dispostos com espaçamento de 5 metros. Os eletrodos são confeccionados de cano PVC e base porosa que permite trânsito da solução no solo. Na parte superior apresentam haste de cobre (Figura 16c) permitindo a conexão com o cabo multicanal (Figura 16d).

Figura 16 – Materiais para Aquisição de dados. a) caixas com 72 eletrodos não polarizáveis, b) solução de  $CuSO_4$ , c) zoom nos eletrodos não polarizáveis e d) conexão dos eletrodos ao cabo multicanal.



Fonte: Autor.

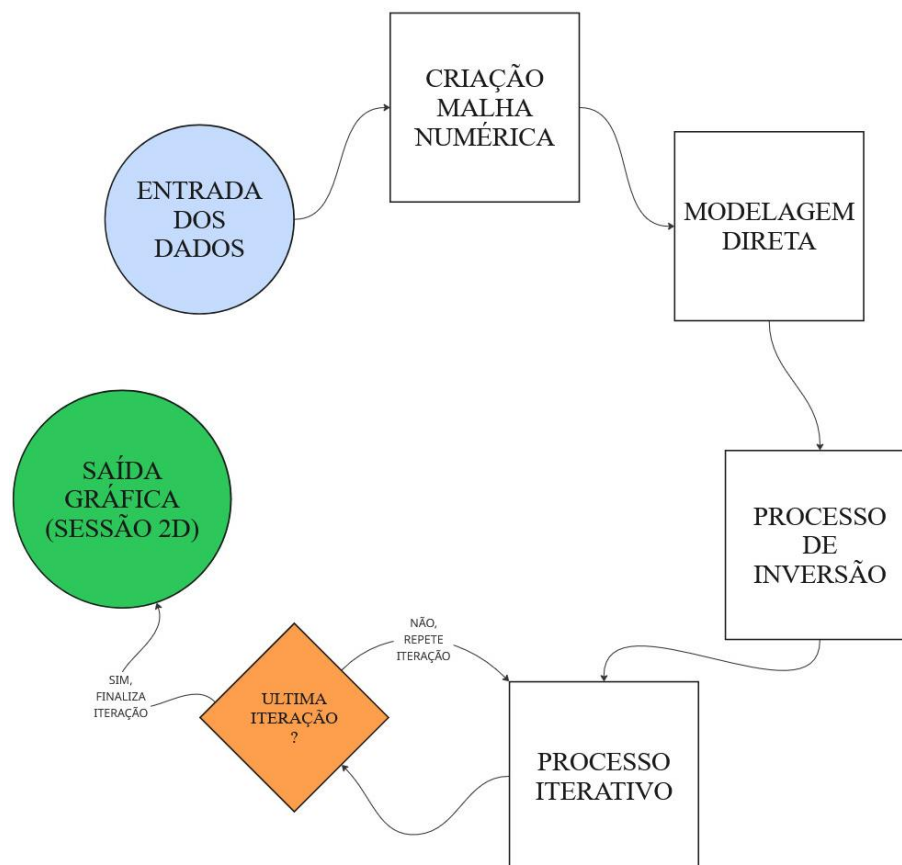
## 6.2. Processamento de Dados

A descrição das etapas de processamento e inversão dos dados foram baseadas de acordo com o manual do *Software Res2DInv* (Seequent, 2025). Os dados obtidos em campo foram processados utilizando o software *Res2DInv* produzido pela empresa Geotomo. O programa foi desenvolvido para processamento e inversão de dados de resistividade elétrica e polarização induzida adquiridos em levantamentos geofísicos de superfície, para a geração de um modelo bidimensional (2D) da subsuperfície. O *Res2DInv* é uma ferramenta simples, reconhecida pela sua robustez, capacidade de lidar com diferentes geometrias de eletrodos, pela inclusão de

topografia real e por sua interface gráfica intuitiva, que facilita a análise e apresentação dos resultados. O processamento segue as etapas exemplificadas no fluxograma (Figura 17).

O processamento inicia com a entrada das medidas adquiridas em campo. Esses dados são os valores de resistividade e/ou cargabilidade aparentes, dispostos em pseudo-seções (Figura 18). Além dos dados, o usuário informa a geometria da disposição dos eletrodos (Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo) e, caso disponível, a topografia do terreno. Com essas informações, o software constrói uma malha numérica bidimensional que representa o terreno, dividida em células retangulares, cada uma com um valor inicial de resistividade e de cargabilidade, assumido como homogêneo (Loke et al., 2003).

Figura 17 – Fluxograma do Processamento de Dados.



Fonte: Autor.

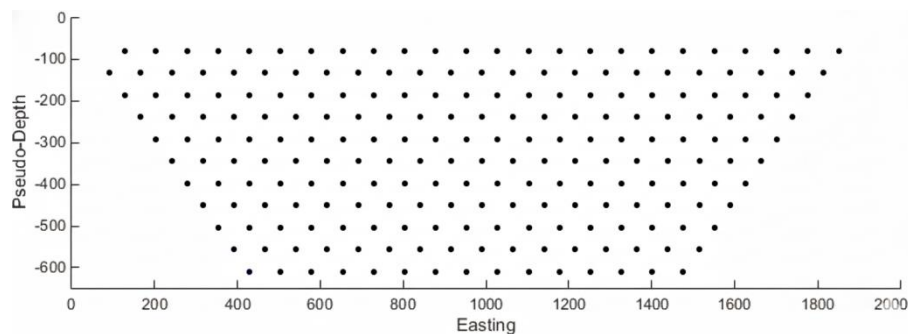
Em seguida, o Res2DInv realiza a modelagem direta (*forward modeling*), que consiste em calcular a resposta elétrica teórica que esse modelo inicial produziria na subsuperfície, utilizando a equação de Poisson para condução elétrica no meio terrestre. Esse passo permite comparação entre os dados sintéticos com os dados reais medidos no campo.

Com base nessa comparação, o *software* entra na etapa de inversão propriamente dita. O Res2DInv utiliza um processo iterativo baseado em algoritmos de otimização, geralmente

métodos de mínimos quadrados regularizados, para ajustar os valores de resistividade e cargabilidade das células do modelo (Loke et al. 2003). A cada iteração, recalcula-se a resposta teórica do novo modelo e a compara com os dados observados, minimizando progressivamente a diferença entre os dados observados e calculados. Esse ajuste considera regularizadores de suavidade e continuidade lateral, o que garante que o modelo final seja geologicamente consistente e não apenas matematicamente compatível com os dados.

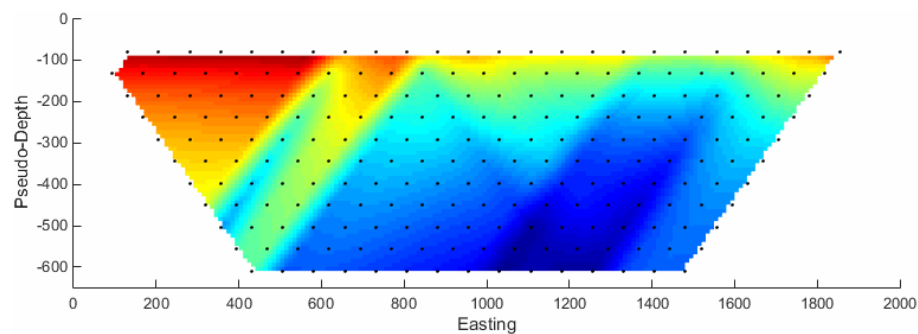
O resultado do processo é um modelo 2D (Figura 19) que mostra, em forma de mapa de cores, a distribuição estimada da resistividade elétrica e/ou da cargabilidade da subsuperfície, permitindo identificar contrastes entre materiais geológicos, zonas condutivas (como presença de água ou argilas) ou áreas com maior capacidade de polarização (como zonas mineralizadas ou com maior conteúdo de argilas).

Figura 18 – Pseudo-seções com distribuição espacial dos pontos medidos.



Fonte: Adaptada de GeoSci.

Figura 19 – Seção 2D.



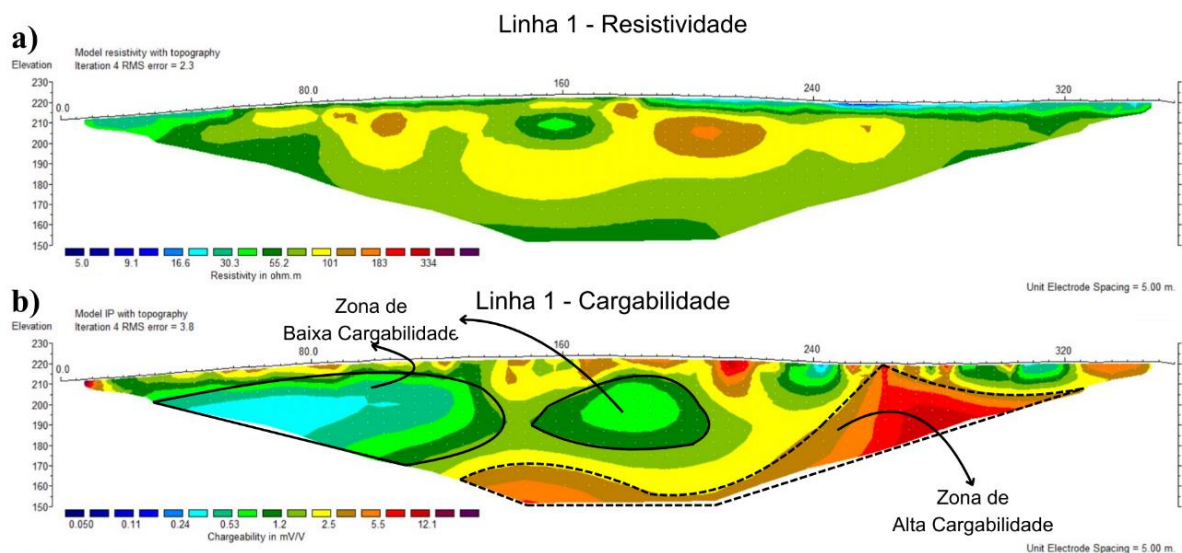
Fonte: Adaptada de GeoSci.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1. Seções 2D

As seções apresentam o modelo de inversão de resistividade e cargabilidade, utilizando a técnica de caminhamento elétrico e arranjo Schlumberger (Figuras 20-23). A profundidade máxima real alcançada foi em torno de 70 metros em sua porção central. O resultado da Linha 1 (Figura 20a) mostra resistividade com pouca variação, em torno de 80 *ohm.m*. O resultado de cargabilidade (Figura 20b) indica duas Zonas de baixa cargabilidade (<1,2 *mV/V*) superficiais, no início e no meio da seção. Adicionalmente, observa-se uma zona de alta cargabilidade (>5,5 *mV/V*– 12*mV/V*) em profundidade na porção de 140 m das linhas com ascensão a superfície e continuidade lateral até a marca de 320 m.

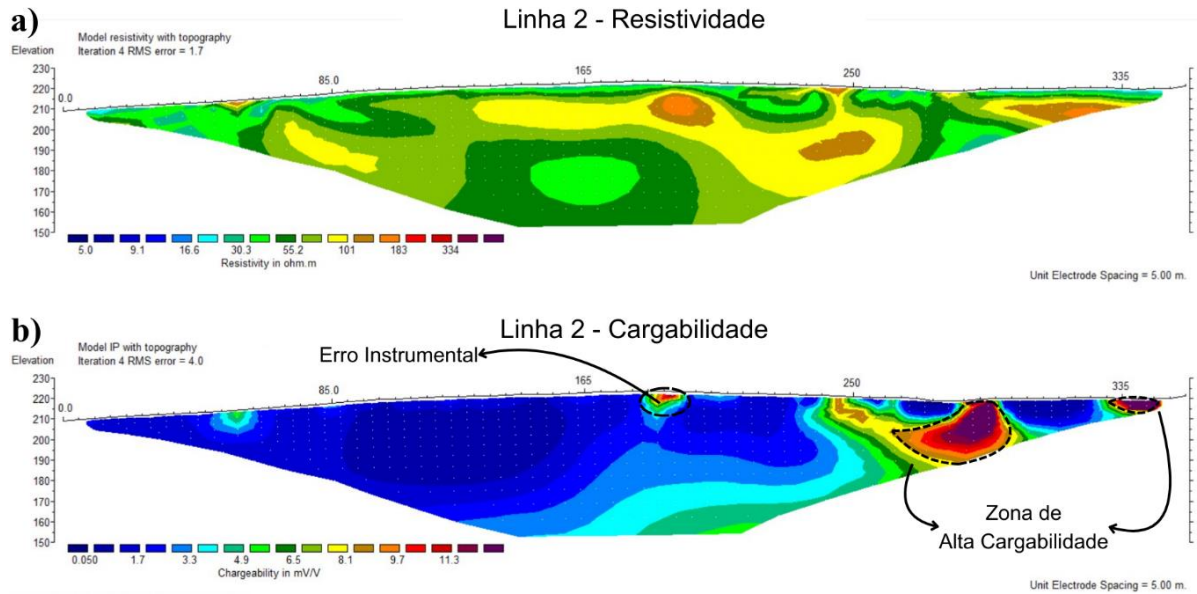
Figura 20 – Linha 1 de Resistividade e Cargabilidade.



Fonte: Autor.

Na Linha 2 (Figura 21a), assim como na Linha 1, observam-se valores de baixa resistividade em torno de 80 *ohms.m*. Na seção de cargabilidade (Figura 21b) é ressaltada regiões de alta cargabilidade (>11,3 *mV/V*) presentes no final da linha de levantamento. Próximo à superfície foi possível identificar uma região de alta cargabilidade caracterizada como erro instrumental.

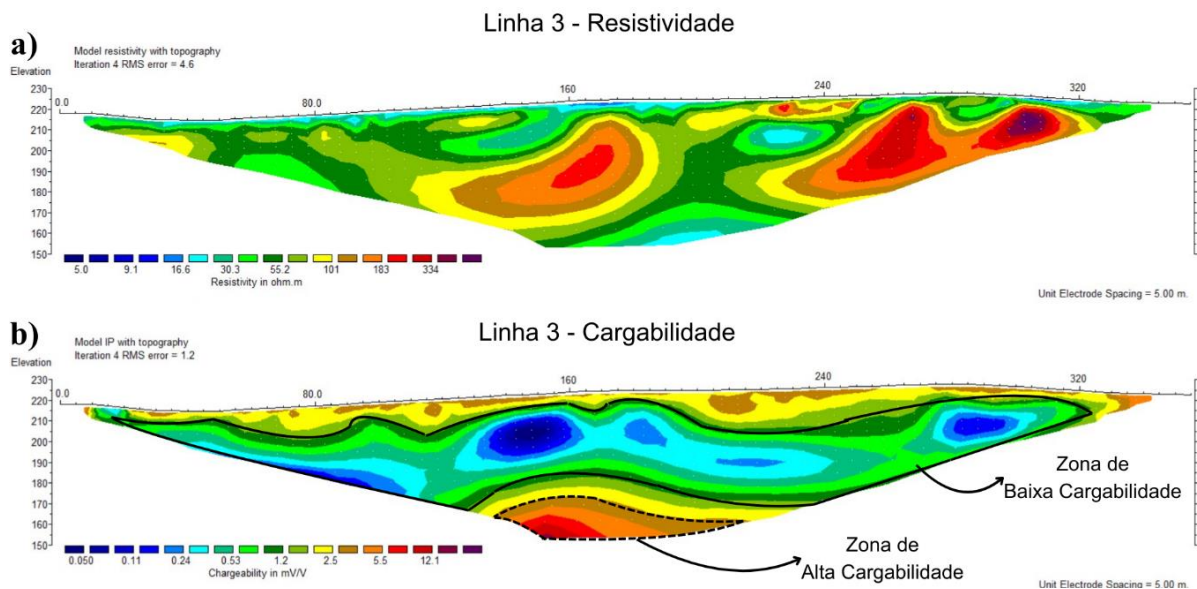
Figura 21 – Linha 2 de Resistividade e Cargabilidade.



Fonte: Autor.

A Linha 3 (Figura 22a) apresenta a maior variação de resistividade com três núcleos resistivos (300 *ohms.m*). Com a cargabilidade (Figura 22b), foi possível demarcar uma faixa de baixo valor ( $<1,2 \text{ mV/V}$ ) que se estende por toda a linha seguida por uma região de alta cargabilidade ( $>7,7 \text{ mV/V}$ ) em profundidade no centro da linha de aquisição.

Figura 22 – Linha 3 de Resistividade e Cargabilidade.

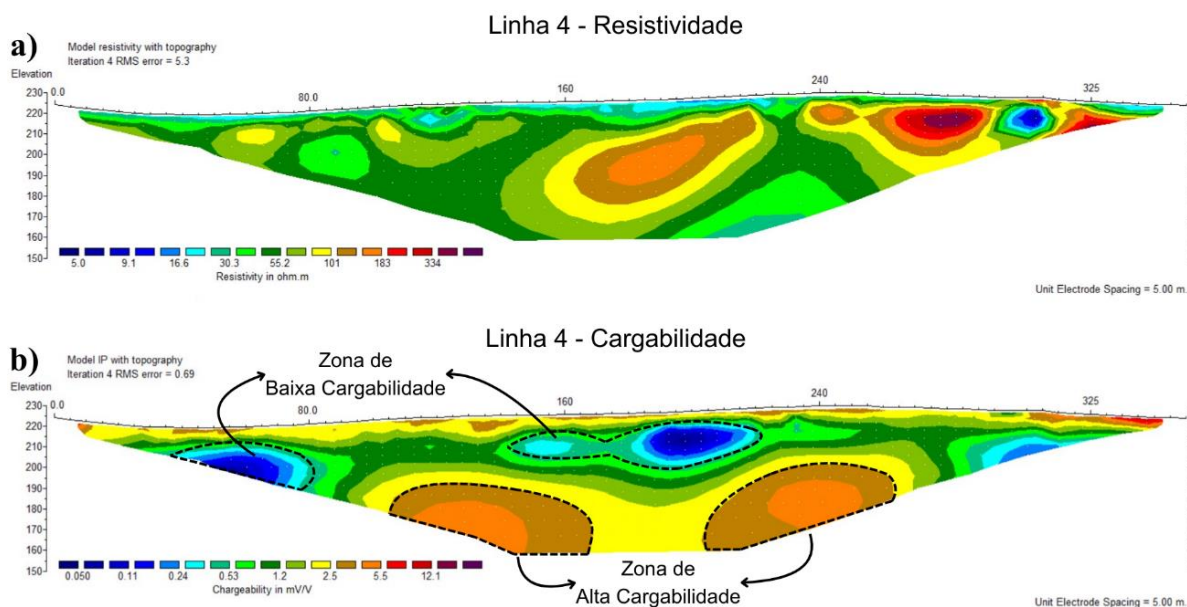


Fonte: Autor.

A linha 4 (Figura 23a) apresentam baixos valores de resistividade. Na seção de cargabilidade (Figura 23b), foram identificadas duas áreas de baixa cargabilidade ( $>0,5 \text{ mV/V}$ )

superficiais no começo da linha, de 35 a 80 metros, e outra mais central de 140 a 220 metros. Ademais, foram identificadas duas zonas de alta cargabilidade ( $<5,5 \text{ mV/V}$ ) em profundidade.

Figura 23 – Linha 4 de Resistividade e Cargabilidade.



Fonte: Autor.

As seções de resistividade mostraram baixos valores em todas as Linhas ( $<350 \text{ ohms.m}$ ) indicando alto grau de alteração das rochas e/ou saturação por água. Conseqüentemente, os valores de cargabilidade se tornam ainda mais importantes para identificação das áreas com potencial mineralização de cobre. No processamento de dados o número de interações realizadas foram quatro e o erro RMS (Raiz do Erro Quadrático), desassuste entre os dados calculados e observados, foi em torno de 5%, demonstrando um ajuste satisfatório.

Os resultados estão coerentes com as informações geológicas disponíveis na literatura, os quais demonstraram baixos valores de resistividade, e alta cargabilidade, em profundidade, resultado de processos hidrotermais no sistema. A mineralização de cobre na região, segundo Richer (1973) e Lopes (2013), é decorrente da interação entre os fluidos quentes e os diques de diabásio, precipitando os sulfetos nos poros da rocha. Trabalhos em regiões com geologia análoga obtiveram resultados similares como em Irvine & Smith (1990), Allis (1990), Moreira et al. (2012) e Côrtes et al. (2016). A interpretação dos resultados obtidos (Figuras 20-23) indicam uma clara correlação entre os parâmetros físicos (cargabilidade e resistividade) e a ocorrência de zonas sulfetadas e alterações hidrotermais, coerente com a literatura regional e de geologia análoga.

## 8. CONCLUSÃO

Os estudos geoeletricos de eletroresistividade e polarização induzida aplicados na Mina Alcides demonstraram ser uma ferramenta eficaz na prospecção mineral de cobre, fornecendo dados que se alinham de forma consistente com a literatura disponível. A interpretação dos resultados geoeletricos obtidos neste trabalho revelou características que são típicas de zonas mineralizadas e de alteração hidrotermal.

As seções de resistividade em todas as linhas apresentaram valores consistentemente baixos (em torno de 80 *ohms. m* nas Linhas 1 e 2, e no geral < 350 *ohms. m*). Esse baixo valor de resistividade é um indicativo de alto grau de alteração das rochas e/ou saturação por água, comportamento descrito em outros estudos, nos quais a alteração hidrotermal causou uma redução significativa na resistividade elétrica.

Zonas de alta cargabilidade foram identificadas em profundidade em todas as linhas (Linha 1 com > 5,5 *mV/V*- 12 *mV/V*, Linha 2 com > 11,3 *mV/V*, Linha 3 com > 7,7 *mV/V*). A alta cargabilidade indica a presença de material capaz de armazenar carga elétrica, um forte indício da presença de minerais metálicos disseminados, como os sulfetos.

Em síntese, a interpretação dos dados demonstra ser consistente com a literatura prévia regional e de regiões similares, especialmente no que tange à correlação entre os parâmetros físicos de cargabilidade e resistividade com a presença de zonas sulfetadas e outras alterações hidrotermais. Os resultados evidenciaram regiões de possível interesse econômico, podendo guiar furos de sondagens em expedições geofísicas futuras.

Para trabalhos futuros na região, recomenda-se aquisições com maiores profundidades de investigação, alcançando no mínimo 100 metros de profundidade, devido os resultados demonstrarem que as principais anomalias de alta cargabilidade ocorrem a partir de 50 metros. Ademais, recomenda-se aumentar a densidade de pontos e o número de linhas de aquisição, a fim de possibilitar a construção de modelos 2.5D, capazes de delimitar o corpo mineralizado.

## REFERÊNCIAS

ALLIS, R. G. Geophysical anomalies over epithermal systems. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 36, n. 1–3, p. 339–374, fev. 1990.

ALMEIDA, Delia del Pilar Montecinos de; CHEMALE, Farid; MACHADO, Adriane. Late to Post-Orogenic Brasiliano-Pan-African Volcano-Sedimentary Basins in the Dom Feliciano Belt, Southernmost Brazil. In: **Petrology New Perspectives and Applications**. London, UK, 2012. p. 73–105.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; HASUI, Yociteru; BRITO NEVES, Benjamim Bley de; FUCK, Reinhardt. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, abr. 1981.

BETTENCOURT, Jorge Silva. **Mina de Cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul**. 1972. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-06072015-100922/>. Acesso em: 01 jul. 2025.

BICCA, Marcos Müller; CHEMALE JUNIOR, Farid; JELINEK, Andrea Ritter; OLIVEIRA, Christie Helouise Engelmann de. Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 48, p. 173–192, dez. 2013.

BORBA, André W. et al. U–Pb zircon and <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. **Basin Research**, v. 20, n. 3, p. 359–375, 28 ago. 2008.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzidas aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. ii, 121 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/116123>. Acesso em: 26 nov. 2025.

CHEMALE JR, Farid. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. **Geologia do Rio Grande do Sul**, p. 13-52, 2000.

CÔRTEZ, Ariane R. P.; MOREIRA, César A.; VELOSO, Dimitri I. K.; VIEIRA, Leandro B.; BERGONZONI, Flavio Anauate. Geoelectrical prospecting for a copper-sulfide mineralization in the Camaquã sedimentary basin, Southern Brazil. **Geofísica Internacional**, v. 55, n. 3, p. 257-268, 1 jul. 2016.

CRUZ, Rodrigo Fabiano da. **Escudo Sul-Rio-Grandense: geologia e recursos minerais da folha Lavras do Sul - SH.22-Y-A-IV**. [S. l.]: Serviço Geológico do Brasil, 2022. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18740>. Acesso em: 28 nov. 2025.

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

FACHIN, Sergio Jr. S. et al. Eletrodos não-polarizáveis de Pb-PbCl<sub>2</sub>: construção e o uso em levantamentos de potencial espontâneo (PE). In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA**, 4., 2010, Brasília. Anais [...]. Brasília, DF: SBGf, 2010

FRAGOSO CESAR, Antonio Romalino Santos; FAMBRINI, Gelson Luis; ALMEIDA, Renato Paes de; PELOSI, Ana Paula Meireles Reis; JANIKIAN, Liliane; RICCOMINI, Claudio; MACHADO, Romulo; NOGUEIRA, Afonso Cesar Rodrigues; SAES, Gerson Souza. THE CAMAQUÃ EXTENSIONAL BASIN: NEOPROTEROZOIC TO EARLY CAMBRIAN SEQUENCES IN SOUTHERNMOST BRAZIL. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 442-445, 1 set. 2000.

França (2015). **Caracterização Geométrica de Zonas Mineralizadas Próximo ao Município de Poconé-MT**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências, IG/UnB, 71p.

GASTAL, Maria do Carmo; FERREIRA, Francisco Jose Fonseca; CUNHA, Jefferson Ulisses da; ESMERIS, Camila; KOESTER, Edinei; RAPOSO, Maria Irene Bartolomeu; ROSSETTI, Marcos de Magalhães May. Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 2, p. 217–241, jun. 2015.

GASTAL, Maria Do Carmo; FERREIRA, Francisco José Fonseca; CUNHA, Jefferson. REINTERPRETAÇÃO DO COMPLEXO INTRUSIVO LAVRAS DO SUL, RS, DE ACORDO COM OS SISTEMAS VULCANO-PLUTÔNICOS DE SUBSIDÊNCIA. PARTE

1: GEOLOGIA, GEOFÍSICA E GEOCRONOLOGIA (207PB/206PB/238U). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 1, p. 109–124, 1 mar. 2006.

GeoSci **GeoSci.xyz**. Disponível em: <https://geosci.xyz/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

GOOGLE. Google Earth. Versão Web. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 28 nov. 2025.

HARTMANN, Léo Afraneo; CHEMALE JR, Farid; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do rio Grande do Sul no pré-cambriano. **Ianuzzi R. & Frantz JC. (Org.)**, v. 50, p. 97-123, 2007.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual de Atividades 2023**. Brasília, DF: IBRAM, 2023. Disponível em: [https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/04/IBRAM\\_Relatorio-Anual-2023\\_completo\\_v3.pdf](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/04/IBRAM_Relatorio-Anual-2023_completo_v3.pdf). Acesso em: 17 dez. 2024.

IRVINE, R. J.; SMITH, M. J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 36, n. 1–3, p. 375–412, fev. 1990.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

LENHARE, Bruno Daniel; MOREIRA, César Augusto. Geophysical Prospecting Over a Meta-Ultramafic Sequence with Indicators of Gold Mineralization in Rio Grande do Sul State, Southernmost Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, n. 11, p. 5367–5383, 11 ago. 2020.

LOKE, M. H.; ACWORTH, Ian; DAHLIN, Torleif. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. **Exploration Geophysics**, v. 34, n. 3, p. 182–187, 1 jun. 2003.

LOPES, R. W. **Caracterização petrográfica e geoquímica da mina do Seival, bacia do Camaquã, RS. 2013**. Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geociências. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2013.

LOPES, Rodrigo W.; FONTANA, Eduardo; MEXIAS, André S.; GOMES, Márcia E. B.; NARDI, Lauro V. S.; RENAC, Christophe. Caracterização petrográfica e geoquímica da

sequência magmática da Mina do Seival, Formação Hilário (Bacia do Camaquã – Neoproterozoico), Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 41, n. 1, p. 51-64, 27 abr. 2014.

LOPES, Rodrigo Winck. **Alterações hidrotermais, mineralizações de Cu-Ag e geologia estrutural das rochas vulcanogênicas da Mina do Seival, Bacia Neoproterozoica do Camaquã, Sul do Brasil**. 2018. 229 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/186028>.

LOPES, Rodrigo Winck. **Geologia estrutural e alterações hidrotermais associadas à mineralização de cobre, da parte centro-norte da mina do Seival, Bacia do Camaquã**. 2011. 129 f. Trabalho de Conclusão de Graduação (Curso de Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/55610>. Acesso em: 26 nov. 2025.

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

MOREIRA, César Augusto; CASAGRANDE, Matheus Felipe Stanfoca; BORSSATTO, Karolliny. Analysis of the potential application of geophysical survey (induced polarization and DC resistivity) to a long-term mine planning in a sulfide deposit. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 20, out. 2020.

MOREIRA, César Augusto; LOPES, Syngra Machado; SCHWEIG, Camila; SEIXAS, Adriano da Rosa. Geoelectrical prospection of disseminated sulfide mineral occurrences in Camaquã Sedimentary Basin, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, p. 169-179, 2012.

NARDI, Lauro V. S.; LIMA, EF de. A ASSOCIAÇÃO SHOSHONÍTICA DE LAVRAS DO SUL, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 15, n. 2, p. 139–146, 1 jun. 1985.

OLIVEIRA, Christie Helouise Engelmann de; CHEMALE JUNIOR, Farid; JELINEK, Andréa Ritter; BICCA, Marcos Müller. U–Pb and Lu–Hf isotopes applied to the evolution of the late to post-orogenic transtensional basins of the dom feliciano belt, Brazil. **Precambrian Research**, v. 246, p. 240–255, jun. 2014.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Madrid: Paraninfo, 1972. 523 p.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; CHEMALE JR, Farid; LOPES, R. da C. **A bacia do Camaquã. Geologia do Rio Grande do Sul**, p. 231-274, 2000.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; CHEMALE JUNIOR, Farid; WILDNER, Wilson. ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DA BACIA DO CAMAQUÃ (RS). **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, 31 out. 2014.

PARASNIS, Dattetraya Shripad. **Principles of applied geophysics**. Springer Science & Business Media, 2012.

REISCHL, J. L. Mineralizações cupríferas associadas a vulcânicas na Mina Seival–RS. In: 30º **Congresso Brasileiro de Geologia**, Anais. 1978. p. 1568-1582.

REYNOLDS, John M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. 2rd. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2011.

SOMMER, Carlos Augusto; LIMA, Evandro Fernandes de; PIEROSAN, Ronaldo; MACHADO, Adriane. Reoignimbritos e ignimbritos de alto grau do vulcanismo Acampamento Velho, RS: origem e temperatura de formação. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 420–435, 1 set. 2011.

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

UNCTAD. Global Trade Update (May 2025): **Focus on critical minerals – copper in the new green and digital economy**. Disponível em: <https://unctad.org/publication/global-trade-update-may-2025-critical-minerals-copper>. Acesso em: 26 nov. 2025.

WILDNER, Wilson; LIMA, Evandro Fernandes de; NARDI, Lauro V. S.; SOMMER, Carlos A. Volcanic cycles and setting in the Neoproterozoic III to Ordovician Camaquã Basin succession in southern Brazil: characteristics of post-collisional magmatism. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 118, n. 1–2, p. 261–283, nov. 2002.