

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**WILLIAM RIBEIRO LOPES**

**MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE INTEGRADO COM DADOS  
AEROMAGNÉTICOS E SONDAÇÃO MECÂNICA APLICADO AO ESTUDO DE  
MÁRMORE CALCÍCIO NA ÁREA DA MINA CERRO DA CADEIA EM VILA NOVA  
DO SUL – RS.**

**Caçapava do Sul  
2023**

**WILLIAM RIBEIRO LOPES**

**MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE INTEGRADO COM DADOS  
AEROMAGNÉTICOS E SONDAGEM MECÂNICA APLICADO AO ESTUDO DE  
MÁRMORE CALCÍTICO NA ÁREA DA MINA CERRO DA CADEIA EM VILA NOVA  
DO SUL – RS.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

**Caçapava do Sul  
2023**

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) .

L716m Lopes, William Ribeiro

Método de eletrorresistividade integrado com dados aeromagnéticos e sondagem mecânica aplicado ao estudo de mármore calcítico na área da Mina Cerro da Cadeia em Vila Nova do Sul - RS. / William Ribeiro Lopes.

91 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2023.

"Orientação: Mário Jesus Tomas Rosales".

1. Mármore Calcítico. 2. Eletrorresistividade. 3. Calcário Andrezza. 4. Vila Nova do Sul. I. Título.

**WILLIAM RIBEIRO LOPES**

**MÉTODO DE ELETRORRESISTIVIDADE INTEGRADO COM DADOS  
AEROMAGNÉTICOS E SONDAÇÃO MECÂNICA APLICADO AO ESTUDO DE  
MÁRMORE CALCÍCIO NA ÁREA DAMINA CERRO DA CADEIA EM VILA NOVA  
DO SUL – RS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 14 de abril de 2023

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Mario Jesus Tomas Rosales

Orientador

UNIPAMPA

---

Me. Lenon Melo Ilha

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Felipe Padilha Leitzke

UFPel



Assinado eletronicamente por **Felipe Padilha Leitzke, Usuário Externo**, em 17/05/2023, às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARIO JESUS TOMAS ROSALES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/05/2023, às 23:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 19/05/2023, às 14:59, 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 **1132157** e o código CRC **5F1B4D9F**.

---

Dedico esta dissertação aos meus pais Luis Valdez e Fátima, a meus avós Terezinha, Maria Laura e Ivo, e a Karla, com todo meu amor e gratidão, pelo incentivo e apoio incondicional em todas as minhas escolhas.

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha família, meus pais Luis Valdez e Fátima, e aos meus avós Terezinha, Maria Laura e Ivo. Vocês são os meus alicerces. O amor, carinho e cuidado que recebo de vocês me nutrem diariamente e me fazem ver o quão abençoado sou por tê-los na minha vida. Muito obrigado pelo incentivo em todas as minhas escolhas, obrigado pela confiança que vocês têm em mim, obrigado por sempre me apoiarem e por fazerem simplesmente tudo que está ao alcance de vocês para que eu conquiste todos os meus objetivos. Toda a gratidão que eu dedicar a vocês, nunca será o suficiente, vocês são minha inspiração! Aos meus irmãos Matheus e Filipi que as vezes, mesmo com a distância, sei o quanto torcem pelo meu sucesso e vocês sabem o quanto são importantes na minha vida.

Agradeço a Karla, minha parceira de caminhada nessa aventura chamada vida. Muito obrigado pela paciência e compreensão quando sou “cabeça dura”, pelas palavras de incentivo e de motivação, por toda a ajuda, por sempre estar pronta e disposta a ajudar, por estar ao meu lado nos momentos difíceis, e pelo carinho e cuidado que sempre tem comigo.

Agradeço ao meu orientador e amigo Mario Rosales, por todo o conhecimento compartilhado, pela confiança, apoio e incentivo na elaboração da dissertação. Obrigado não só por me proporcionar conhecimento de formação profissional, mas pelas conversas e demonstrações de afeto que me fizeram aprender tantas outras coisas a respeito da vida. Tu és um professor e amigo muito especial!

Agradeço aos amigos e colegas geofísicos Jobson e Lenon. Muito obrigado por sempre me ajudarem quando surgiam as dúvidas, pelo apoio nos levantamentos de campo, processamento dos dados e pelas conversas amigas.

Agradeço a empresa *Calcário Andrezza Ltda.*, por cederem gentilmente os relatórios das sondagens mecânicas e por possibilitarem a execução dos levantamentos geofísicos terrestres na área da pesquisa.

Agradeço a Universidade Federal do Pampa, aos professores, colegas, técnicos, funcionários e em especial a coordenação do curso e principalmente a Luciana Abichequer por todo o suporte durante o curso e a realização desse trabalho. E por fim agradeço a todos os familiares e amigos que pensaram positivo, acreditaram na minha capacidade e torceram pelo meu sucesso.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus não sou o que era antes”.

Marthin Luther King



## RESUMO

O presente trabalho trata-se de uma atualização do mapeamento geológico-geofísico da área de extração mineral de mármore calcítico da empresa *Calcário Andreazza Ltda.* A área de estudo encontra-se delimitada pelas longitudes e latitudes geográficas a seguir: 53°57'5"W - 53°56'29"W e 30°20'12"S - 30°19'7"S, localizada na zona rural do município de Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul (RS). O mármore calcítico é o minério em exploração na região supracitada e apresenta-se na forma de lentes, com colorações em tons acinzentados, alternando entre bandas claras e escuras, encaixadas em rochas gnáissicas de idade Neoproterozoica. A produção do mesmo, além da indústria de ração animal, beneficia também as indústrias de fertilizantes já que o mármore calcítico extraído na lavra da empresa apresenta-se como um corretivo agrícola rico em carbonato. A pesquisa consiste na integração de dados de resistividade elétrica oriundos de levantamentos geoeletricos terrestres em escala de detalhe aproximadamente (1: 5.000), obtidos com as técnicas de aquisição de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Caminhamento Elétrico (CE), conjuntamente com dados aeromagnetométricos oriundos do Projeto Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010) e informações de sondagem mecânica cedidas pela empresa *Calcário Andreazza Ltda.* O processamento dos dados geoeletricos baseou-se na obtenção de modelos 1D e 2D, a partir da inversão dos dados de resistividade aparente, obtidos com as técnicas de SEV e CE. O processamento dos dados aeromagnetométricos, se realizou seguindo uma metodologia convencional, utilizando as técnicas de filtragem e de realce das anomalias do campo magnético residual. Os resultados dos modelos 2D de resistividade elétrica, mostram intervalos de 400 Ohm.m a 1300 Ohm.m, associados a presença de quartzitos com intercalações de camadas de mármore calcítico, com espessuras em torno de 20 metros. A integração dos dados citados anteriormente, resultou em um melhor entendimento do controle tectónico-estrutural associado a presença dos corpos minerais de mármore, delimitados por falhas inferidas pela geofísica, assim como a delimitação de um setor de ocorrência de mármore, e a confecção final de um modelo de bloco, para a ocorrência de mármore na área.

Palavras-Chave: *Calcário Andreazza, Mármore calcítico, eletrorresistividade, Caminhamento Elétrico, Vila Nova do Sul.*

## ABSTRACT

The present work deals with an update of the geological-geophysical mapping of the calcitic marble mineral extraction area, of the company Calcário Andreazza Ltda. The study area is delimited by the following geographic longitudes and latitudes: 53°57'5"W - 53°56'29"W e 30°20'12"S - 30°19'7"S, located in the rural area of the municipality of Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul (RS). Calcitic marble is the ore under exploration in the aforementioned region and is presented in the form of lenses, with grayish tones, alternating between light and dark bands, embedded in gneissic rocks of Neoproterozoic age. The production of it, in addition to the animal feed industry, also benefits the fertilizer industries since the calcitic marble extracted in the company's mine is presented as an agricultural corrective rich in carbonate. The research consists of the integration of electrical resistivity data from terrestrial geoelectric surveys on a scale of detail approximately (1: 5,000), obtained with the acquisition techniques of Vertical Electrical Sounding (VES) and Electrical Resistivity Tomography (ERT), together with aeromagnetometric data from the Rio Grande do Sul Shield Aerogeophysical Project (CPRM, 2010) and mechanical drilling information provided by the company Calcário Andreazza Ltda. The processing of geoelectric data was based on obtaining 1D and 2D models, from the inversion of apparent resistivity data, obtained with SEV and ERT techniques. The processing of the aeromagnetometric data was carried out following a conventional methodology, using filtering techniques and enhancement of the residual magnetic field anomalies. The results of the 2D models of electrical resistivity, show intervals from 400 Ohm.m to 1300 Ohm.m, associated with the presence of quartzites with intercalations of calcitic marble layers, with thicknesses around 20 meters. The integration of the aforementioned data resulted in a better understanding of the tectonic-structural control associated with the presence of calcitic marble mineral bodies, delimited by faults inferred by geophysics, as well as the delimitation of a sector of occurrence of calcitic marble, and the final preparation of a block model, for the occurrence of calcitic marble in the area.

Keywords: *Calcário Andreazza*, calcitic marble, electroresistivity, electrical resistivity tomographi, *Vila Nova do Sul*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo. ....	21
Figura 2 - Mapa de domínios Geotectônicos, com destaque da área de estudo.....	23
Figura 3- Mapa geológico simplificado da área de estudo. ....	24
Figura 4 - Foto de campo ou imagem ilustrando contato litológico e falha na área de extração mineral da mina Cerro da Cadeia. A) Setor com ocorrências de mármore; B) Setor com ocorrência de Gnaise. ....	28
Figura 5 - Técnica de Caminhamento Elétrico utilizando arranjo Dipolo-Dipolo.....	38
Figura 6 - Técnica de Sondagem Elétrica Vertical utilizando arranjo Schlumberger. ....	39
Figura 7 - Valores típicos de resistividade elétrica em algumas rochas, minerais e soluções aquosas, Segundo Keller & Frischknecht (1966); Daniels & Alberty (1966); Telford et al., (1990). ....	41
Figura 8 - Componentes do campo geomagnético da Terra. ....	42
Figura 9 - Valores médios e intervalos de suscetibilidade de tipos de rochas mais comuns.....	43
Figura 10 - Equipamento de eletrorresistividade: A) Syscal PRO; B) Cabo elétrico multieletrodo utilizado no CE; C) Eletrodo metálico e plug de conexão ligado ao cabo multieletrodo; D) Caixa comutadora para conexão entre os cabos multieletrodos; E) Cabo elétrico utilizado na SEV. ....	45
Figura 11 - Aquisição de dados de campo: Quadro A) SEVs 04 e 12; Quadro B) Aquisição de dados da linha 03 de Caminhamento Elétrico. ....	46
Figura 12 – Localização dos pontos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV). ....	47
Figura 13 – Localização das linhas de Caminhamento Elétrico. ....	48
Figura 14 – Localização das sondagens mecânicas realizadas na área de estudo. ....	49
Figura 15 - Localização das linhas de Voo dos dados Aeromagnetométricos para caracterização regional da área de estudo. ....	52
Figura 16 - Localização integrada dos dados de campo. ....	53
Figura 17 - Modelos estimados para as curvas de resistividades aparentes correspondentes as SEVs 01 a 06. ....	54
Figura 18 - Modelos estimados para as curvas de resistividades aparentes correspondentes as SEVs 07 a 12. ....	55
Figura 19 - Morfologia dos principais tipos de seções geoelétricas. ....	56
Figura 20 – Exemplo do produto resultante das sondagens: Planilha fornecida pela empresa Calcário Andrezza Ltda em formato Excel para o furo S_19 e “Log” desenhado para a sondagem S_19. ....	58
Figura 21 – Localização dos Perfis S-I_SW/NE, S-II_SSW-NNE e S-III_SW-NE. ....	59
Figura 22 - Modelo 2D gerado para o perfil S-I_SW-NE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros. ....	60
Figura 23 - Modelo 2D gerado para o perfil S-II_SSW-NNE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros. ....	61
Figura 24 - Modelo 2D gerado para o perfil S-III_SW-NE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros; C) Camada significativa de mármore entre as cotas 120 e 135 metros. ....	62
Figura 25 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE_01_SW-NE. ....	63

Figura 26 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE_02_NW-SE. ....	64
Figura 27 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE_03_SSW-NNE.....	64
Figura 28 - Esquema ilustrativo do fluxograma de processamento dos dados da Anomalia Magnética de Intensidade Total. ....	67
Figura 29 - Mapa da Anomalia Magnética de Intensidade Total (CMA). ....	68
Figura 30 - Mapa da Anomalia magnética (Continuação para cima: 250 metros).....	69
Figura 31 - Mapa da Anomalia Residual do Campo Magnético Anômalo (CMAR). ..	70
Figura 32 – Mapa da Anomalia Residual da Primeira Derivada Vertical (1DV).....	71
Figura 33 – Mapa da Anomalia da Amplitude do Sinal Analítico (ASA). ....	72
Figura 34 – Exemplo de comparação e integração de dados. (I) Modelo gráfico de Inversão 1D para SEV_04; (II) Logs confeccionados a partir da interpretação do modelo de inversão 1D, e da planilha de dados da sondagem S_46, respectivamente; (III) Intervalo de distância e cota entre a SEV_04 e a sondagem S_46; (IV) Recorte do modelo de inversão 2D do Caminhamento Elétrico CE_01_SW-NE com sobreposição dos logs da SEV_04 e S_46.....	73
Figura 35 – Exemplo de comparação e integração de dados. (I) Modelo gráfico de Inversão 1D para SEV_12; (II) Logs confeccionados a partir da interpretação do modelo de inversão 1D, e da planilha de dados das sondagens S_05 e S_01, respectivamente; (III) Intervalo de distância e cota entre a SEV_12 e as sondagens S_05 e S_01; (IV) Recorte do modelo geológico do perfil S-I SW-NE. ....	73
Figura 36 – A) Modelo 2D de resistividade verdadeira integrado com as colunas das SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod_01_SW-NE. ....	75
Figura 37 – A) Modelo 2D de resistividade verdadeira integrado com as colunas de SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod_02_NW-SE. ....	76
Figura 38 – A) Modelo 2D de resistividades verdadeiras integrado com colunas de SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod_03_SSW-NNE. ....	78
Figura 39 – Recorte ampliando (zoom) o setor com ocorrência de mármore do Modelo 2D Mod_03_SSW-NNE apresentado na figura 38. ....	79
Figura 40 – Localização dos principais dados de campo e lineamentos magnéticos inferidos, oriundos das interpretações geofísicas representados sobre o mapa da anomalia residual da Amplitude do Sinal Analítico. ....	80
Figura 41 – Quadro de integração e localização dos principais resultados oriundos do processamento e interpretação dos dados de campo. ....	81
Figura 42 – Modelo tridimensional em bloco, visando a identificação do corpo de mármore, gerado para a área de estudo da mina Cerro da Cadeia, exibindo visadas de diferentes ângulos e direções, onde o bloco em amarelo representa o mármore e o bloco em tons de cinza com transparência representa o restante do meio geológico, no contexto rochoso encaixante.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação simplificada de trabalhos geofísicos e geológicos anteriores relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. ....	29
Tabela 2 – Descrição litológica das sondagens. ....	50
Tabela 3 – Parâmetros de execução do aerolevanteamento magnetométrico. ....	51
Tabela 4 – Classificação morfológica dos tipos de SEV conforme comportamento e número de camadas.....	56
Tabela 5 – Resistividades ( $\rho$ ) e espessuras (h) das camadas conforme os modelos geoelétricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro da Cadeia. ...	57
Tabela 6 - Intervalo dos patamares de resistividade elétrica verdadeira para as seções de Caminhamento Elétrico. ....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D – Uma Dimensão  
1DV – Primeira Derivada Vertical  
2D – Duas dimensões  
a.C. – Antes de Cristo  
ASA – Amplitude do Sinal Analítico  
BR-290 – Rodovia Federal  
CE – Caminhamento Elétrico  
CMA – Campo Magnético Anômalo  
COMINCI – Companhia Mineira de Cimento Portland  
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
Eq. – Equação  
ERT – Tomografia por Resistividade Elétrica  
ESRG – Escudo Sul Rio-Grandense  
GeoSGB – Banco de Dados do Serviço Geológico do Brasil  
GMES - Global Monitoring for Environment and Security  
GPR – Radar de Penetração no Solo  
IGRF – *Internacional Geomagnetic Reference Field*  
km – Quilômetro  
LI – Lineamento Ibaré  
*Ltda.* – Limitada  
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura  
NP1\_mu\_cz – Complexo Arroio Cambaizinho  
NP12\_gamma\_vn – Suite Vila Nova do Sul  
NP3\_alfa\_av – Formação Acampamento Velho  
NP3m – Grupo Maricá  
Ohm.m – Ohm vezes metro  
P.C.A – Plano de Controle Ambiental  
P1g – Grupo Guatá  
PLGB – Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil  
RMS – Erro Médio Quadrático  
RS – Rio Grande do Sul  
SEV – Sondagem Elétrica Vertical

SFI – Sistema de Falhas Irapuá

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UPWARD – Continuação para cima

UTM – Universal Transversa de Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{AM}$  – Distância entre os eletrodos *A* e *M*

$\overline{AN}$  – Distância entre os eletrodos *A* e *N*

$\overline{BM}$  – Distância entre os eletrodos *B* e *M*

$\overline{BN}$  – Distância entre os eletrodos *B* e *N*

< – Menor que

= – Igual

> – Maior que

± - Mais ou menos

CaO – Óxido de Cálcio

D – Declinação

E – Leste

W – Oeste

F – Magnitude

ha – Hectare

I – Inclinação

M – Magnetização Induzida

m – Metro

M<sup>1</sup> – Fase Metamórfica 1

M<sup>2</sup> – Fase Metamórfica 2

MgO – Óxido de Magnésio

% – Porcentagem

~ – Aproximadamente

N – Norte

mm - Milímetros

Ma – Milhões de anos

NE – Nordeste

nT – nano Tesla

NW – Nordeste

NW/SE – Noroeste-Sudeste

SE – Sudeste

SW/NE – Sudoeste-Nordeste

S – Sul



$S_n$  – Primeira Superfície Deformacional  
 $S_{n+1}$  – Segunda Superfície Deformacional  
 $S_{n+2}$  – Terceira Superfície Deformacional  
 $S_{n+3}$  – Quarta Superfície Deformacional  
SSW-NNE – Sul-Sudeste-Nor-Nordeste  
SW – Sudoeste  
WNW – Oeste-Noroeste  
NE/SW – Nordeste-Sudoeste  
 $\Omega$  - Ohm  
 $AB$  – Eletrodos de Corrente  
 $H$  – Campo Magnético  
 $I$  – Corrente elétrica  
 $K$  – Fator Geométrico  
 $MN$  – Eletrodos de Potencial  
 $R$  – Resistência do Condutor  
 $V$  – Potencial  
 $\Delta V$  – Diferença de potencial  
 $k$  – Susceptibilidade Magnética  
 $mA$  – Miliampére  
 $mV$  – Milivolt  
 $n$  – Níveis de Investigação  
 $\rho_a$  – Resistividade Aparente

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>19</b>
<b>4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>21</b>
<b>5 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	<b>22</b>
5.1 Geologia Regional .....	22
5.2 Geologia Local.....	23
5.2.1 Complexo Arroio Cambaizinho (NP1_mu_cz) .....	24
5.2.2 Suíte Vila Nova do Sul (NP12_gamma_vn) .....	25
5.2.3 Grupo Maricá (NP3m).....	25
5.2.4 Formação Acampamento Velho (NP3_alfa_av).....	26
5.2.5 Grupo Guatá (P1g) .....	26
5.3 Geologia da Mina do Cerro da Cadeia.....	26
5.3.1 Mármore Calcítico.....	28
<b>6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>29</b>
6.1 Trabalhos Geofísicos .....	31
6.2 Trabalhos Geológicos .....	35
<b>7 MÉTODOS GEOFÍSICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>35</b>
7.1 Métodos Geoeletricos .....	35
7.1.1 Caminhamento Elétrico.....	37
7.1.1.1 Arranjo Dipolo-Dipolo.....	37
7.1.2 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical .....	38
7.1.2.1 Arranjo Schlumberger .....	38
7.1.3 Propriedades Elétricas dos Solos e Rochas .....	40
7.2 Magnetometria.....	41
7.2.1 Magnetismo das Rochas .....	43
<b>8 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS</b> .....	<b>44</b>
8.1 Aquisição dos dados.....	44
8.2 Processamento dos dados .....	53
8.2.1 Sondagem Elétrica Vertical.....	54
8.2.2 Descrição das Sondagens .....	57
8.2.3 Caminhamento Elétrico.....	63
8.2.4 Dados Magnetométricos .....	65
<b>9 INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS</b> .....	<b>72</b>
<b>10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho constitui a finalização do Projeto de Pesquisa que foi apresentado ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mineral no nível de Mestrado, da Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul. Trata-se de uma atualização do mapeamento geológico-geofísico da área de extração mineral de mármore calcítico da empresa *Calcário Andrezza Ltda.* A referida empresa recebeu Concessão de Lavra no ano de 1976, e desde então vem extraíndo, a partir do método de extração a céu-aberto, britando e moendo mármore calcítico de uma área de aproximadamente 23,83 ha.

De acordo com o Plano de Controle Ambiental (P.C.A.) elaborado pela GEOPROSPEC (1995), a expectativa de vida útil da reserva mineral, na área caracterizada pela lavra do minério, era de aproximadamente 65 anos. No entanto, em um relatório de reavaliação da região explorada que foi elaborado pela empresa Napeia Consultoria e Projetos em 2009, constatou-se que a expectativa de lavra do minério de mármore calcítico era de aproximadamente 10 anos, e do gnaisse de 36 anos, considerando o ritmo de extração de 80.000 toneladas/ano de mármore calcítico e 107.000 toneladas/ano de gnaisse.

O mármore calcítico é o minério em exploração na região supracitada e apresenta-se na forma de lentes, com colorações em tons acinzentados, alternando entre bandas claras e escuras, encaixadas em rochas gnáissicas da formação Ibiajutura de idade Neoproterozoica.

A produção deste calcário (mármore calcítico), além da indústria de ração animal, que exige como garantia um produto com um mínimo de 36% de Óxido de Cálcio (CaO) e um máximo de 3% de Óxido de Magnésio (MgO), beneficia também as indústrias de fertilizantes já que o mármore calcítico extraído na lavra da empresa apresenta-se como um corretivo agrícola rico em carbonato, capaz de neutralizar a acidez do solo, melhorar suas propriedades químicas, e favorecer a fertilidade do solo.

A empresa demonstrou interesse no desenvolvimento desta pesquisa, pois contribui para um maior conhecimento geológico e geofísico da atual área de extração, assim como na orientação de futuras áreas de interesse que apresentem um atrativo potencial de extração mineral. Desta forma a mesma mostrou-se parceira em todas as etapas da pesquisa, desde a disponibilização de relatórios de sondagem mecânica

realizadas na área de estudo, liberação e acesso à área, para aquisição de dados de campo, e oferecimento de apoio logístico nas diferentes etapas do trabalho.

A necessidade de dispor de um mapeamento geológico-geofísico para área da pesquisa em escala de detalhe (i.e., 1:5,000), e como consequência poder esclarecer questões relacionadas com a geologia local, em termos de um arcabouço tectônico estrutural mais aprimorado, constitui um desafio, visando como objetivo final da pesquisa a obtenção de um modelo geofísico-geológico para a área a partir da integração e interpretação dos dados geofísicos oriundos dos levantamentos realizados, e assim propor novos alvos para prospecção mineral. Questões tais como: determinação de parâmetros geométricos, identificação, caracterização geofísica, e delimitação espacial em sub-superfície, de corpos minerais de mármore calcítico, são de grande interesse para a Empresa.

A área de estudo encontra-se delimitada pelas longitudes e latitudes geográficas a seguir:  $53^{\circ}57'5''W$  -  $53^{\circ}56'29''W$  e  $30^{\circ}20'12''S$  -  $30^{\circ}19'7''S$ , *Datum: WGS84*. Localizada na zona rural do município Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul (RS). O acesso à área ocorre pela BR-290 no km 376, distante 288 km da capital Porto Alegre e 65 km do município de Caçapava do Sul. Partindo de Vila Nova do Sul via BR-290, sentido São Gabriel, percorre 5,2 km até o acesso não pavimentado que leva a área de extração situada na encosta sul do Cerro da Cadeia.

Desta forma, utilizou-se a integração de dados de resistividade elétrica, oriundos de levantamentos geoeletricos terrestres em escala de detalhe de aproximadamente (1: 5,000), obtidos com as técnicas de aquisição de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Caminhamento Elétrico (CE), conjuntamente com dados aeromagnetométricos oriundos do Projeto Aerogeofísico do Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), e informações de sondagem mecânica cedidas pela empresa *Calcário Andrezza Ltda.*

O processamento dos dados geoeletricos baseou-se na obtenção de modelos 1D e 2D, a partir da inversão dos dados de resistividade aparente, obtidos com as técnicas de SEV e CE. O processamento dos dados aeromagnetométricos, se realizou seguindo uma metodologia convencional, utilizando as técnicas de filtragem e de realce das anomalias do campo residual magnético.

O processamento e integração dos citados dados geofísicos trouxe como resultado, um melhor entendimento do controle tectônico-estrutural associado a presença dos corpos minerais de mármore, delimitados por falhas inferidas pela

geofísica, assim como proporcionou a identificação de uma área de ocorrência significativa de mármore, e a posterior confecção de um modelo tridimensional de bloco, para a ocorrência de mármore na área.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

A pesquisa tem como objetivo principal contribuir para o esclarecimento da geologia local na área da Mina Cerro da Cadeia, mediante a atualização do mapeamento geofísico para a área de estudo, a partir do processamento e interpretação de dados geoeletricos terrestres em escala de detalhe de aproximadamente (i.e., 1: 5.000), e sua integração com dados aeromagnetométricos, onde se pretende identificar e caracterizar áreas e/ou setores, com presença de corpos minerais de mármore calcítico, e seu condicionamento tectônico-estrutural. Como suporte, no citado mapeamento, foi estabelecido um fluxograma de integração de dados de resistividades oriundos de levantamentos geoeletricos terrestres em escala de detalhe, com as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e de Caminhamento Elétrico (CE), conjuntamente com dados aeromagnetométricos do Projeto Aero-geofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010) e informações de sondagens mecânicas disponibilizadas pela empresa *Calcário Andrezza Ltda.*

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Confeccionar modelos geoeletricos 1D e 2D, a partir da inversão dos dados de resistividade aparente, obtidos com as técnicas de SEV e de CE.
- Identificar assinaturas de altos anômalos magnéticos no mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), que possam estar associadas à presença do topo de corpos formados por rochas de composição gnáissica, como um critério interpretativo de diferenciação, para caracterizar a presença de rochas de composição calcítica, para a área de estudo, as quais de fato, apresentam menores valores de susceptibilidade magnética, do que as rochas de composição gnáissica.
- Identificar e caracterizar direções preferencias de lineamentos magnético de caráter regional para a área de estudo, que possam estar associados à presença de falhas

profundas, que afetam o topo do embasamento gnáissico, e que provavelmente mantenham alguma relação tectônica-estrutural em escala local, com a presença de enxames de fraturas e/ou de falhas, localizadas a uma menor profundidade, e que afetam as rochas suprajacentes ao embasamento,

- Confeccionar um modelo geofísico-geológico para a área a partir da integração e interpretação dos dados oriundos dos modelos de resistividades verdadeiras, obtidos por estimativa de inversão 1D e 2D, referentes a medição de cada SEV, e a medição de cada linha de CE, na área estudo, acompanhando o posicionamento das sondagens mecânicas na área de estudo.

- Correlacionar e interpretar as colunas litológicas das sondagens na área de estudo, com os diferentes patamares de resistividades verdadeiras obtidos a partir dos modelos geoeletricos.

- Realizar uma análise quantitativa dos resultados mostrados, conforme se ilustra nos modelos geológico-geofísicos obtidos, a maneira de determinar os parâmetros geométricos, tais como: extensão lateral e profundidade, que contribuam para a delimitação espacial em sub-superfície, dos corpos minerais de mármore calcítico.

- Identificar mediante a caracterização geofísica, a presença dos corpos minerais de mármore calcítico.

- Confeccionar uma guia perspectiva de orientação na prospecção mineral, para a área de estudo, a maneira de conseguir expor um quadro diagnóstico, a partir da interpretação conjunta dos resultados oriundos da aplicação do método de eletrorresistividade, e do método magnetométrico, visando à prospecção de mármore calcítico, com a sugestão de abertura de novas frentes de lavra mineral, para a empresa *Calcário Andreazza Ltda.*

- Confeccionar a proposta de um modelo tridimensional de bloco, para a ocorrência de mármore calcítico na área de estudo.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Existe interesse por parte da empresa *Calcário Andreazza Ltda* em desenvolver projetos de pesquisa que se direcionem para um maior conhecimento geológico e geofísico da área de estudo. A empresa cedeu relatórios de sondagens mecânicas, e se ofereceu como parceira na liberação, acesso a área de estudo, logística e apoio na execução dos trabalhos de campo. A UNIPAMPA, Campus Caçapava do Sul,

disponibilizou os equipamentos necessários para o desenvolvimento dos trabalhos de aquisição dos dados de campo, além do apoio do técnico.

A evidência de trabalhos geofísicos anteriormente realizados em áreas com presença de calcário que geraram resultados satisfatórios, por isso a realização desta pesquisa torna-se relevante. Com relação aos métodos geofísicos, identificamos que os mesmos já foram utilizados em alguns trabalhos relacionados as áreas de exploração de mármore no Rio Grande do Sul, como por exemplo a pesquisa desenvolvida por Fiorite (2014), consistiu na aplicação do método de eletrorresistividade e de sensoriamento remoto para caracterizar o contato litológico na borda do Granito Caçapava do Sul. Também o trabalho de Ilha (2015) que utilizou métodos de eletrorresistividade e refração sísmica para caracterização de mármore dolomíticos encaixados no Granito Caçapava do Sul.

O mármore, por definição, é uma rocha metamórfica que possui entre 50% e 95% de carbonatos formados a partir de calcários e dolomitos submetidos a pressões e temperaturas elevadas (BORTOLOTTI, 1987). Pode conter impurezas, normalmente de composição silicática que formam bandas entre partes de composição carbonática uniforme. Estas rochas são utilizadas em esculturas, como rochas ornamentais, de revestimento e matéria prima para fabricar cal e cimento. O mármore, objeto de interesse deste estudo, constitui a matéria prima para corretivos de solo em maior escala, e também para fabricação de cal virgem.

Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos, em relação aos métodos tradicionais de investigação de sub-superfície, tais como, exemplo, as sondagens, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com um custo relativamente menor. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas.

A exploração mineral por métodos geoeletricos possibilita o conhecimento da geometria dos corpos de mármore calcítico, visando colaborar com o planejamento empresarial, da logística das frentes de lavras mineira, aperfeiçoar a exploração do minério, e fornecer informações indiretas, que podem estar associadas com a identificação e a caracterização geofísica das rochas de composição mármore calcítico, que apresentam diferentes graus de alteração, e/ou de conservação, na dependência do controle tectônico-estrutural existente.

#### 4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área da pesquisa pertence a empresa *Calcário Andrezza Ltda*, localizada à cerca de 6,5 km a Oeste-Noroeste (WNW) da cidade de Vila Nova do Sul, delimitada pelas longitudes e latitudes geográficas a seguir:  $53^{\circ}57'5''$  W -  $53^{\circ}56'29''$  W, e,  $30^{\circ}20'12''$  S -  $30^{\circ}19'7''$  S; *Datum*: WGS84 (figura 1). Tem acesso pela BR-290 no km 376, distante a 288 km da capital Porto Alegre e a 65 km de Caçapava do Sul onde é situada a UNIPAMPA Campus Caçapava do Sul ao qual pertence este curso de Pós-Graduação. Partindo de Vila Nova do Sul via BR-290, sentido São Gabriel, percorre-se 5,2 km até o acesso não pavimentado que leva a área de extração situada na encosta sul do cerro da Cadeia.

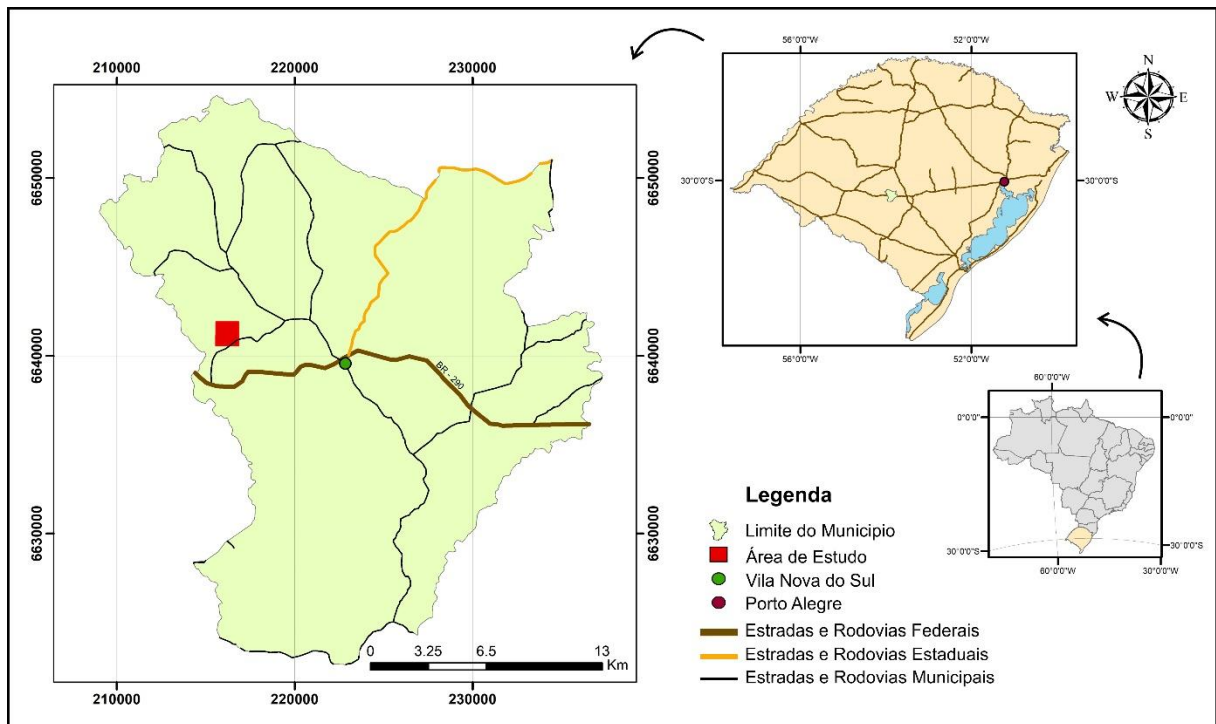


Figura 1 - Localização da área de estudo.  
Fonte: Autor.



## 5 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 5.1 Geologia Regional

Geologicamente, o estado do Rio Grande do Sul está constituído por uma porção central, onde predominam rochas cristalinas designadas como Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG).

O Escudo Sul-Rio-Grandense situa-se no Segmento Meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA, 1977), onde o pioneiro a estabelecer uma subdivisão foi Carvalho (1932), cunhando a terminologia Escudo Sul-Rio-Grandense, a qual agrupou as litologias em diferentes fácies metamórficas, entre xistos e gnaisses.

A evolução geológica do Rio Grande do Sul registra uma história prolongada de colisões entre continentes, assoalhos oceânicos, arcos de ilhas, vulcões e bacias sedimentares, hoje fazendo parte do registro geológico das rochas que compõem a superfície do nosso estado. A área de estudo situa-se geologicamente na região noroeste da Província Mantiqueira próxima ao contato com a borda sul da Bacia do Paraná.

O município de Vila Nova do Sul está localizado entre a porção norte do domínio São Gabriel e a porção sul da Bacia do Paraná (figura 02). A área de estudo situa-se sobre o domínio São Gabriel que é delimitado a leste pelo Sistema de Falhas Irapuá (SFI) e a oeste e sul pelo Lineamento Ibaré (LI) e a norte com a Bacia do Paraná (Bacia Vulcano-sedimentar Pós-orogênica).

O Bloco São Gabriel situado na porção ocidental do Escudo Sul-Rio-Grandense, corresponde a um Arco vulcânico juvenil do Brasileiro (Hartmann & Remus, 2000).

O Complexo Cambaizinho é constituído por derrames máficos a ultramáficos e/ou diques e sills derivados de magmas komatíticos. Tratam-se de rochas com idades Neoproterozoica entre 750 e 700 Ma, estas associações são interpretadas como sequências meta-vulcanosedimentares de baixo a médio grau metamórfico, preservadas dentro do Cinturão Vila Nova no Bloco São Gabriel (Hartmann & Remus, 2000).

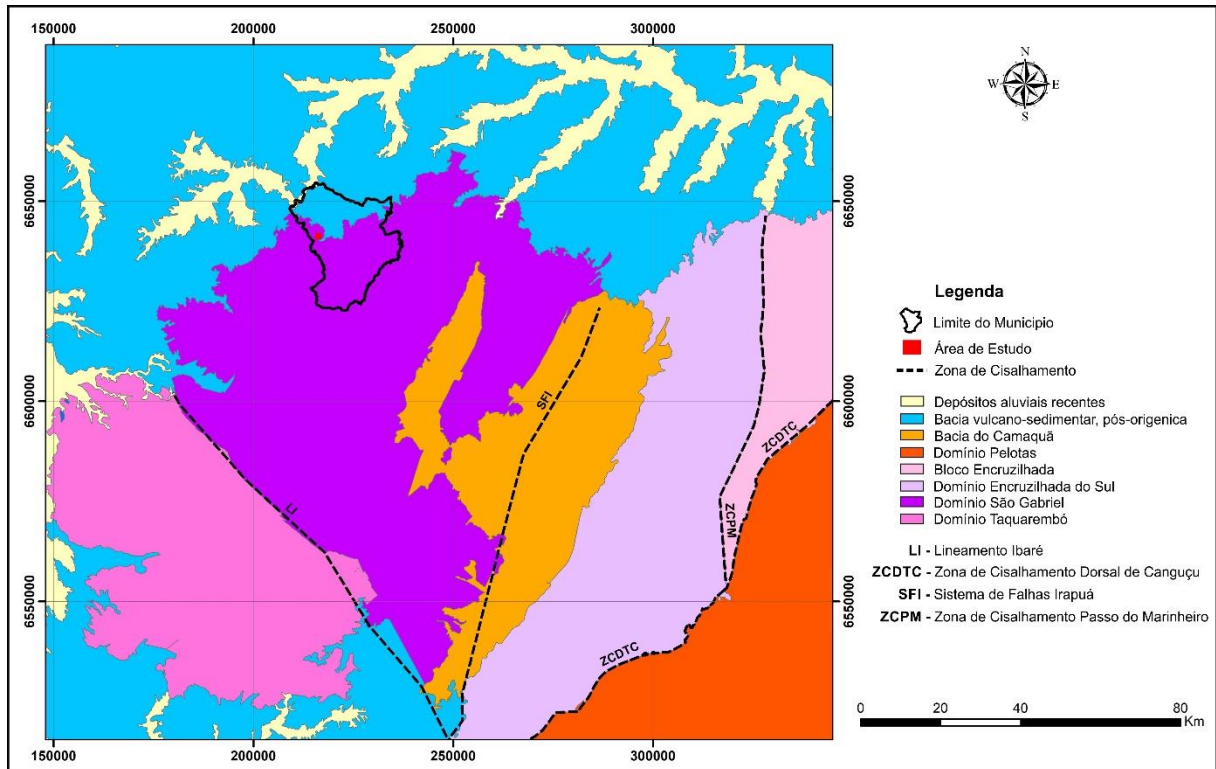


Figura 2 - Mapa de domínios Geotectônicos, com destaque da área de estudo.

Fonte: Autor, adaptado de Laux (2021).

## 5.2 Geologia Local

A área de estudo está situada geologicamente sobre uma sequência de quartzitos, clorita sericita xistos, mármores e rochas magnesianas denominada de formação Ibiajutura, caracterizada por Remus (1990) na região de São Gabriel. Este nome foi utilizado para diferenciá-lo do termo “Cambaizinho” que é mais utilizado para a unidade máfica-ultramáfica. Na formação Ibiajutura (Cambaizinho) as idades de proveniência variam entre 840 a 660 Ma, com a maioria dos dados entre 750 e 680 Ma (LENA *et al.*, 2014; CERVA-ALVES *et al.*, 2020).

A Formação Ibiajutura faz limite a Norte e Nordeste com o Grupo Guatá, a Sudeste com a Suíte Vila Nova do Sul, a Sul com o Grupo Maricá e com a Formação Acampamento Velho, e a Oeste com o Complexo Arroio Cambaizinho conforme ilustra a figura 3.

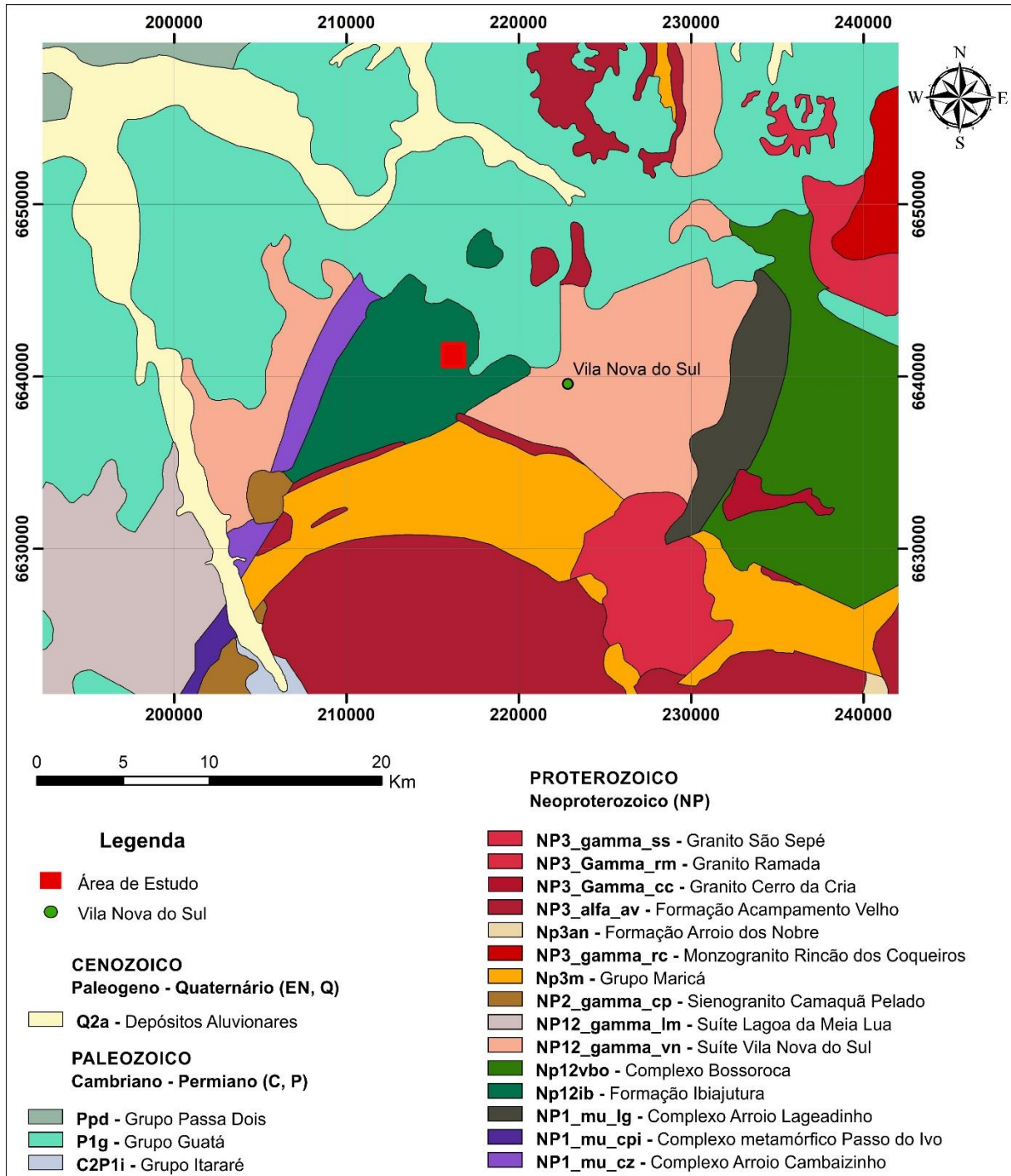


Figura 3- Mapa geológico simplificado da área de estudo.

Fonte: Autor, modificado de Laux (2021).

### 5.2.1 Complexo Arroio Cambaizinho (NP1\_mu\_cz)

O complexo máfico-ultramáfico Arroio Cambaizinho apresenta idade U-Pb de  $787,6 \pm 2,6$  Ma em rutilo. O Cambaizinho é predominantemente composto por rochas ultramáficas, contínuas ao Complexo Passo do Ivo em direção norte. Os corpos desta unidade estão na sua maioria compostos por harzburgitos, serpentinitos, xistos

magnesianos, rochas a base de talco, clorita e tremolita. Uma grande parte dos corpos máficos-ultramáficos estão hospedados em sequências vulcano-sedimentares e apresentam fácies sedimentares associadas como calcários, quartzitos e produtos vulcânicos, que não apresentam uma cartografia em escala adequada.

### **5.2.2 Suíte Vila Nova do Sul (NP12\_gamma\_vn)**

É o segmento mais a norte do Arco de São Gabriel, e o que apresenta maior extensão. É o mais evoluído geoquimicamente, segundo a maioria dos autores, já com característica de um arco continental e apresenta uma preservação de idades maior, entre 740 e 690 Ma.

### **5.2.3 Grupo Maricá (NP3m)**

Pelosi e Fragoso-Cesar (2003) dividem o grupo em três formações, da base para o topo, Passo da Promessa, São Rafael e Arroio América. A unidade consiste em arenitos grossos a conglomeráticos, com estratificação cruzada acanalada, intercalados com conglomerados de seixos, interpretados como canais entrelaçados na sua base (PAIM *et al.*, 2000; PELOSI; FRAGOSO-CESAR, 2003). São seguidos por arenitos finos a muito finos, com pelitos subordinados, com laminação plano paralela e marcas onduladas assimétricas e simétricas, além de *hummockys*, interpretados como depositados em plataforma marinha rasa (PAIM *et al.*, 2000). No topo, retornam as condições aluviais com a ocorrência de arenitos grossos e conglomeráticos, com estratificação cruzada de médio porte e conglomerados maciços.

A proveniência indica os terrenos Paleoproterozoicos como fonte principal e  $630,2 \pm 3,4$  Ma como idade mínima, dada por seixo de rocha vulcânica (BORBA *et al.*, 2008). Netto, Paim e Rosa (1992) descrevem uma possível icnofauna Ediacarana para o Grupo, e Almeida, Chemale Júnior e Machado (2012) uma idade máxima de  $601 \pm 13$  Ma para vulcânicas intercaladas no topo desta unidade.

#### **5.2.4 Formação Acampamento Velho (NP3\_alfa\_av)**

A formação Acampamento Velho, engloba todo o vulcanismo ácido na forma de derrames de lavas riolíticas, ignimbritos, tufos a pó, a cinza ou a lapíli e brechas vulcânicas, relacionado a Bacia do Camaquã (WILDNER *et al.*, 1999; 2002; PORCHER *et al.*, 1995; SOMMER, 1994; 2003, entre outros). Tem suas principais ocorrências nos platôs do Taquarembó (Dom Pedrito) e da Ramada (Santa Margarida do Sul), ou nos cerros do Perau e Bugio, a Leste de Caçapava do Sul.

As idades desta unidade variam de 540 a 570 Ma (CHEMALE JÚNIOR, 2000; ALMEIDA *et al.*, 2002; ALMEIDA; CHEMALE JÚNIOR; MACHADO, 2012; SOMMER *et al.*, 2005; 2006).

#### **5.2.5 Grupo Guatá (P1g)**

Compreende as formações Rio Bonito e Palermo (WHITE, 1906) sendo proposto por Gordon Júnior (1947), para localidades no estado de Santa Catarina. A sedimentação deste grupo inicia com depósitos que se alternam entre predominantemente pelíticos e predominantemente arenosos gradando para arenitos finos siltitos e siltitos carbonosos intercalados com camadas de carvão, correspondentes à Formação Rio Bonito (MILANI *et al.*, 2007). Esta formação é interpretada como plataforma rasa, com lobos deltaicos retrabalhados por marés, que depois gradam para sistemas lagunares com formação de turfeiras (HOLZ *et al.*, 2010).

No Rio Grande do Sul (RS) a sedimentação ocorre como uma seção condensada, onde ocorrem apenas rochas depositadas após o Neocarbonífero, que incluem os Grupos Itararé, Guatá, Passa Dois, Rosário do Sul e São Bento/Serra Geral, correspondendo às supersequências Gondwana I, II e III.

Segundo Marques-Toigo (1988), com base em pólenes das formações Rio Bonito e Palermo, o Grupo Guatá é de idade permiana, equivalente aos andares Artinskiano e Kunguriano.

### **5.3 Geologia da Mina do Cerro da Cadeia**

Conforme descrição do relatório de reavaliação de reserva (NAPEIA, 2009) realizado para a mineradora *Calcário Andreazza Ltda.*, a geologia predominante na

área é uma sequência parametamórfica, que tem como litotipos predominantes os quartzo-biotita gnaisses, biotita-quartzo plagioclásio gnaisses, mármore, e ainda intercalados, anfibolitos e rochas calcissilicáticas.

Os gnaisses são basicamente constituídos por quartzo-biotita, mostrando uma variação dentro da área entre biotita, plagioclásio, ocorrendo secundariamente pirita, zircão, apatita epidoto e magnetita, tem cor cinza médio, com estrutura bandada, com bandamento milimétrico regular e contínuo, onde se alternam bandas que predominam minerais máficos (biotita) e bandas onde predominam minerais félsicos (quartzo e plagioclásio).

Os mármore têm composição calcítica (>90%), com tamanho médio de 1,6 mm, ocorrendo ainda, moscovita, epidoto e pirita. Possuem textura equigranular, granoblástica poligonal grossa.

O padrão metamórfico-deformacional observado na área da mina pode ser considerando complexo quando avaliado sobre o espectro dos eventos geológicos por ele registrado. São bem identificadas quatro superfícies deformacionais ( $S_n$ ,  $S_{n+1}$ ,  $S_{n+2}$  e  $S_{n+3}$ ) e duas fases metamórficas ( $M^1$  e  $M^2$ ) localmente.

A fase deformacional mais importante para a mina Cerro da Cadeia é a  $S_{n+2}$ , relacionada pela formação de dobras assimétricas com vergência para WNW com caimento para SE, e comprimento de onda amplo (acima dos 500 m). A lente de calcário, encaixada nos gnaisses, mergulha conforme os flancos destas dobras segundo a direção SE.

Em campo foi possível verificar ocorrência de camadas de mármore intercaladas com gnaiss, condicionadas a um controle estrutural devido a presença de falhas inferidas conforme representado na figura 4.



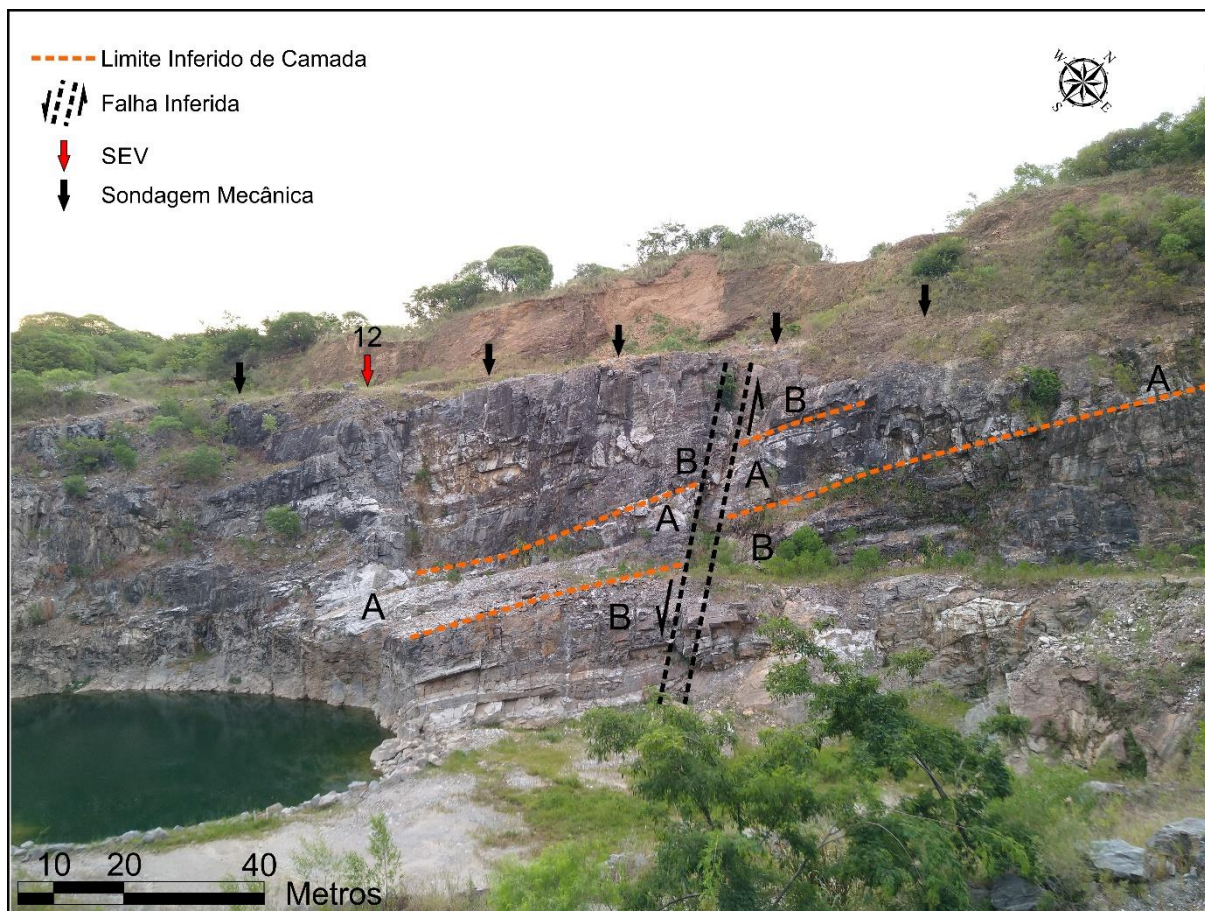


Figura 4 - Foto de campo ou imagem ilustrando contato litológico e falha na área de extração mineral da mina Cerro da Cadeia. A) Setor com ocorrências de mármore; B) Setor com ocorrência de Gnaisse. Fonte: Autor.

### 5.3.1 Mármore Calcítico

Conforme descrição apresentada no Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB): Relatório Folha SH. 22-Y-A Cachoeira do Sul (PORCHER; LOPES, 2000), foram cadastrados dois jazimentos de mármore calcítico, ambos pertencente ao município de Vila Nova do Sul. São mármore de granulação grossa, brancos e cinza claros, foliação pouco nítida, aparecendo sob a forma de lentes nos gnaisses do Complexo Cambaí. A produção de calcário calcítico a partir destes mármore, destina-se principalmente, à indústria de ração animal que exige, como garantia, um produto com um mínimo de 36% de CaO e um máximo de 3% de MgO.

## 6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentes estudos sobre o Escudo Sul Rio-grandense, realizados por pesquisadores das áreas de geologia e geofísica, apresentam-se hoje como importantes fontes para o reconhecimento da evolução geológica desta área. Ainda, algumas pesquisas realizadas revelam as explorações que são ou podem ser feitas nas áreas em que a geologia favorece a produção de matérias-primas, como no caso da evidência deste estudo para o mármore calcítico.

A tabela 1 apresenta de forma simplificada alguns dos principais trabalhos relacionados aos métodos e técnicas abordados a área de estudo ou similar.

Tabela 1 - Relação simplificada de trabalhos geofísicos e geológicos anteriores relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

<b>Autor</b>	<b>Método/Técnica</b>	<b>Principais Resultados</b>
Mendes (1979)	Eletrorresistividade com a técnica de SEV	De maneira geral, a profundidade do topo rochoso nos pontos investigados, foi determinada com uma precisão estimada de 85%, permitindo a confecção de mapas de isocapeamento a partir dos resultados das SEVs mostra com bastante fidelidade uma tendência do comportamento do topo rochoso no local estudado.
Ferreira e Rosales (2012)	Magnetometria aérea e terrestre	Identificou a presença de dois -trends- de lineamentos magnético-estruturais de caráter regional, seguindo duas direções preferenciais: NW-SE e SW-NE, associados à presença de falhas profundas. Foi identificado e delineado o topo do embasamento magnético a uma profundidade de aproximadamente 250 metros associado às rochas metamórficas representado pelos gnaisses da Formação Cambaí.



Hoerlle (2013)	Mapeamento esquemático; Coleta de amostras e dados estruturais; Petrografia; Difratometria de Raios-X e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	O objetivo principal do trabalho é entender a interação entre os mármores calcíticos de Vila Nova do Sul e os fluidos magmáticos e/ou hidrotermais que afetaram essas rochas. O trabalho de campo resultou em mapeamento esquemático, coleta de amostras e dados estruturais, os mesmos serviram para as etapas de petrografia resultando em descrições petrográficas e imagens, análises de Difratometria de Raios-X e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) resultando respectivamente em gráficos com picos relacionados a estrutura cristalina de cada mineral, e imagens de detalhe e composição semi-quantitativa de minerais.
Fiorite et al., (2014)	Eletrorresistividade com a técnica de CE e Sensoriamento Remoto	Valores de resistividade elétrica acima de 3000 Ohm.m, caracterizando as ocorrências de mármore, em um intervalo de profundidades de 50 metros a 85 metros, na região de Caçapava do Sul.
Morais et al., (2015)	Eletrorresistividade com a técnica de CE e informações de sondagem mecânica	Obteve valores de resistividade elétrica em torno de 1000 ohm.m, puderam ser associados a gnaisses com lentes de mármore calcítico, possivelmente alterado.
Ilha (2015)	Eletrorresistividade com a técnica de CE e Sísmica de Refração	O resultado do modelo sísmico de velocidade final, obtido através da tomografia das ondas refratadas pode ser correlacionado com valores de resistividade elétrica em torno de 1200 Ohm.m que identificaram presença de

		camadas espessas de calcário em uma profundidade aproximada de 15 metros
Machado et al., (2019)	Radar de Penetração no Solo (GPR) e Tomografia por Resistividade Elétrica ou Eletorresistividade (ERT)	Integração de GPR e ERT a fim de verificar as respostas desses aos carbonatos no Parque paleontológico de São José do Itaboraí – RJ. As seções radargrama apresentaram correlações dos dados com descrição litológica do poço que está inserida na linha 01, e nas seções geoeletricas os valores altos de resistividade elétrica acima de 22 ohm.m podem ser associados a concreções associadas aos carbonatos e abaixo desse valor a material de aterro.
Silva (2021)	Sensoriamento Remoto, processamento de imagens de satélite e Aeromagnetometria	Resultou na identificação de dois (02) - trends- estruturais, sendo um domínio com direção preferencial NW-SE, com menor frequência de ocorrência, e maior continuidade e extensão, e um domínio NE-SW que apresenta maior frequência de ocorrência, porém geometria menor.

Fonte: Autor (2023)

## 6.1 Trabalhos Geofísicos

Mendes (1979) aplicou método de eletorresistividade com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na pedreira Matosinhos, de propriedade da *Companhia Mineira de Cimento Portland – COMINCI*, em Matosinhos-MG. A campanha geofísica, objetivo básico deste trabalho, foi desenvolvida sobre as rochas calcárias da Formação Sete Lagoas, a com a finalidade de estudar e definir o comportamento do topo rochoso. De maneira geral, a profundidade do topo rochoso nos pontos investigados, foi determinada com uma precisão estimada de 85%, alcançando plenamente os objetivos do trabalho, dentro das previsões estabelecidas, confirmando a importância dos métodos geofísicos em campanhas de prospecção

mineral. Neste caso serviu para avaliar o volume de estéril a ser removido ao se operar diferentes frentes de desmonte, e programar a continuidade da lavra dentro de condições mais favoráveis. Em última análise, a confecção de mapas de isocapeamento a partir dos resultados das SEVs mostra com bastante fidelidade uma tendência do comportamento do topo rochoso no local estudado.

O trabalho de Ferreira e Rosales (2012) abordou uma compilação de dados magnetométricos aéreos e terrestres na localidade do Passo do Rocha localizada a Noroeste da cidade de Vila Nova do Sul, área esta que se sobrepõe a área alvo deste estudo. O mesmo identificou a presença de dois *-trends-* de lineamentos magnético-estruturais de caráter regional, seguindo duas direções preferenciais: NW-SE e SW-NE, associados à presença de falhas profundas, que afetam o topo do embasamento gnáissico, e provavelmente a presença de enxames de falhas e/ou fraturas que afetam as rochas suprajacentes ao embasamento.

A profundidade das fontes perturbadoras foi estimada a partir da mudança de gradiente do espectro radial de potência. A mudança de gradiente também corresponde à mudança de comprimento de onda, o que, conseqüentemente, pode caracterizar funções geológicas distintas, pois representam fontes magnéticas distintas. As fontes magnéticas, demarcadas pela mudança de gradiente são as seguintes:

- Fontes magnéticas rasas e ruidos, com comprimentos de onda maiores que 2, com profundidade estimada em aproximadamente 100 metros.
- Fontes magnéticas intermediárias apresentam comprimentos de ondas entre 1,7 e 1 ( $1/K_{unit}$ ). Provavelmente associadas às estruturas sedimentares da Bacia do Paraná representada pela Formação Rio Bonito, com uma profundidade máxima estimada de aproximadamente 250 metros.
- As fontes magnéticas profundas apresentam comprimento de onda menor que 1 ( $1/K_{unit}$ ). Sua profundidade média estimada a partir de 250 metros, e estão possivelmente associadas às estruturas do embasamento metamórfico representado pelos gnaisses da Formação Cambaí. (540 Ma).

Foi identificado e delineado o topo do embasamento magnético a uma profundidade de aproximadamente 250 metros associado às rochas metamórficas representado pelos gnaisses da Formação Cambai.

Fiorite *et al.*, (2014) aplicou métodos de eletrorresistividade e sensoriamento remoto para a determinação do contato litológico na borda do granito Caçapava do

Sul, e identificar lineamentos associados a sistemas de falhas e fraturas. A área de pesquisa abordada neste trabalho está no contato entre a Sequência Metamórfica Vacacaí e o Complexo Granítico Caçapava do Sul, e os resultados foram satisfatórios. O método geoeletrico de eletrorresistividade se mostrou eficiente para a identificação e caracterização geofísica, do mármore em subsuperfície, através da medição de resistividades ao longo de dois perfis com a técnica de Caminhamento Elétrico (CE), e com arranjo Dipolo-Dipolo, no qual foi possível identificar o topo da rocha sã (mármore), caracterizado por valores de resistividade em torno de 3000 ohm.m para as ocorrências de mármore, em um intervalo de profundidades de 50 a 85 metros.

Morais *et al.*, (2015) utilizaram o método de eletrorresistividade, juntamente com informações de sondagens mecânicas no estudo de mármore calcítico, em área próxima e que também pertence a empresa *Calcário Andrezza Ltda.*, localizada a Oeste do município de Vila Nova do Sul, onde, valores de resistividade elétrica em torno de 1000 ohm.m, puderam ser associados a gnaisses com lentes de mármore calcítico, possivelmente alterado.

O trabalho de Ilha (2015), conta com aquisições de dados oriundos dos métodos elétricos e sísmicos em uma área de intensa atividade de extração mineral de mármore dolomítico a Sudeste do município de Caçapava do Sul. Foram adquiridos e processados os dados de três (03) perfis de Caminhamento Elétrico e de um (01) perfil de sísmica de refração, conjunto com Caminhamento Elétrico, perfil A-B. Os dados de resistividades oriundos do Caminhamento Elétrico, possibilitaram identificar contatos de mármore, mármore fraturado e/ou granito, também foram gerados modelos pseudo-3D para um melhor entendimento e visualização. Com o processamento dos dados sísmicos foi gerado o modelo de velocidade final, obtido através da tomografia das ondas refratadas, correspondente ao perfil de aquisição A-B, entre os 50 e os 265 metros, que corroborou com a seção A-B do Caminhamento Elétrico, associado a valores de resistividades em torno de 1200 Ohm.m, identificaram e caracterizaram a presença de camadas espessas de calcário em uma profundidade aproximada de 15 metros.

Machado *et al.*, (2019) utilizaram da integração dos métodos geofísicos Radar de Penetração no Solo (GPR) e Tomografia por Resistividade Elétrica ou Eletrorresistividade (ERT), a fim de verificar as respostas desses aos carbonatos no Parque Paleontológico de São José do Itaboraí – RJ. O método GPR foi utilizado a fim de ser observada a resposta quanto à propagação das ondas eletromagnéticas de

altas frequências nesse meio e reconhecer a estruturas geológicas em profundidade, já o método ERT procurou determinar a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas. Foram obtidas três (03) linhas de aquisição de dados de 120 m, e o estudo apresentou relativa correlação entre as seções radargrama geradas pelas duas antenas com o perfil descrito do poço 2-ITAB-1-RJ. Pode se concluir que em estudos em carbonatos com algumas interfaces que variam com presença de carbonato, areia e aterro, verificados em seções estratigráficas podem ser ou não diferenciadas pelos métodos geofísicos utilizados nesse trabalho. Nas três (03) seções radargrama interpretadas podem ser verificadas as correlações dos dados com descrição litológica do poço que está inserida na linha 01, e nas seções geoeletricas os valores altos de resistividade elétrica acima de 22 ohm.m podem ser associados a concreções associadas aos carbonatos e abaixo desse valor a material de aterro. Os resultados mostram que o uso do método geofísico de eletrorresistividade com o GPR vem a colaborar na identificação de tipos litológicos em subsuperfície para a elaboração do modelo geológico.

Silva (2021) realizou uma pesquisa no terreno São Gabriel, nas proximidades do município de Vila Nova do Sul, com objetivo de contribuir no reconhecimento do arcabouço estrutural em uma região de rocha básica ultrabásica a Noroeste do Escudo Sul-Rio-Grandense aplicando os métodos indiretos de investigação, aerogeofísica e sensoriamento remoto. O trabalho contou com processamento e interpretação de imagens de satélite do Programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security) conjuntamente administrada pela Comunidade Europeia e a ESA, Os Sentinel-2A e 2B formam uma missão imageadora multiespectral. Para este estudo foram selecionadas imagens de satélites da missão Sentinel 2, nível de processamento L1C com resolução de 20 m acessadas e adquiridas através do Sentinel Scientifics Data Hubs no dia 05 de junho de 2020, e dados geofísicos aeromagnetométricos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010) estão disponíveis na biblioteca de dados do GeoSGB (<https://geosgb.cprm.gov.br/>), que resultou na identificação de dois (02) -trends- estruturais, sendo um domínio com direção preferencial NW-SE, com menor frequência de ocorrência, e maior continuidade e extensão, e um domínio NE-SW que apresenta maior frequência de ocorrência, porém geometria menor.

## 6.2 Trabalhos Geológicos

Segundo Hoerlle (2013) os mármore calcíticos de Vila Nova do Sul, pertencentes ao Complexo Cambaizinho no Bloco São Gabriel apresentam uma variedade de domínios mineralógicos derivados de reações formando paragênese específicas devido a interação de fluidos de origem magmática com a rocha encaixante carbonática. O objetivo principal do trabalho é entender a interação entre os mármore calcíticos de Vila Nova do Sul e os fluidos magmáticos e/ou hidrotermais que afetaram essas rochas. O trabalho de campo resultou em mapeamento esquemático, coleta de amostras e dados estruturais, os mesmos serviram para as etapas de petrografia resultando em descrições petrográficas e imagens, análises de Difractometria de Raios-X e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) resultando respectivamente em gráficos com picos relacionados a estrutura cristalina de cada mineral, e imagens de detalhe e composição semiquantitativa de minerais. A predominância de veios de fluorita na pedreira Andrezza e a quase ausência destes na pedreira Mônico (a qual nos dias de hoje também pertence a Andrezza) possivelmente está relacionada a proximidade desta última com riolitos da Formação Acampamento Velho que afloram ao Sul da área. Os fluidos hidrotermais responsáveis pela deposição de veios de fluorita reagiram muito pouco com os mármore pela provável baixa temperatura dos mármore encaixantes posicionados em setores mais rasos da crosta.

## 7 MÉTODOS GEOFÍSICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 7.1 Métodos Geométricos

Os métodos elétricos medem propriedades físicas como condutividade elétrica, resistividade elétrica, cargabilidade, e potencial elétrico natural, em investigações geológicas de subsuperfície, por meio dos métodos de Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo (KEAREY *et. al.*, 2002).

A prospecção elétrica envolve o estudo dos efeitos produzidos pela injeção de uma corrente elétrica no solo ou o estudo da variação de parâmetros elétricos do mesmo, sem a necessidade desta injeção (ORELLANA, 1972). As medições de resistividade e polarizabilidades aparentes geralmente são feitas com sistema de

quatro eletrodos, onde dois (02) injetam uma corrente elétrica no solo e os outros dois (02) medem a diferença de potencial. A distribuição do potencial é função da geometria das estruturas, da resistividade elétrica, da geometria do arranjo e da intensidade da corrente elétrica injetada no solo.

O cientista alemão Georg Simon Ohm estabeleceu em 1827 que a corrente elétrica  $I$  em um fio condutor é proporcional a diferença de potencial  $V$  através dela. A relação linear é expressa pela equação 1:

$$V = R.I \quad (1)$$

onde  $R$  é a resistência do condutor. A unidade de resistência é o Ohm ( $\Omega$ ).

De acordo com (Braga (2006), o método da Eletrorresistividade consiste em empregar uma fonte artificial de corrente ( $I$ ) que é introduzida ao solo por meio de eletrodos pontuais (denominados de  $A$  e  $B$ ). O potencial criado por essa emissão de corrente pode ser medido nas proximidades por meio de eletrodos de medição (denominados  $M$  e  $N$ ). Com a corrente e os potenciais gerados ( $\Delta V$ ), é possível calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) (Eq. 2).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Onde  $K$  é o fator geométrico definido pela geometria dos dipolos  $AB$  e  $MN$  no momento da medida, que é calculado a partir do arranjo dos eletrodos de transmissão e recepção e define a profundidade de investigação (Eq. 3).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (3)$$

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica, e é uma propriedade individual de cada substância, dependente da natureza e estado físico da mesma (KEAREY *et al.*, 2002).

A unidade da resistividade aparente é o (Ohm) x (metro): ( $\Omega.m$ ), a diferença de potencial é medida em miliVolt ( $mV$ ), a intensidade de corrente é medida em miliAmpère ( $mA$ ) e o coeficiente geométrico  $K$  em metros. A profundidade de investigação é diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos.

Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de Caminhamento elétrico (CE) com o arranjo Dipolo-Dipolo com espaçamento de 5 m, e a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), com o arranjo Schlumberger, com uma abertura máxima de  $AB/2$  de 150 m.

### **7.1.1 Caminhamento Elétrico**

A técnica do Caminhamento Elétrico (CE) é aplicada em situações que visam determinar descontinuidades laterais no substrato geológico, tais como diques e/ou soleiras, contatos geológicos, zonas de fraturas e/ou zonas de falhas, corpos mineralizados, identificação e caracterização geofísica de plumas de contaminação no subsolo, etc. (ORELLANA, 1972). As medidas são obtidas na superfície do terreno com deslocamento ao longo de uma seção (linha horizontal) investigando uma ou mais profundidades.

#### **7.1.1.1 Arranjo Dipolo-Dipolo**

De acordo com Borges (2002) no arranjo Dipolo-Dipolo (figura 5), os eletrodos de corrente  $AB$ , e os de potencial  $MN$  são dispostos segundo uma linha, e o arranjo é definido pelos espaçamentos entre os eletrodos  $X = AB = MN$ . A profundidade de investigação aumenta de acordo com a distância entre os eletrodos de potencial e os de corrente  $R$  que teoricamente é correspondente a  $\frac{R}{2}$ . Observação:  $R$ , é a distância que separa, o centro do dipolo emissor  $AB$ , do centro do dipolo receptor  $MN$ . As medidas são feitas para várias profundidades de investigação  $n$ .



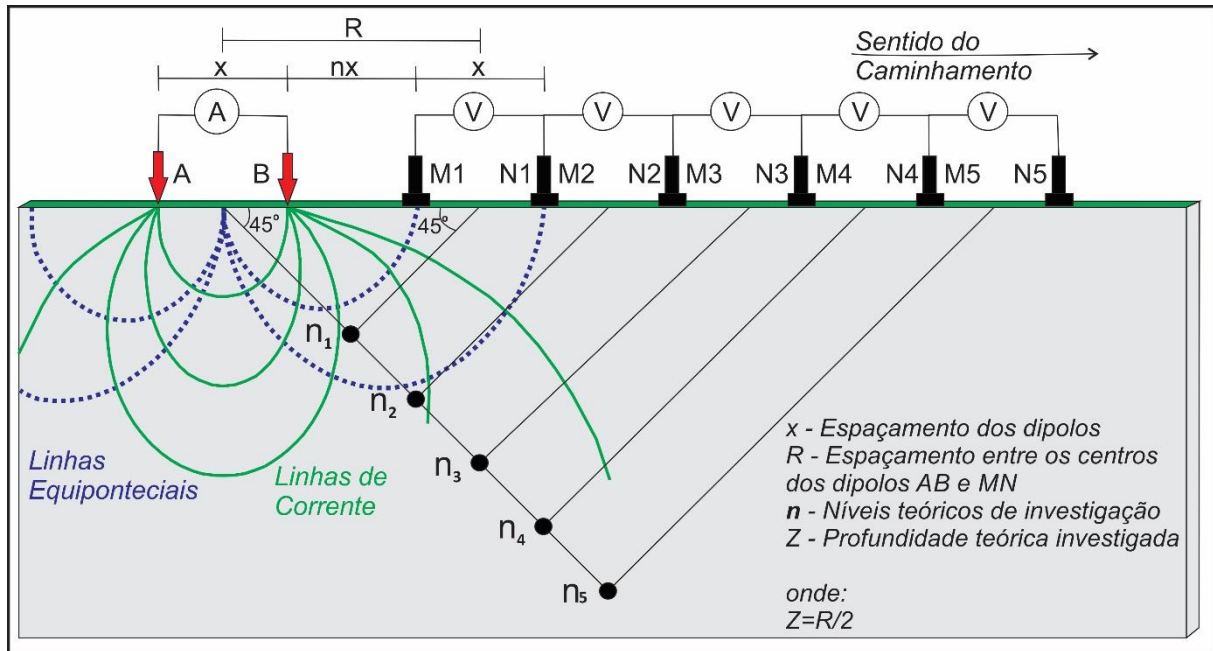


Figura 5 - Técnica de Caminhamento Elétrico utilizando arranjo Dipolo-Dipolo.  
 Fonte: Autor, adaptado de Braga (2006).

## 7.1.2 Técnica da Sondagem Elétrica Vertical

Na Sondagem Elétrica Vertical as medidas são feitas de forma pontual, investigando um ponto na superfície do terreno, segundo a vertical, a diferentes profundidades, e quanto maior a abertura dos eletrodos de emissão de corrente  $AB$ , maior será a profundidade de estudo. Segundo Orellana (1972) a profundidade teórica de estudo alcançada é de aproximadamente  $1/4$  da abertura de  $AB$ .

### 7.1.2.1 Arranjo Schlumberger

No Arranjo Schlumberger (figura 6), os eletrodos de corrente  $A$  e  $B$  apresentam uma separação crescente ( $L$ ) em relação ao centro do arranjo ( $o$ ), os eletrodos de potencial  $M$  e  $N$  permanecem fixo durante a aquisição dos dados. A finalidade deste arranjo é fazer com que a distância " $a$ ", que separa os eletrodos  $M$  e  $N$ , tenda a zero em relação a distância crescente entre  $A$  e  $B$ .

Com as informações de valores da corrente injetada, a diferença de potencial entre os eletrodos  $M$  e  $N$ , e o fator geométrico (função da distância entre os pontos de injeção de corrente e de medida de potencial) determina-se a resistividade aparente do meio ( $\rho_a$ ), através da equação 04 apresentada em Bhattacharya & Patra (1986):

$$\rho_a = \left( \frac{\Delta V_{MN}}{I} \right) K \quad (4)$$

Onde  $K$  é expresso, para esta configuração, pela equação 05:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (5)$$

Onde:

$\overline{AM}$  = distância entre os eletrodos  $A$  e  $M$ ;

$\overline{BM}$  = distância entre os eletrodos  $B$  e  $M$ ;

$\overline{AN}$  = distância entre os eletrodos  $A$  e  $N$ ;

$\overline{BN}$  = distância entre os eletrodos  $B$  e  $N$ ;

Quanto maior for a distância dos eletrodos de corrente ( $A$  e  $B$ ) maior será a profundidade investigada, consequência do comportamento radial da corrente. Entretanto para grandes afastamentos dos eletrodos de corrente ( $A$  e  $B$ ) pode ser necessário o aumento entre a distância dos eletrodos de potencial ( $M$  e  $N$ ) para que seja mantido um potencial mensurável.

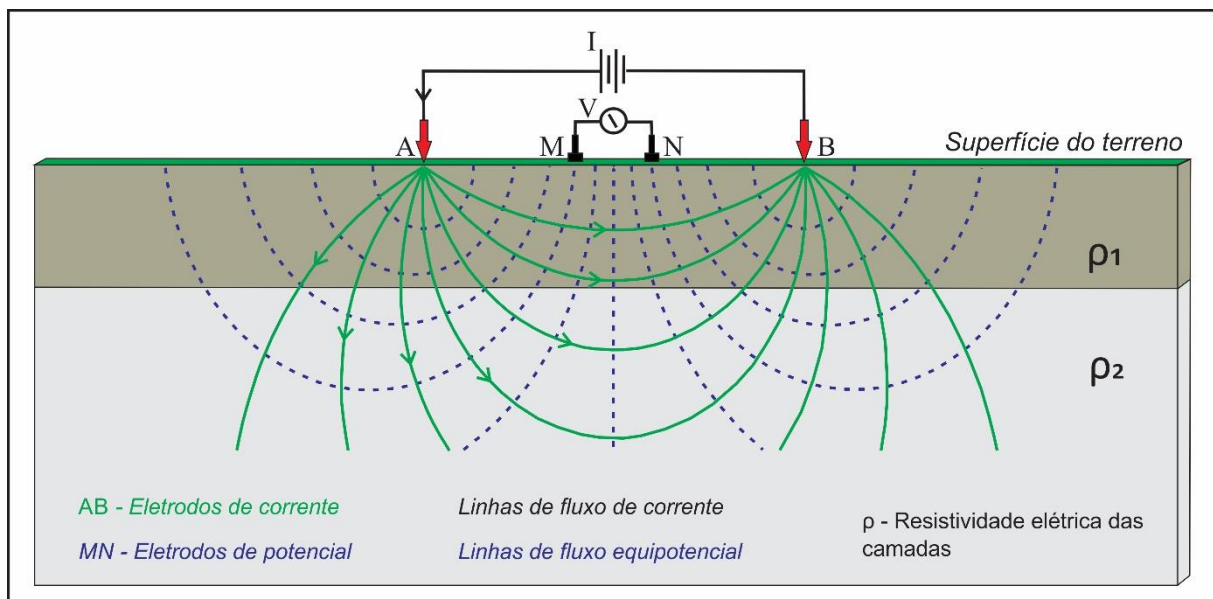


Figura 6 - Técnica de Sondagem Elétrica Vertical utilizando arranjo Schlumberger.  
Fonte: Autor, adaptado de Braga (2006).

### 7.1.3 Propriedades Elétricas dos Solos e Rochas

Um mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, pois são inúmeros os fatores que interferem no valor da resistividade de um determinado material.

Os solos e rochas apresentam propriedades elétricas, que estão ligadas a capacidade do material de permitir ou não a passagem de uma corrente elétrica em seu meio. Os comportamentos destes materiais podem se dividir resumidamente em condutores, que compreende aos materiais que deixam os elétrons fluir livremente por eles, e resistores que são aqueles que oferecem uma dada resistência para os elétrons fluírem livremente dentro deles (TIPLER & MOSCA, 2006).

Segundo Telford (1990) a corrente elétrica pode se propagar em rochas e minerais devido a três mecanismos de condução, que são:

- Condução Eletrônica: Ocorre principalmente em materiais com estrutura homogênea, com alta concentração de portadores de carga (elétrons livres) com elevada mobilidade;
- Condução Eletrolítica ou Iônica: Principal tipo de condução elétrica nas rochas, tendo lugar nos espaços porosos e de maneira secundária entre grãos minerais. A concentração dos íons presentes, valência, mobilidade, e temperatura são as principais variáveis que controlam o fluxo de corrente, através da solução presente nos poros. No arcabouço sólido das rochas, a condução tem lugar de acordo com as propriedades dos minerais que o formam;
- Condução Dielétrica: Ocorre em meios isolantes ou fracos condutores, onde existam pouco ou nenhum elétron livre. Sobre a influência de um campo elétrico externo, os elétrons são deslocados rapidamente do núcleo; esta rápida separação de cargas positivas e negativas é conhecida como corrente de deslocamento.

Schön (2004) comenta que solos com texturas mais finas tendem a conduzir melhor a corrente elétrica. A argila, por exemplo, conduz melhor a corrente do que a areia, devido às características do sistema de suas partículas que mantém a água por adesão (em situações em que o eletrólito apresenta baixa concentração de sais). E em rochas cristalinas (pouco porosas) a resistividade elétrica normalmente é alta, no entanto, se esta rocha estiver muito fraturada, a água que circula através das fraturas contendo sais minerais dissolvidos diminuirá bastante a resistividade da rocha. Portanto, as rochas e principalmente os solos, são meios passíveis de grandes

variações laterais e verticais de propriedades físicas e químicas, as quais se refletem nos valores da resistividade. A figura 7 apresenta exemplos desta ampla variação nos valores de resistividade elétrica.

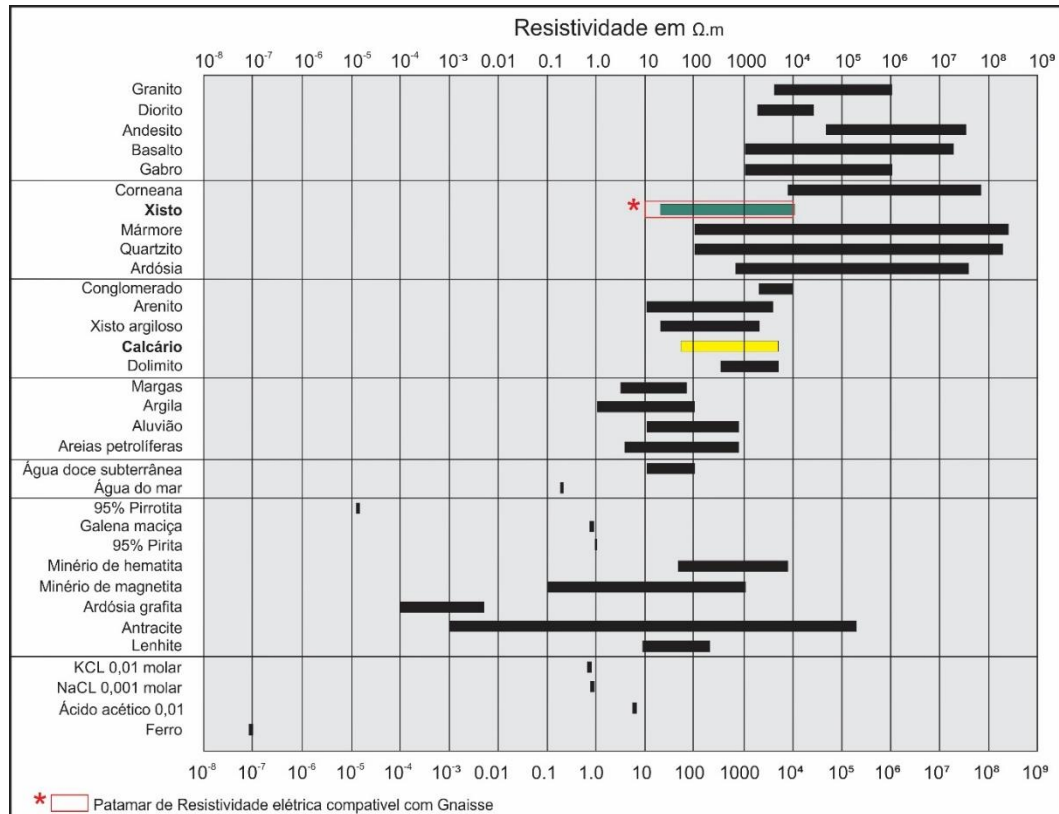


Figura 7 - Valores típicos de resistividade elétrica em algumas rochas, minerais e soluções aquosas, Segundo Keller & Frischknecht (1966); Daniels & Alberty (1966); Telford et al., (1990).  
Fonte: Autor, adaptado de Loke (2004).

## 7.2 Magnetometria

O Comportamento magnético dos materiais terrestres parece ter sido primeiro observado pelos chineses, séculos a.C. A noção de que a própria terra se comporta como um ímã, entretanto, só foi apresentada, segundo uma base científica em 1600 por William Gilbert.

O uso de medidas magnetométricas em prospecção mineral baseia-se em que, concentração de minerais magnéticos presentes nas rochas da crosta produzem distorções locais nos elementos do campo magnético da terra, onde esses elementos são a intensidade, declinação e inclinação.

Magnetometria foi um dos primeiros métodos a ser empregado em prospecção mineral. As primeiras medidas sistemáticas datam de 1640 e foram realizadas na

Suécia, na detecção de depósitos de ferro, essas medidas consistiam na observação da variação da declinação magnética com bússolas náuticas. Em 1870 o método de observação foi aperfeiçoado com a construção de instrumentos capazes de medir variações das componentes horizontal e vertical do campo magnético e da sua inclinação (LUIZ e SILVA, 1995). Atualmente medidas muito precisas da intensidade do campo e suas componentes são realizadas com instrumentos conhecidos como magnetômetros.

O campo magnético medido na superfície da Terra é resultado do conjunto constituído pelo campo magnético terrestre, procedente do núcleo líquido da Terra, pelos campos magnéticos externos, provenientes das flutuações magnéticas causadas por correntes elétricas produzidas na ionosfera e tempestades solares, e pelo campo magnético anômalo, oriundo da magnetização dos minerais presentes nas rochas. Conforme ilustra a figura 8, o campo magnético terrestre é definido pela sua magnitude ( $F$ ), inclinação ( $I$ ), que é o ângulo entre a superfície da Terra e o vetor ( $F$ ), e declinação ( $D$ ), que é o ângulo entre a componente horizontal do vetor ( $F$ ) e o Norte geográfico. Em adição a estes elementos, o campo magnético possui uma componente vertical ( $Z$ ) e duas componentes horizontais ( $X$  e  $Y$ ), consideradas positivas para o Norte ( $N$ ) e Leste ( $E$ ) geográfico (TELFORD *et al.*, 1990).

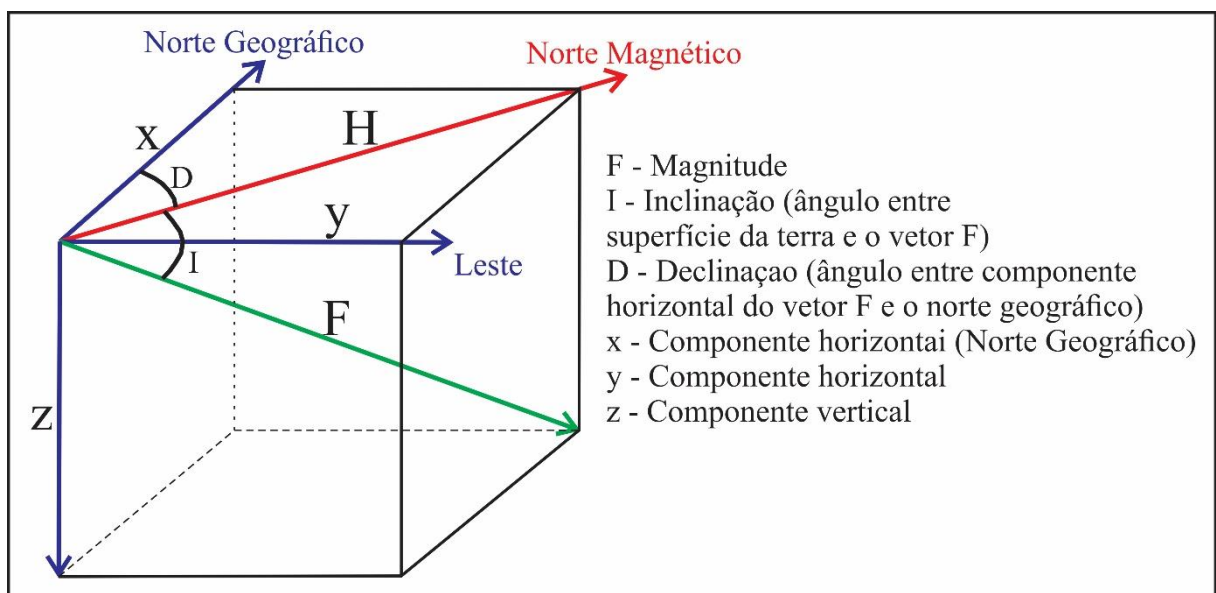


Figura 8 - Componentes do campo geomagnético da Terra.  
Fonte: Autor, adaptado de Lowrie (2007).

A susceptibilidade magnética é a propriedade física que determina a facilidade de um material sofrer ou não magnetização. Quanto maior a susceptibilidade

magnética, maior será sua resposta a aplicação de um campo magnético. A magnetização depende diretamente da susceptibilidade magnética e do campo magnético seguindo a equação 6:

$$M = k.H \quad (6)$$

Onde  $M$  é a magnetização induzida,  $k$  é a susceptibilidade magnética e  $H$  é o campo magnético.

### 7.2.1 Magnetismo das Rochas

Em rochas básicas e ultrabásicas existe grande quantidade de minerais ferromagnéticos, principalmente a magnetita, tornando alta a susceptibilidade dessas rochas. A figura 9 mostra como a susceptibilidade das rochas é muito variável, e os intervalos de valores podem se sobrepor em diferentes litologias. A presença de magnetita em uma rocha tende a ser inversamente proporcional ao grau de acidez, ou seja, a quantidade de magnetita em uma rocha tende a diminuir com o aumento do grau de acidez da rocha, desta forma rochas ácidas são menos magnéticas que rochas básicas (KEAREY *et al.*, 2009).

Os minerais formadores de rocha mais comuns exibem uma susceptibilidade magnética muito baixa, e as rochas devem seu caráter magnético geralmente a uma proporção baixa de minerais magnéticos presentes em sua composição.

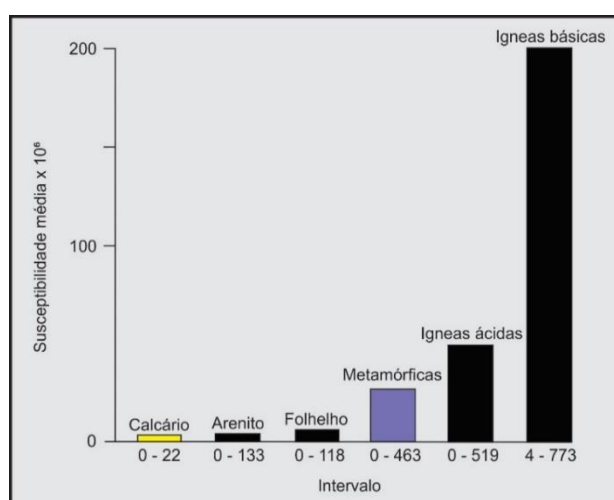


Figura 9 - Valores médios e intervalos de susceptibilidade de tipos de rochas mais comuns. Fonte: Autor, adaptado de Kearey *et al.*, (2009).

A susceptibilidade magnética é um parâmetro importante na classificação dos materiais pelo seu comportamento magnético. Os três principais grupos de comportamentos magnéticos são ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo.

Os minerais diamagnéticos correspondem ao tipo mais fraco de resposta magnética, caracterizado por susceptibilidade negativa. Como exemplos pode-se citar: Calcita, Halita, Quartzo, etc. Os paramagnéticos apresentam momentos magnéticos intrínsecos que não interagem entre si, apresentando por isso magnetização nula. Quando há aplicação de um campo magnético externo haverá alinhamento dos dipolos na direção do campo magnético, nestes materiais a susceptibilidade magnética será positiva, mas fraca. Entre os minerais paramagnéticos tem-se: Anfibólios, Olivinas, Piroxênios e Silicatos. Os ferromagnéticos apresentam momentos de dipolo magnético intrínsecos altamente interagentes que se alinham paralelamente entre si. O módulo da magnetização é várias ordens de grandeza maior do que em materiais diamagnéticos e paramagnéticos. Entre os principais minerais ferromagnéticos tem-se: Magnetita, Hematita, Pirrotita e Ilmenita (RIBEIRO, 2000) e (DUNLOP & ÖZDEMIR, 1997). A magnetização diminui com o aumento de temperatura. A temperatura a partir da qual um material ferromagnético passa a ser paramagnético é denominada temperatura de Curie (ARAÚJO, 2009).

## **8 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS**

### **8.1 Aquisição dos dados**

Os dados de Eletrorresistividade terrestres são oriundos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamentos Elétricos (CE) realizados diretamente na área da mina Cerro da Cadeia. Já os dados magnetométricos são frutos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010), disponíveis no banco de dados do GeoSGB.

O equipamento utilizado na aquisição dos dados geoeletricos foi o Syscal Pro, (Iris Instruments – França), acompanhado dos seguintes acessórios: Quatro (04) cabos elétricos multieletrodos com 90 metros de comprimento e conexão para ligar os eletrodos a cada 5 metros; duas (02) caixas comutadoras para interligar os multicabos;



Setenta e dois (72) eletrodos metálicos acompanhados de cabos com *plugs* para conexão ao multicabo; dois (02) cabos elétricos de 350 metros; dois (02) cabos elétricos de 175 metros; trenas e marretas conforme quadro ilustrado na (figura 10).

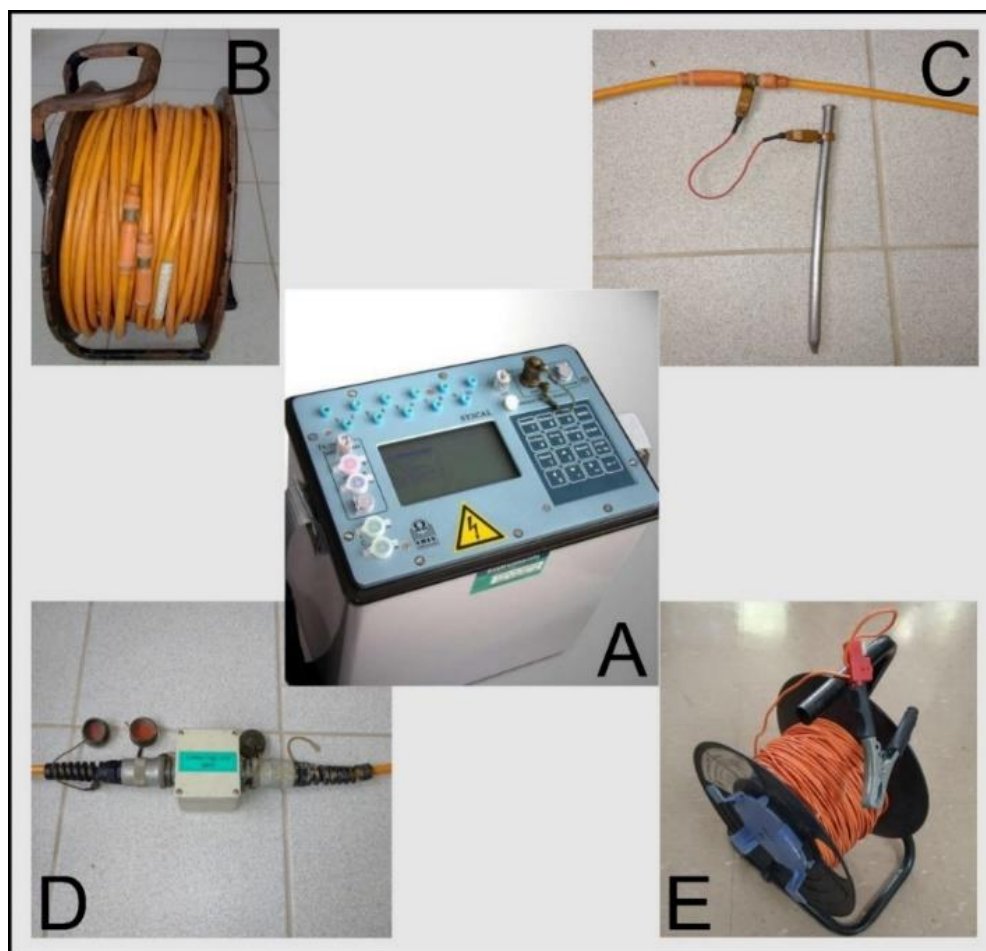


Figura 10 - Equipamento de eletrorresistividade: A) Syscal PRO; B) Cabo elétrico multieletrodo utilizado no CE; C) Eletrodo metálico e *plug* de conexão ligado ao cabo multieletrodo; D) Caixa comutadora para conexão entre os cabos multieletrodos; E) Cabo elétrico utilizado na SEV.  
Fonte: Autor (2023).

Na aquisição de dados geoeletricos foram empregadas as técnicas de SEV utilizando o arranjo Schlumberger com o espaçamento máximo de  $AB/2 = 150$  m, e CE com o arranjo Dipolo-Dipolo, utilizando uma abertura de eletrodos de 5 m e linhas de 360 m. A figura 11 mostra um pouco da aquisição dos dados geoeletricos.





Figura 11 - Aquisição de dados de campo: Quadro A) SEVs 04 e 12; Quadro B) Aquisição de dados da linha 03 de Caminhamento Elétrico.  
Fonte: Autor (2023).

As campanhas de campo totalizaram a aquisição de doze (12) SEV, onde as SEVs de (01 a 06) foram distribuídas e alinhadas de maneira a formar um perfil SW/NE, e as SEVs de (07 a 12) formam um perfil NW/SE, sendo a SEV\_03 um ponto em comum em ambos os perfis, conforme ilustrado na figura 12.



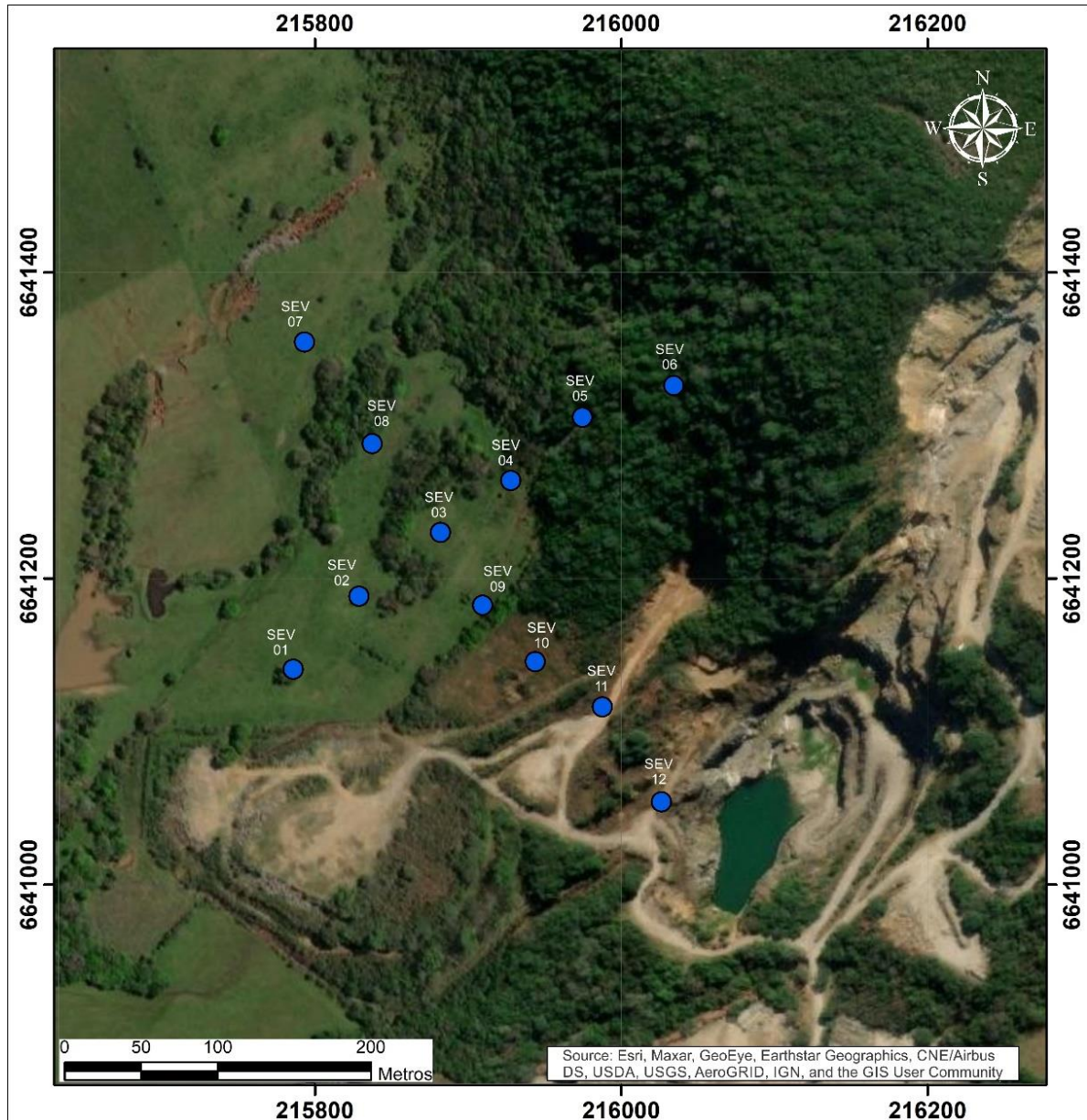


Figura 12 – Localização dos pontos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

Após as campanhas de SEV, foi realizada uma última campanha para aquisição de 3 linhas de Caminhamento Elétrico com a finalidade de integrar e acrescentar informação aos perfis propostos inicialmente pelo alinhamento dos pontos de SEV e dos furos de sondagem mecânica. A linha CE\_01 tem direção SW-NE, a linha CE\_02 com direção NW-SE e a linha CE\_03 com direção SSW-NNE, conforme ilustrado na figura 13.

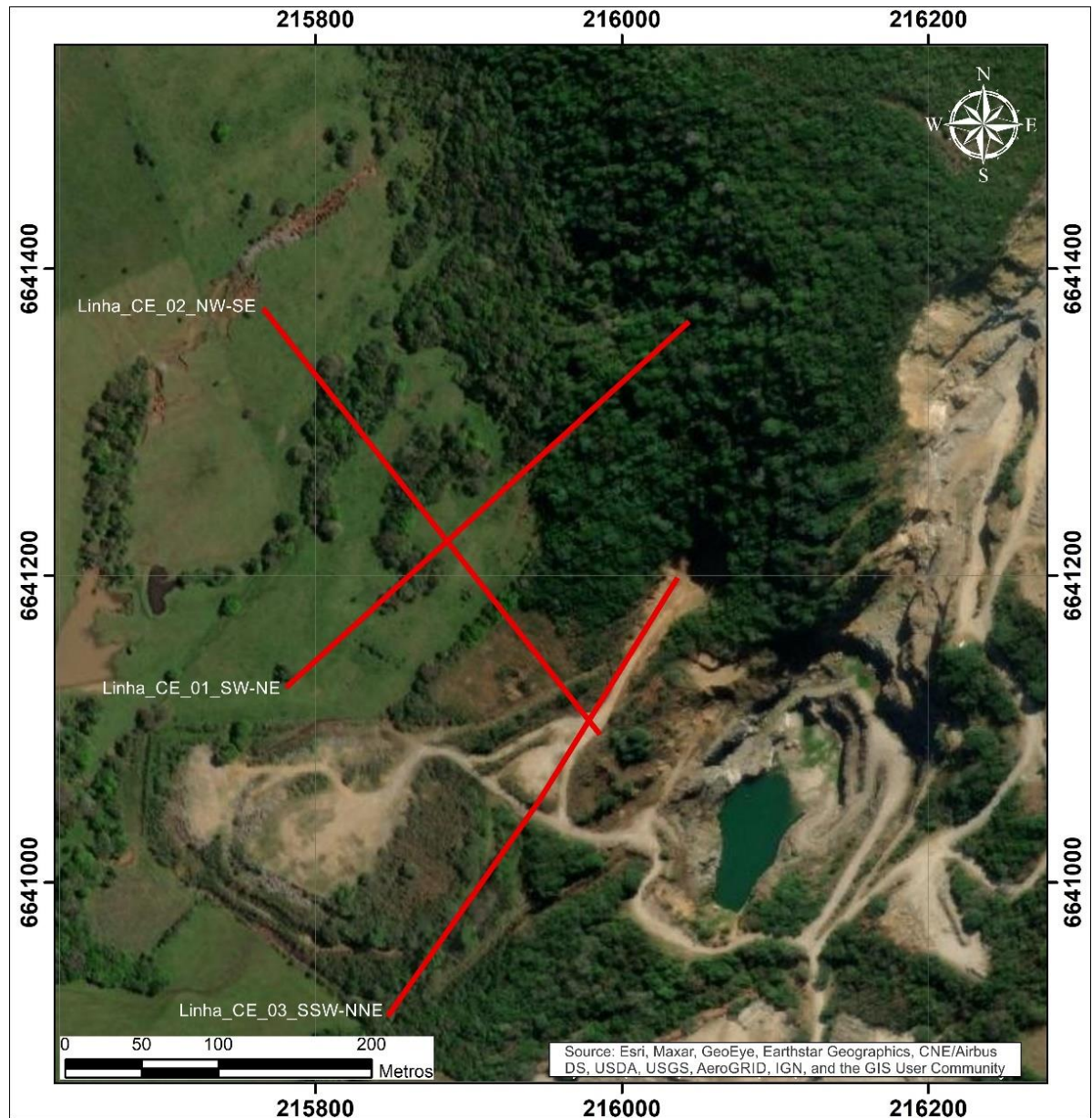


Figura 13 – Localização das linhas de Caminhamento Elétrico.

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

Entre as campanhas de campo, em visita ao escritório da empresa *Calcário Andrezza Ltda.*, se obteve acesso a uma planilha contendo uma descrição litológica simplificada com amostragem a cada 0,5 m de profundidade, e a localização em coordenadas UTM de cinquenta (50) sondagens mecânicas realizadas na área de estudo. As descrições são as seguintes:

- “Terra” a qual vamos tratar como Solo - (Manto de alteração composto por solo siltito argiloso, evoluindo em profundidade níveis de regolito a saprólito);
- Gnaisse;



- “Calcário” a qual substituímos por um termo mais adequado para a área, e chamamos de Mármore Calcítico;
- Misturada - (zona de transição, com pequenas intercalações entre o mármore calcítico, e o gnaiss).

Após análise das descrições litológicas e localização das sondagens, foram selecionados para integrar a este trabalho vinte e seis (26) sondagens localizadas conforme (figura 14). Os principais critérios para escolha, foi a proximidade com os pontos de SEV e de CE, visando correlacionar os resultados geofísicos com a geologia, e a ocorrência de camadas de mármore.

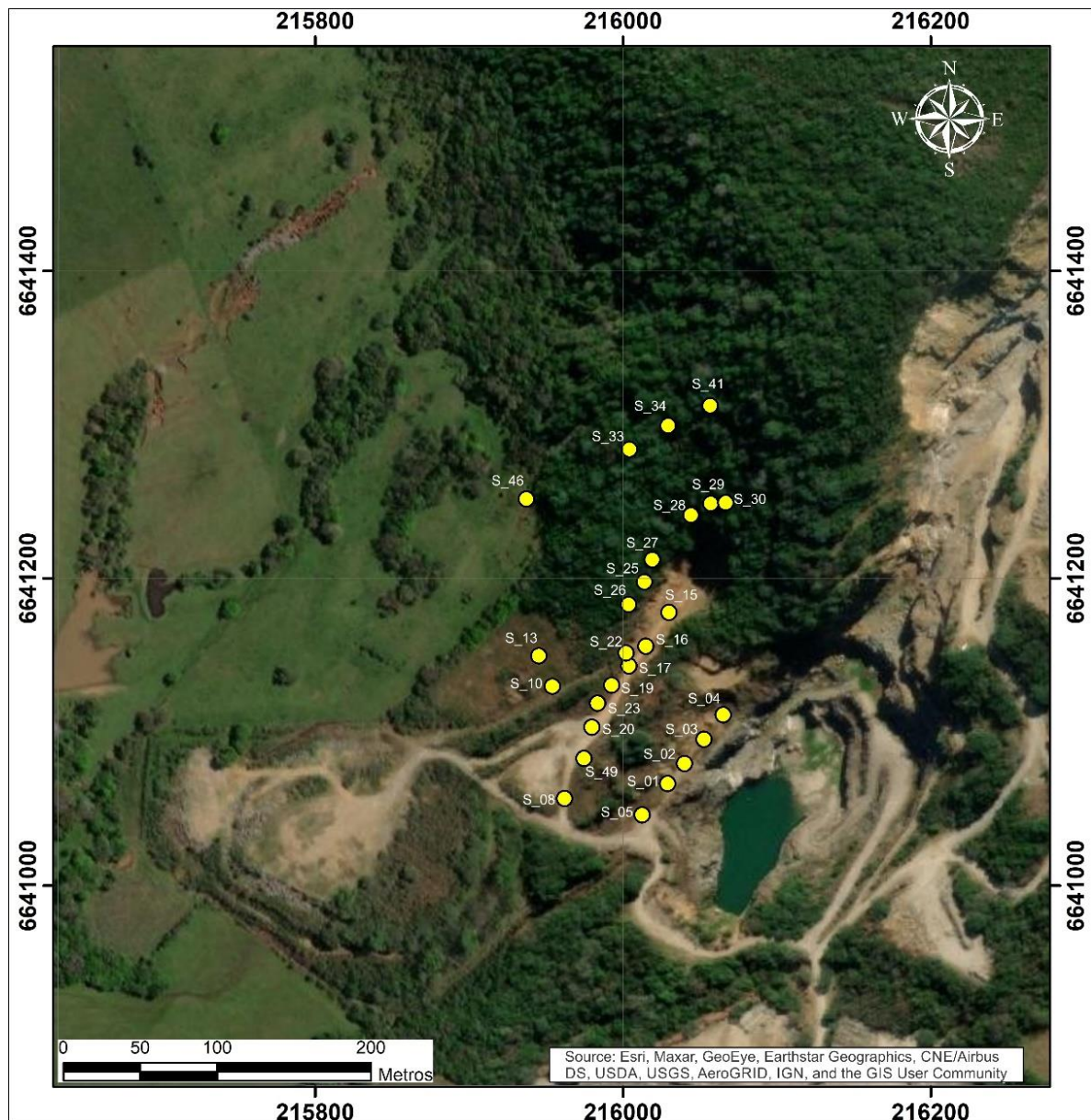


Figura 14 – Localização das sondagens mecânicas realizadas na área de estudo.

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

A tabela 2 é resultado da análise dos *logs* gerados para cada sondagem, onde: A coluna “Pto” corresponde ao número da sondagem; “Hc” corresponde a espessura das camadas; e “Lito” corresponde a descrição litológica simplificada para cada uma das camadas compostas por: Solo (Sl), Gnaisse (Gn), Mármore (Marm) e Misturada (Mist). A mesma apresenta a sequência dos furos de sondagem dispostos em cada uma das linhas de Caminhamento Elétrico (CE), e os furos presentes em dois perfis gerados a partir de algumas sondagens alinhados em sequência com direção SW-NE.

Tabela 2 – Descrição litológica das sondagens.

<b>Sondagens presentes na Linha CE_01_SW-NE</b>										
Pto	Hc1	Hc2	Hc3	Hc4	Hc5	Lito 1	Lito 2	Lito 3	Lito 4	Lito 5
46	26	13	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
33	27	12	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
34	23,5	15,5	-	-	-	Sl	Mist	-	-	-
41	14,5	18,5	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
<b>Sondagens presentes na Linha CE_02_NW-SE</b>										
46	26	13	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
13	25,5	4,5	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
10	18	12	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
20*	10,5	19,5	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
<b>Sondagens presentes na Linha CE_03_SSW-NNE</b>										
8	15	15	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
49*	21	10	5	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
23*	8	23	5	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
19	6	8	22	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
17	7,5	13,5	6	-	-	Sl	Marm	Gn	-	-
22*	9	2	4	13	-	Sl	Gn	Mist	Marm	-
16	7	5	15	-	-	Sl	Marm	Gn	-	-
15	3	27	-	-	-	Sl	Gn	-	-	-
<b>Sondagens presentes no Perfil S-I_SW-NE</b>										
5	5	23	2,5	5,5	-	Sl	Gn	Marm	Gn	-
1*	18,5	14,5	3	-	-	Gn	Marm	Gn	-	-
2*	16	3	12	1,5	3,5	Gn	Mist	Gn	Marm	Gn
3*	6,5	2	11,5	3	13	Mist	Marm	Gn	Marm	Gn
4*	10	5	5	16	-	Marm	Gn	Marm	Gn	-
<b>Sondagens presentes no Perfil S-II_SSW-NNE</b>										
26	30,5	5,5	-	-	-	Gn	Marm	-	-	-
25*	12	3,5	3,5	9	8	Sl	Gn	Marm	Gn	Marm
27	9	21,5	8,5	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
28	6	15	3	15	-	Sl	Gn	Mist	Marm	-
29	9	16	14	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
30	9	9	6	3	6	Sl	Gn	Marm	Mist	Marm
<b>Sondagens presentes no Perfil S-III_SW-NE</b>										
49*	21	10	5	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-

23*	8	23	5	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
19	6	8	22	-	-	Sl	Gn	Marm	-	-
17	7,5	13,5	6	-	-	Sl	Marm	Gn	-	-
22*	9	2	4	13	-	Sl	Gn	Mist	Marm	-
16	7	5	15	-	-	Sl	Marm	Gn	-	-

Fonte: Autor (2023). Extraído da tabela de descrição de furos de sondagens disponibilizada por Calcário Andrezza.

\*Este furo contém muitas intercalações entre Gnaiss, Mármore e Misturada, para a confecção desta tabela foi realizada uma avaliação visual dos logs das sondagens e definidas espessuras significativas para cada litologia.

Os dados magnetométricos do Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010) estão disponíveis na biblioteca de dados do GeoSGB (<https://geosgb.cprm.gov.br/>). Os parâmetros técnicos que definiram a execução do levantamento dos dados aeromagnetométricos são descritos conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de execução do aerolevanteamento magnetométrico.

Direção das linhas de voo	N-S
Espaçamento entre as linhas de voo	500 metros
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	10 km
Altura média de voo	100 metros
Intervalo de amostragem	0,1 segundo, que equivale a uma distância aproximada de 7 a 8 metros

Fonte: Autor (2023). Extraído de Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul (CPRM, 2010).

Os dados magnetométricos depois de coletados são submetidos a correções que incluem a eliminação de variações devido a causas não geológicas, como a variação diurna e efeitos geológicos indesejáveis como interferência entre fontes rasas e profundas. O arquivo de dados utilizado neste trabalho já conta com essas correções, e apresenta os dados do Campo Magnético Anômalo (CMA), já reduzidos do IGRF (*Internacional Geomagnetic Reference Field*).

Após fazer o download dos mesmos, foi utilizado o software *Geosoft da Oasys Montaj* para fazer um recorte de caráter regional contemplando seis (06) linhas de voo (figura 15), suficientes para uma caracterização dos principais lineamentos magnéticos que controlam a tectônica da área de estudos, e também diferenciar zonas de altos e baixos valores de susceptibilidade magnética.

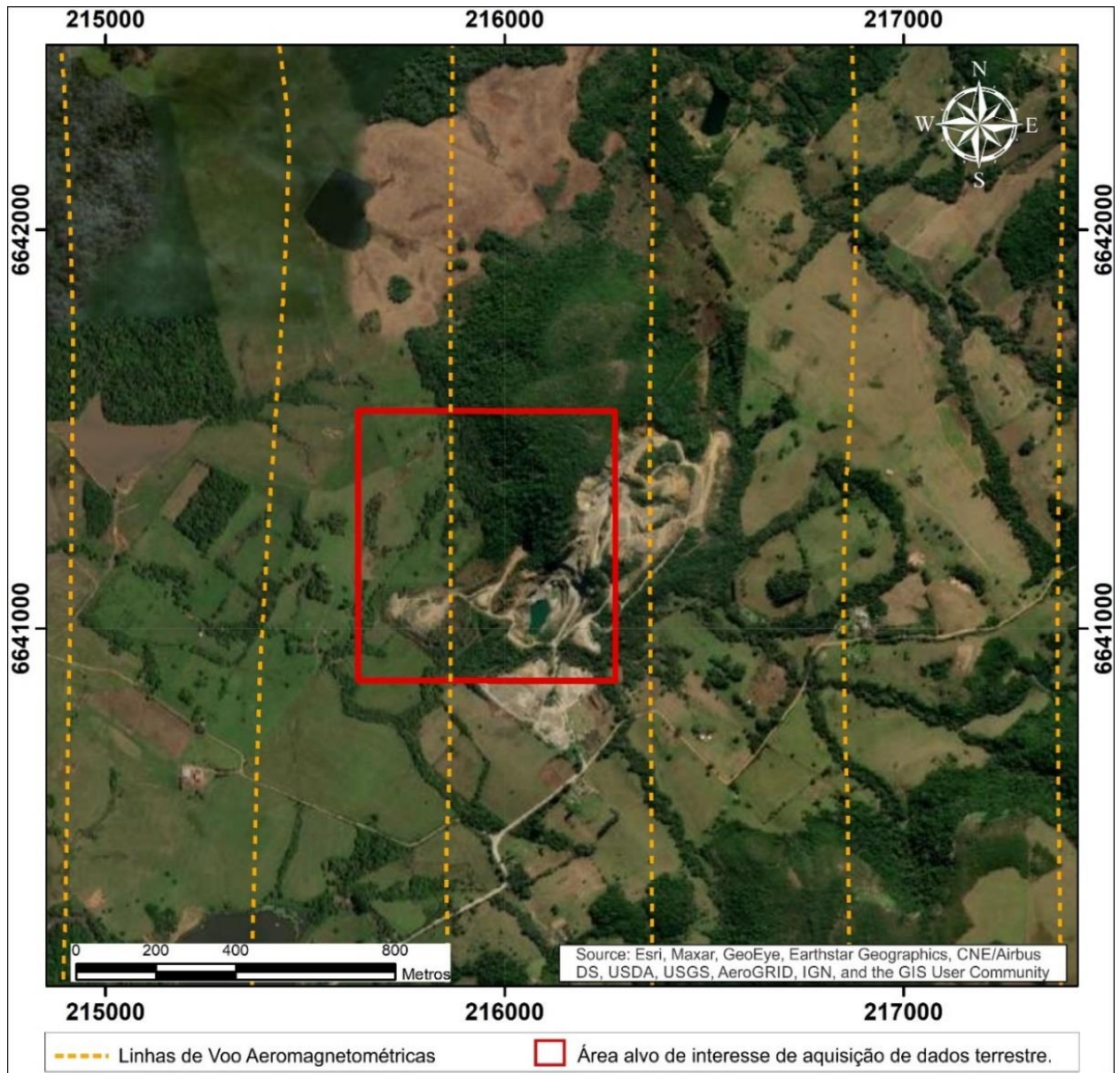


Figura 15 - Localização das linhas de Voo dos dados Aeromagnetométricos para caracterização regional da área de estudo.

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

No total a integração de dados contou localmente com doze (12) pontos de Sondagem Elétrica Vertical, três (03) linhas de Caminhamento Elétrico e descrição de vinte e seis (26) sondagens mecânicas, conforme ilustrado na (figura 16). Além de um recorte de dados aeromagnetométricos de caráter regional.



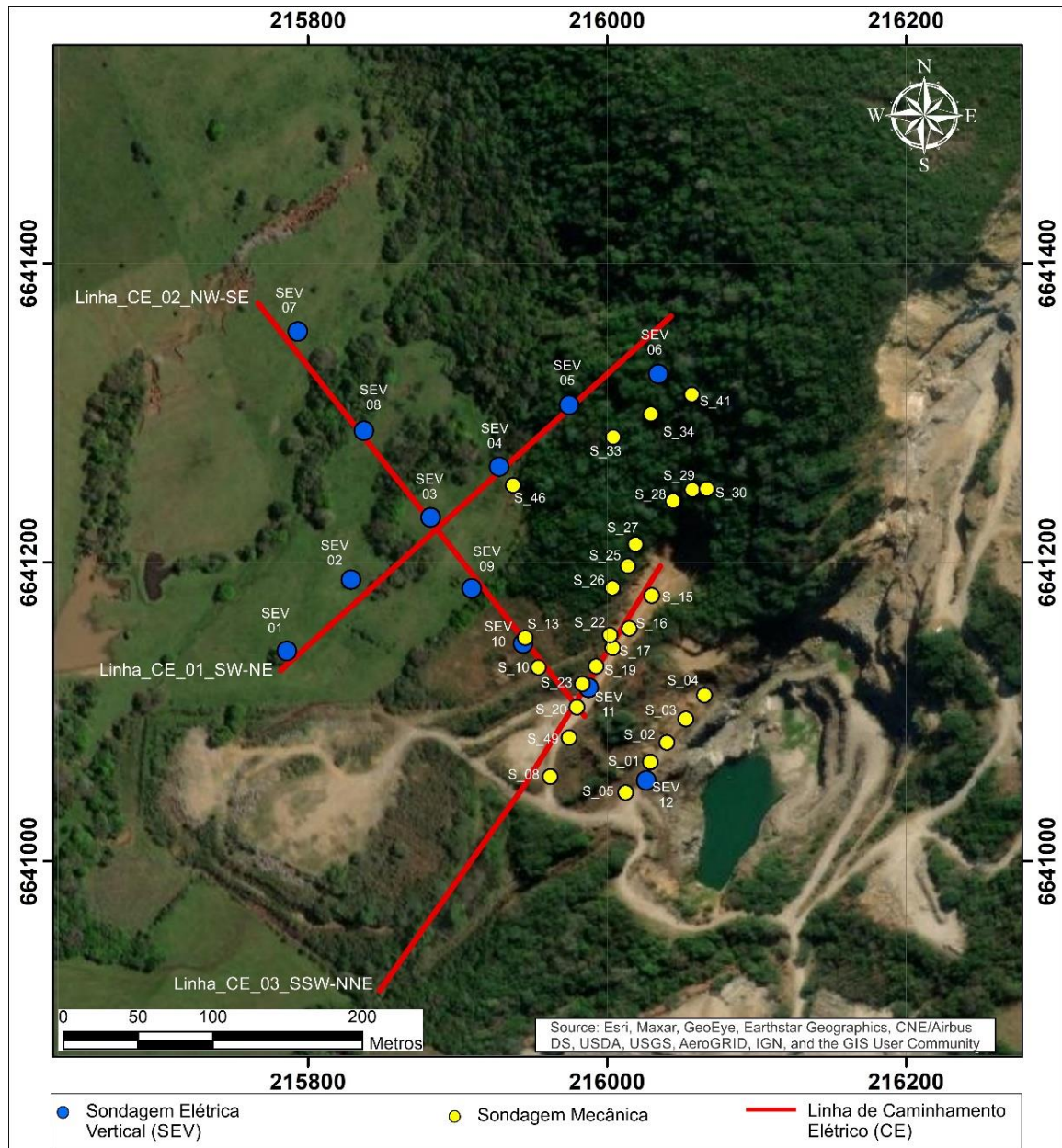


Figura 16 - Localização integrada dos dados de campo.

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

## 8.2 Processamento dos dados

Para calcular a distribuição de resistividade elétrica no subsolo serão utilizados programas que auxiliam algoritmos de inversão para realizar os cálculos e as estimativas geométricas dos modelos para os dados de resistividade elétrica medidos em campo.



## 8.2.1 Sondagem Elétrica Vertical

No caso da SEV as curvas de resistividade aparente obtidas em campo, em função da distância  $AB/2$  se ajustam mediante um algoritmo matemático visando encontrar um modelo de camadas de resistividade e/ou cargabilidade elétrica em função da profundidade (1D), cuja resposta de resistividade aparente seja correlacionável com os dados observados no campo. Para a inversão dos dados da SEV utilizou-se o programa *IP12win versão 3.1.2* desenvolvido pela Moscow State University (BOBACHEV, 2002).

As figuras 17 e 18 apresentam os modelos estimados para as curvas de resistividade aparente correspondentes as SEV de 1 a 6, e de 7 a 12 respectivamente.

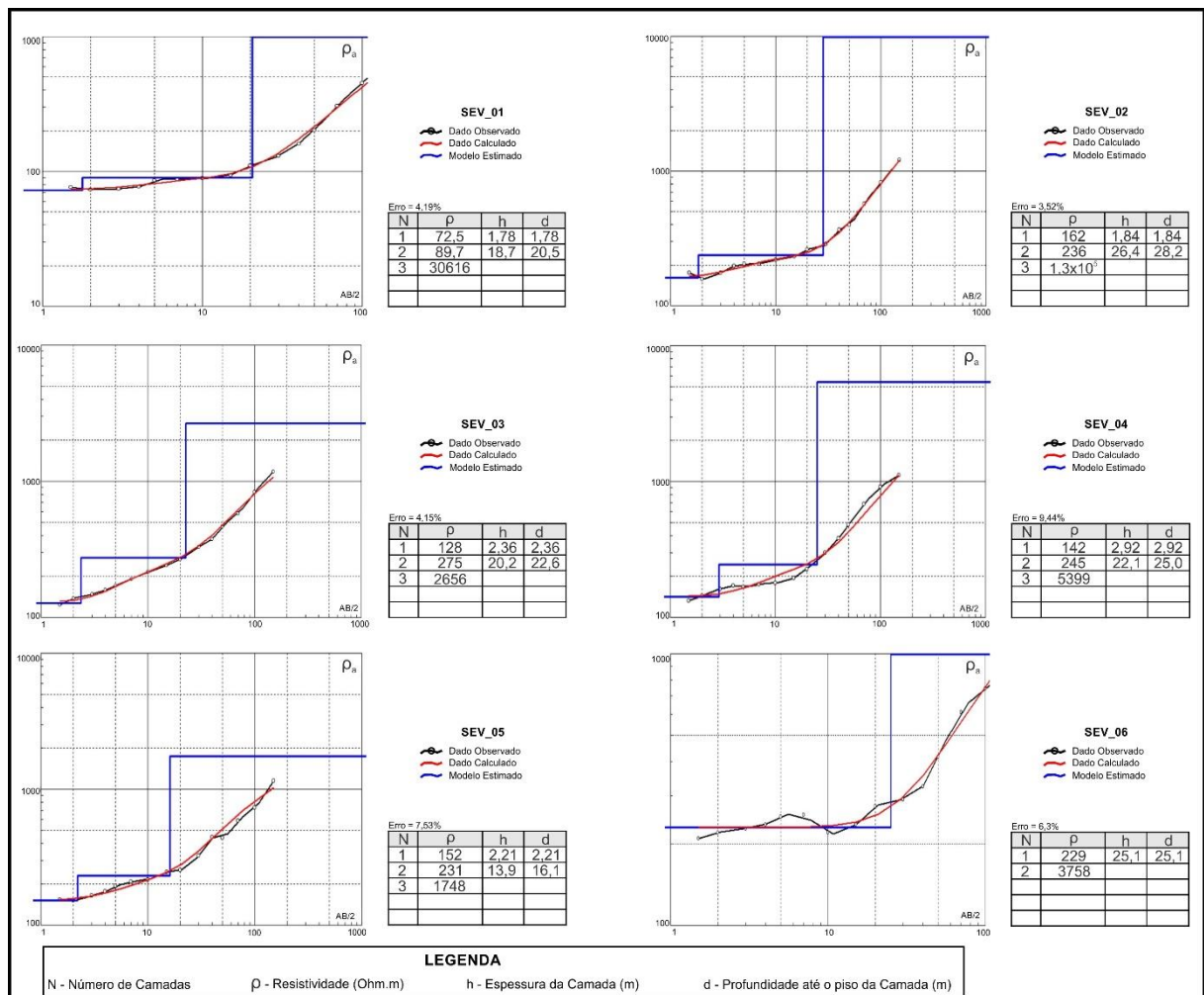


Figura 17 - Modelos estimados para as curvas de resistividades aparentes correspondentes as SEVs 01 a 06.

Fonte: Autor (2023).

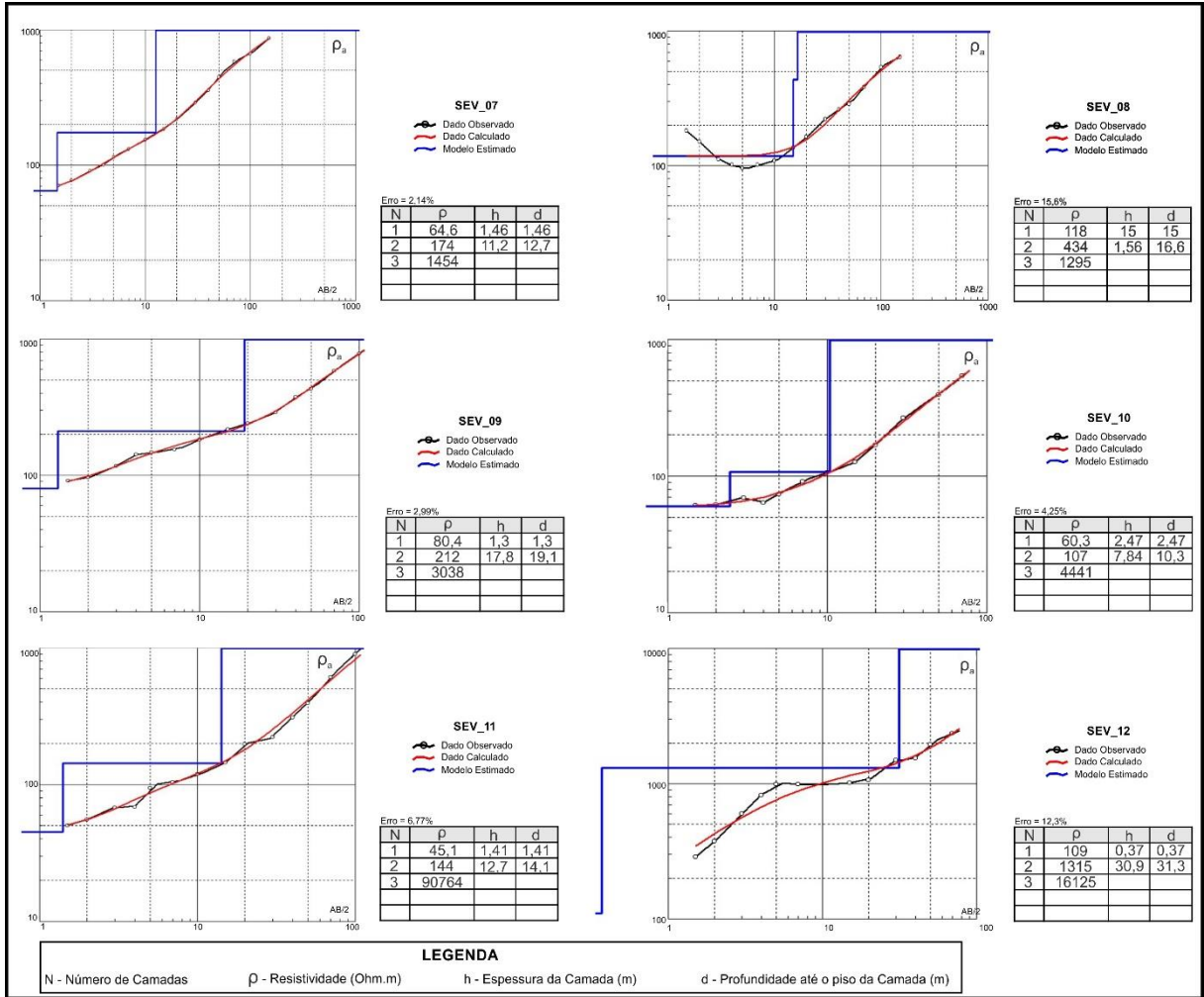


Figura 18 - Modelos estimados para as curvas de resistividades aparentes correspondentes as SEVs 07 a 12.

Fonte: Autor (2023).

A partir da análise dos gráficos de resistividade gerados pelo programa “IP2win” foi feita uma análise morfológica das curvas de campo, onde foram classificadas com base no número de camadas segundo a classificação de Orellana (1972) conforme figura 19.

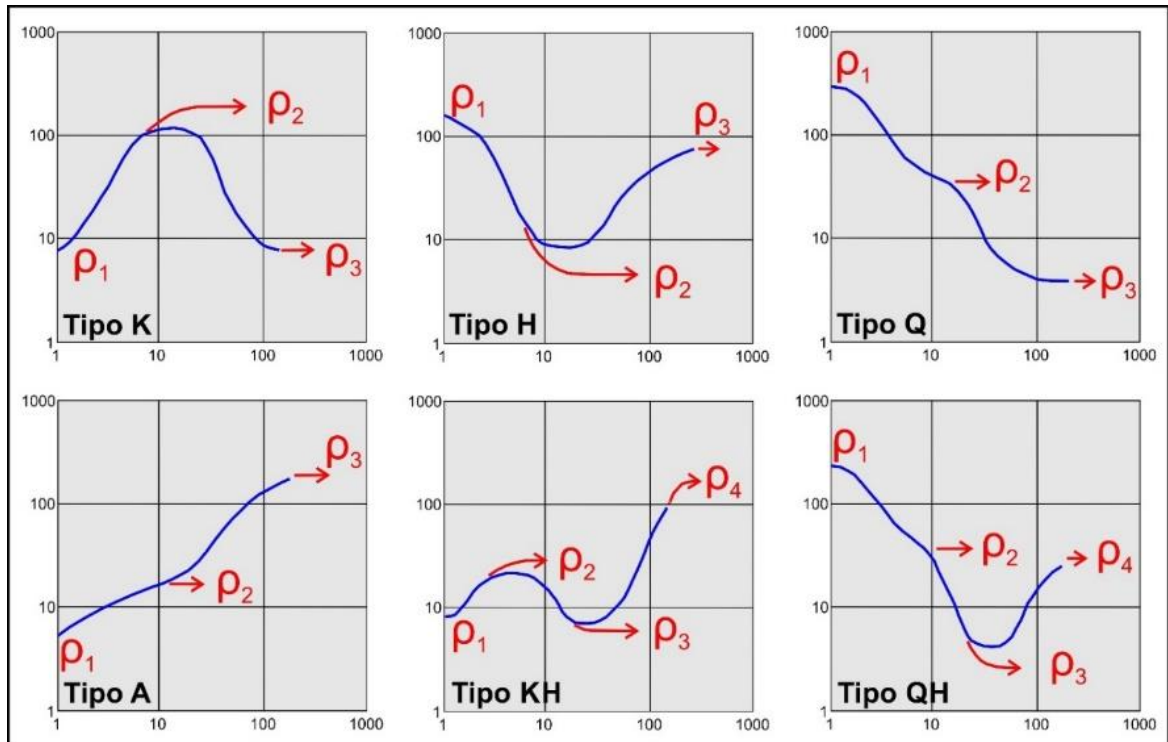


Figura 19 - Morfologia dos principais tipos de seções geoeétricas.  
Fonte: Adaptado de Orellana (1972).

A análise morfológica é uma etapa importante da interpretação dos dados de SEV. As SEV foram classificadas em função do número de camadas identificadas de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 – Classificação morfológica dos tipos de SEV conforme comportamento e número de camadas.

Tipo da SEV	Número de Camadas	Comportamento da SEV
<b>Ascendente</b>	2	$p_1 < p_2$
<b>Descendente</b>	2	$p_1 > p_2$
<b>K</b>	3	$p_1 < p_2 > p_3$
<b>H</b>	3	$p_1 > p_2 < p_3$
<b>A</b>	3	$p_1 < p_2 < p_3$
<b>Q</b>	3	$p_1 > p_2 > p_3$
<b>KH</b>	4	$p_1 < p_2 > p_3 < p_4$
<b>QH</b>	4	$p_1 > p_2 > p_3 < p_4$

Fonte: Autor, adaptado de Orellana (1972).

A análise morfológica das SEV resultou em:

- 1 SEV de duas camadas do *Tipo Ascendente*;
- 11 SEV de três camadas do *Tipo A*.

A partir dos modelos gráficos gerados para as SEV, foi confeccionada a tabela 5, contendo: O número de cada SEV (NºSEV); valores de resistividade das camadas ( $\rho$ ); espessura das camadas ( $h$ ) e Profundidade até o piso da última camada ( $d^*$ ).

Tabela 5 – Resistividades ( $\rho$ ) e espessuras ( $h$ ) das camadas conforme os modelos geoeletricos obtidos para as SEVs realizadas na área da Mina Cerro da Cadeia.

<b>Nº SEV</b>	<b><math>\rho_1</math></b>	<b><math>\rho_2</math></b>	<b><math>\rho_3</math></b>	<b><math>h_1</math></b>	<b><math>h_2</math></b>	<b><math>h_3</math></b>	<b><math>d^*</math> Total</b>
1	72,5	89,7	30616	1,78	18,7	-	20,5
2	162	236	130000	1,84	26,4	-	28,2
3	128	275	2656	2,36	20,2	-	22,6
4	142	245	5399	2,92	22,1	-	25
5	152	231	1748	2,21	13,9	-	16,1
6	229	3758	-	25,1	-	-	25,1
7	64,6	174	1454	1,46	11,2	-	12,7
8	118	434	1295	15,0	1,56	-	16,6
9	80,4	212	3038	1,3	17,8	-	19,1
10	60,3	107	4441	2,47	7,84	-	10,3
11	45,1	144	90764	1,41	12,7	-	14,1
12	109	1315	16125	0,37	30,9	-	31,3

Fonte: Autor (2023).

### 8.2.2 Descrição das Sondagens

A partir das descrições presentes na tabela em formato *Excel* disponibilizada pela empresa *Calcário Andrezza Ltda.*, foi confeccionado os “logs” das sondagens conforme exemplo ilustrado na figura 20.

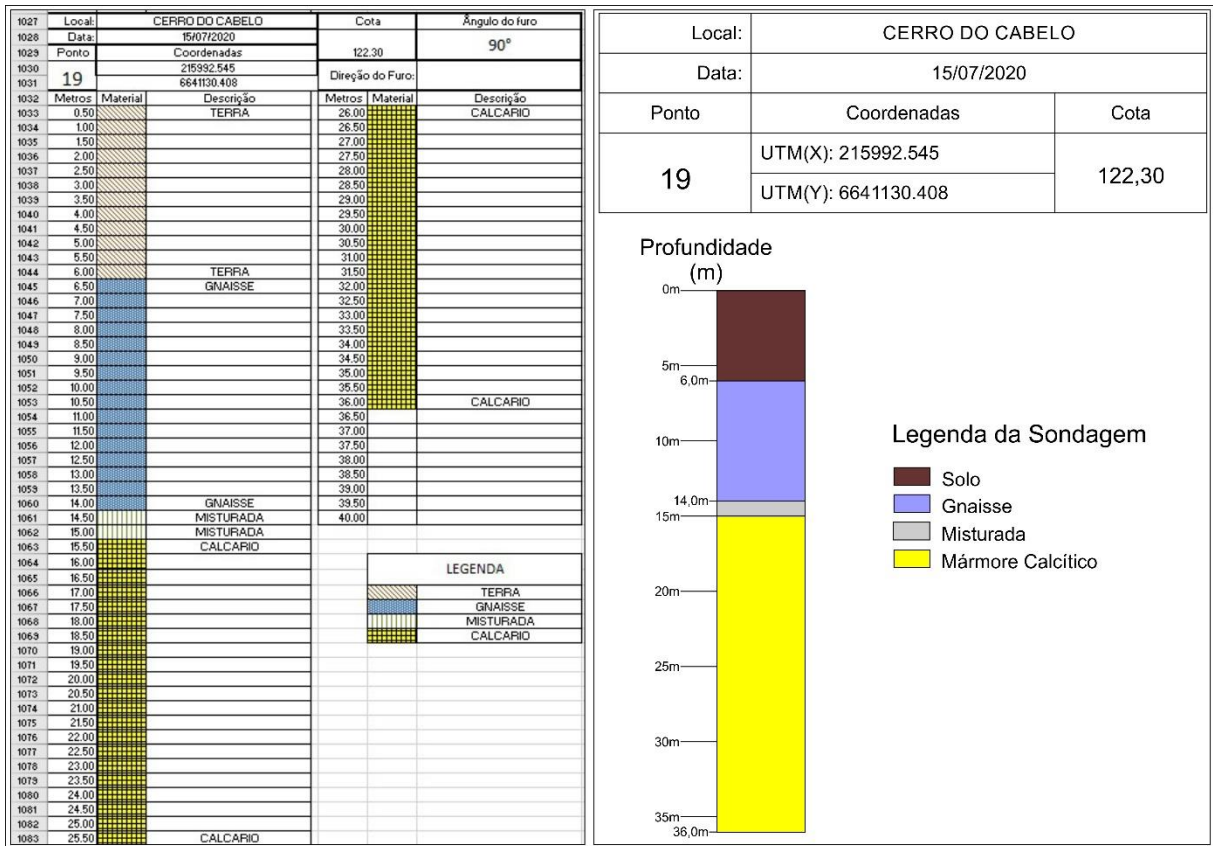


Figura 20 – Exemplo do produto resultante das sondagens: Planilha fornecida pela empresa Calcário Andreazza Ltda em formato Excel para o furo S\_19 e “Log” desenhado para a sondagem S\_19. Fonte: Autor (2023).

As sondagens, após georreferenciadas e visualizadas em planta foram utilizadas na integração e interpretação juntamente com os dados geolétricos. A interpolação de algumas sondagens, resultou em três (03) modelos geológicos, sendo dois (02) com direção SW-NE e um (01) com direção SSW-NNE, denominados de perfil S-I\_SW/NE, perfil S-II\_SSW-NNE e perfil S-III\_SW-NE, localizados a NW da cava da mina Cerro da Cadeia conforme ilustrado na figura 21.



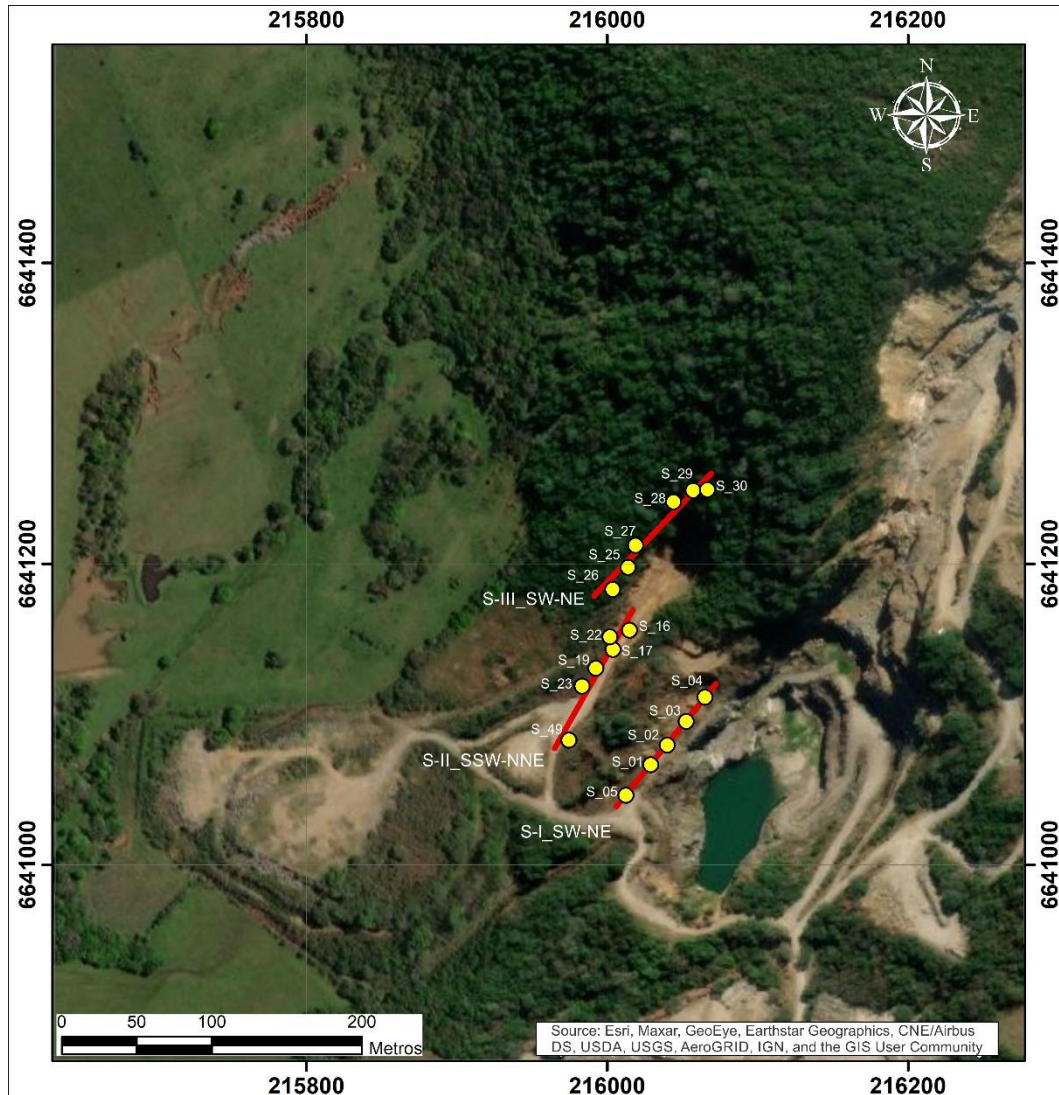


Figura 21 – Localização dos Perfis S-I\_SW/NE, S-II\_SSW-NNE e S-III\_SW-NE.

Fonte: Autor. Modificado de Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community (2022).

O modelo geológico proposto para o perfil S-I\_SW-NE apresentado na figura 22, é composto pelas sondagens 05, 01, 02, 03 e 04. Este modelo apresenta uma pequena cobertura de solo no início do perfil sobreposta a uma contínua camada de Gnaiss, e nos 20 metros finais deste perfil aflora uma camada da litologia denominada misturada, juntamente com uma significativa camada de mármore. Aos 20 metros de profundidade abaixo do gnaiss ocorre uma camada de mármore com espessura entre 3 e 5 metros em sua maior parte, contendo apenas um intervalo mais espesso com aproximadamente 15 metros na posição da sondagem S\_01. Esta camada fica sobreposta a uma segunda camada de gnaiss.

Este modelo apresenta uma falha inferida pela interpretação litológica das sondagens na posição 50 metros, que separa estruturalmente duas camadas

significativas de Mármore, o polígono “A” pontilhado em verde apresenta uma camada de mármore limitado em as cotas 80 e 100 metros, enquanto o polígono “B” limita uma camada entre as cotas 100 e 120 metros.

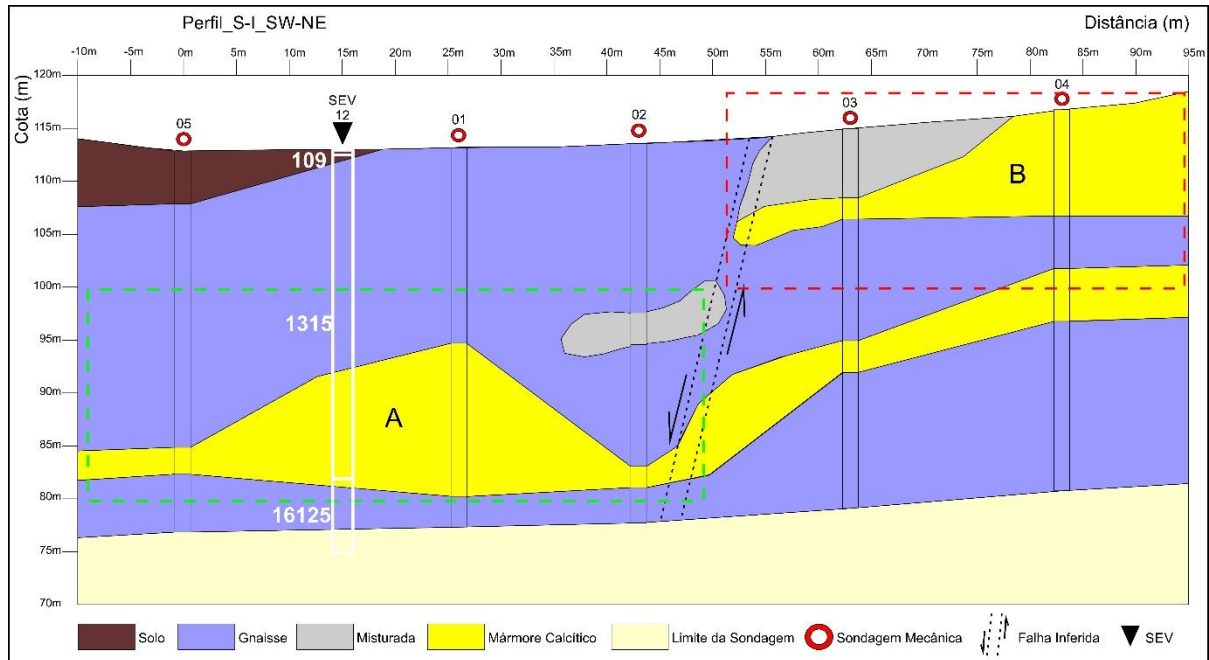


Figura 22 - Modelo 2D gerado para o perfil S-I\_SW-NE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros.

Fonte: Autor (2023).

As sondagens (49, 23, 19, 17, 22 e 16), compõem o modelo geológico proposto para o perfil S-II\_SSW-NNE (figura 23). Este modelo apresenta em seu ponto inicial uma cobertura de cerca de 20 metros de solo até a posição da sondagem S\_23, onde essa cobertura fica menos espessa entre 8 e 10 metros até o final do perfil. Este perfil apresenta um comportamento entre as posições 0 e 45 metros seguido de uma espessa camada de Gnaiss sobre uma pequena camada de mármore, e entre as posições 45 e 90 metros ocorre o inverso, uma camada significativa de mármore sobre o uma camada menos espessa de Gnaiss.

Este modelo apresenta duas falhas inferidas pela interpretação litológica das sondagens, nas posições 55 e 85 metros, que condicionam estruturalmente a ocorrência de camadas de mármore. O polígono “A” pontilhado em verde apresenta uma camada de mármore limitado em as cotas 80 e 100 metros, enquanto o polígono “B” limita uma camada entre as cotas 100 e 120 metros.

A camada de mármore limitada pelo polígono “A” presente no início do modelo pode ser mais espessa em profundidade, visto que a camada limitada pelo polígono “B” é mais espessa e condicionada por falhas estruturais, logo sugere-se que o polígono “A” se encontra em um bloco mais baixo e possa apresentar maior espessura, que não foi investigada nas sondagens.

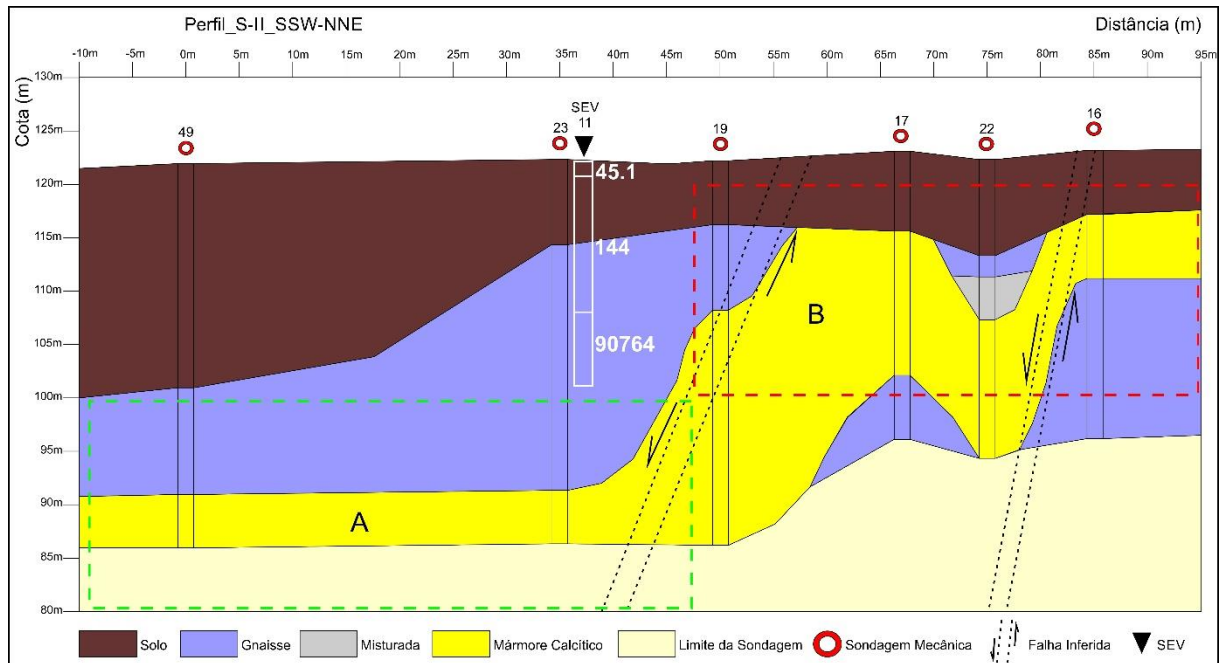


Figura 23 - Modelo 2D gerado para o perfil S-II\_SSW-NNE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros.

Fonte: Autor (2023).

As sondagens (26, 25, 27, 28, 29 e 30), compõem o modelo geológico proposto para o perfil S-III\_SW-NE apresentado na figura 24. Este modelo apresenta cerca de 10 metros de cobertura de solo, seguido de uma camada de Gnaíse que varia de 10 até 30 metros ao longo do perfil. Entre 20 e 30 metros de profundidade ocorre uma camada contínua de mármore com cerca de 10 a 15 metros de espessura, podendo a mesma ser mais espessa, sendo que este foi o limite de profundidade das sondagens. Ocorrem alguns pontos isolados de intercalações de mármore e da litologia denominada de “Misturada” em meio ao gnaíse, mas nada significativo para este perfil.

Este modelo apresenta duas falhas inferidas pela interpretação litológica das sondagens, nas posições 75 e 85 metros aproximadamente, que condicionam estruturalmente a ocorrência de camadas de mármore conforme os polígonos: “A”



pontilhado em verde apresenta uma camada de mármore limitado em as cotas 80 e 100 metros; “B” limita uma camada entre as cotas 100 e 120 metros; e “C” limita uma camada entre as cotas 120 e 135 metros.

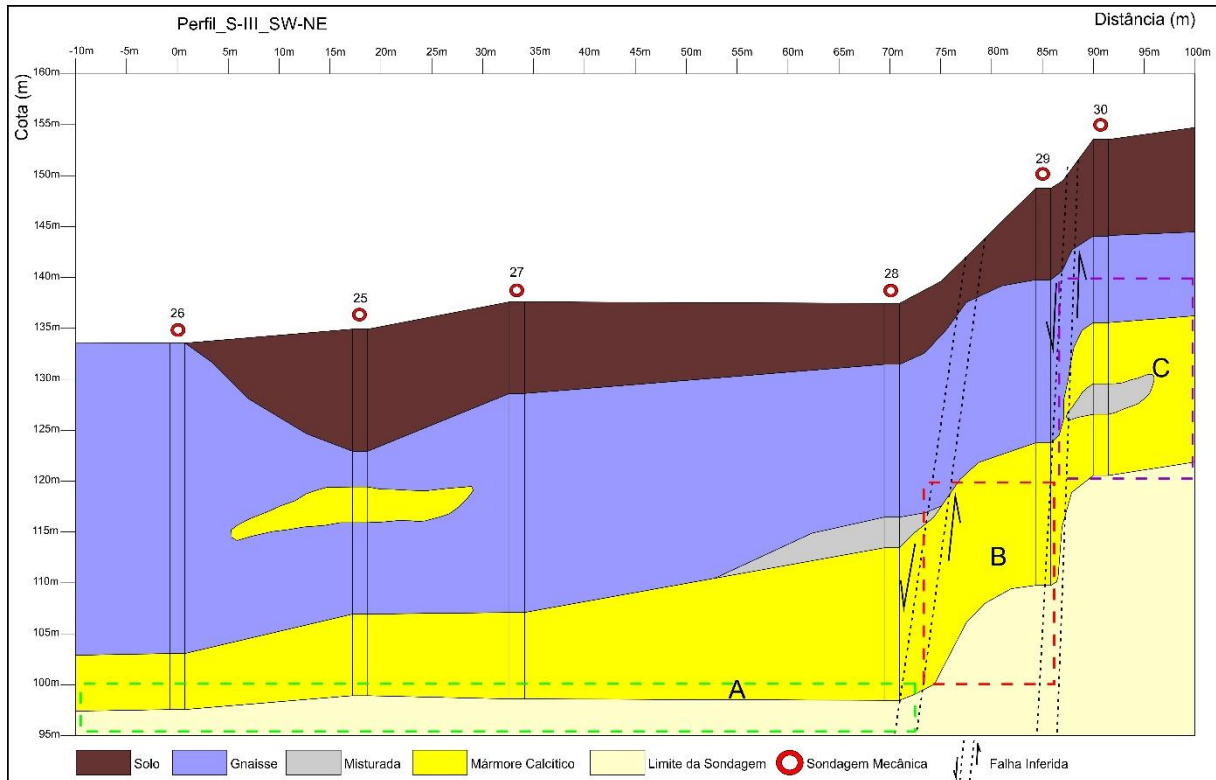


Figura 24 - Modelo 2D gerado para o perfil S-III\_SW-NE a partir da interpolação das sondagens rotativas, onde: A) Camada significativa de mármore entre as cotas 80 e 100 metros; B) Camada significativa de mármore entre as cotas 100 e 120 metros; C) Camada significativa de mármore entre as cotas 120 e 135 metros.

Fonte: Autor (2023).

O perfil S-I\_SW-NE apresenta uma camada de mármore aflorante e uma segunda camada de mármore limitada entre camadas de gnaiss, e sugere a presença de uma falha. O perfil S-II\_SSW-NNE apresenta na posição 45 metros indícios de ocorrência de falha, a qual possivelmente condiciona a ocorrência mais significativa de mármore a menor profundidade entre as posições 45 e 85 metros ao longo deste perfil. O perfil S-III\_SW-NE é mais homogêneo e apresenta uma camada de solo, seguida de uma espessa camada de gnaiss sobreposta a uma significativa camada contínua de mármore com cerca de 100 metros de comprimento e escalonada em três níveis de profundidade, níveis A, B e C.

Os perfis S-I, S-II e S-III apresentam as camadas A e B entre as cotas 80-100 m, e 100-120 m respectivamente, e somente o perfil S-III posicionado mais a NW da cava do setor de extração mineral, apresenta uma terceira camada, denominada

camada C entre as cotas 120-135 m. Cotas superiores a 120 m na área estuda só ocorrem a NW do setor de extração mineral.

### 8.2.3 Caminhamento Elétrico

O processamento e a inversão 2D dos dados de resistividade aparente foram feitos por meio do software *RES2DINV* (GEOTOMO SOFTWARE, 2010), onde se obteve modelos 2D, em termos de distância *versus* profundidade. Os dados em formato (.dat) foram carregados no *software* e o primeiro passo foi analisar e filtrar os pontos que apresentavam ruídos. Após foi rodada a inversão dos dados e feito uma análise para escolher a interação que apresentou melhor relação de fidelidade aos valores de resistividade aparente e menor erro médio quadrático (*RMS*). Concluídas as etapas de filtragem e análise dos dados, foram geradas as seções geoeletricas e definida a melhor apresentação gráfica de saída dos dados, na qual foi carregada a topografia e ajustada a escala horizontal de aproximadamente 10 *pixels* por unidade de espaçamento e o exagero vertical de 1,0 vez. A escala de valores que melhor proporcionou uma visualização de todos os modelos geoeletricos foi de 25 Ohm.m fixado para os valores mínimos de resistividade elétrica até 1670 Ohm.m para os valores mais altos de resistividade elétrica. Desta forma são apresentadas as figuras 25, 26 e 27 correspondentes as linhas CE\_01\_SW-NE, CE\_02\_NW-SE e CE\_03\_SSW-NNE respectivamente.

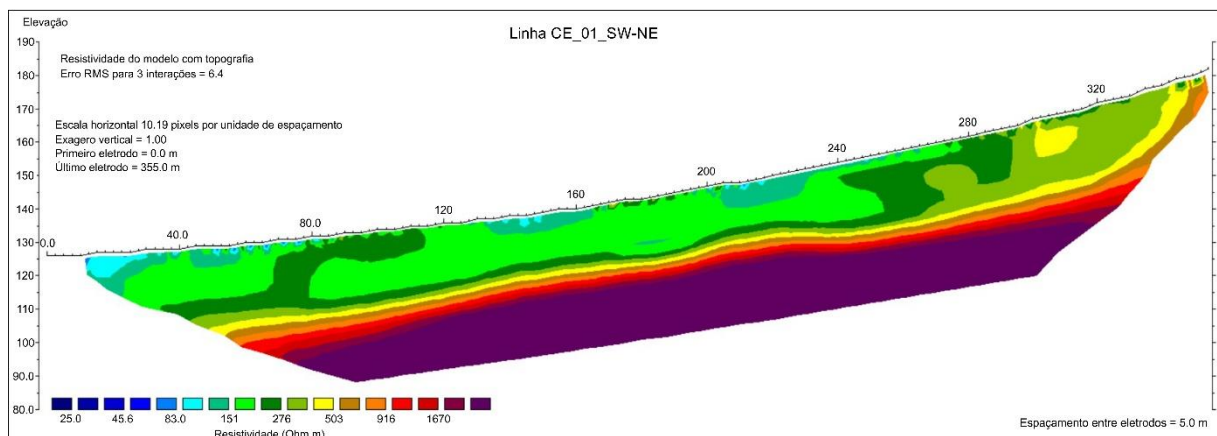


Figura 25 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE\_01\_SW-NE.  
Fonte: Autor (2023).

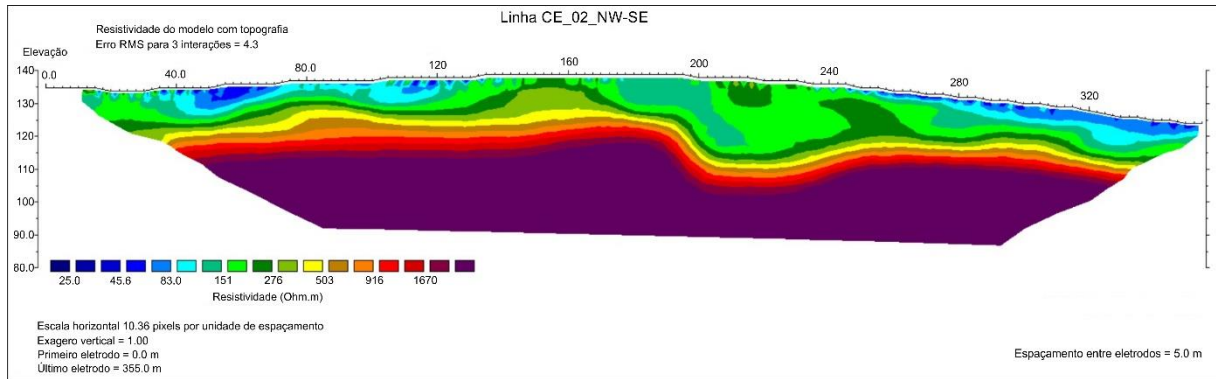


Figura 26 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE\_02\_NW-SE.  
Fonte: Autor (2023).

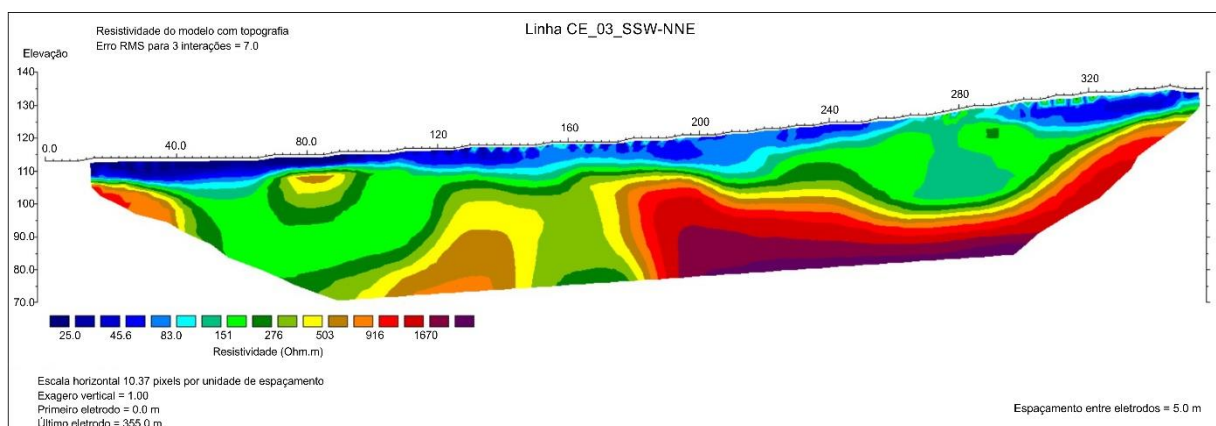


Figura 27 – Modelo 2D de inversão de resistividade elétrica para a linha CE\_03\_SSW-NNE.  
Fonte: Autor (2023).

Os modelos 2D de inversão de resistividade aparente para as linhas de Caminhamento Elétrico, apresentam quatro patamares de resistividades elétricas bem definidos. A tabela 6 apresenta os quatro patamares, e suas correlações com as litologias descritas nos furos de sondagem.

Tabela 6 - Intervalo dos patamares de resistividade elétrica verdadeira para as seções de Caminhamento Elétrico.

Patamares de Resistividade	Intervalo de Resistividade (Ohm.m)	Litologia associada
Muito baixo	< ~90	Camada de solo úmido saturada em água.
Baixo	~90 a ~400	Manto de alteração (solo siltítico em estado seco)
		<b>Áreas com ocorrência de Mármore:</b> Camadas de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações

Médio	~400 até ~1300	de camadas de mármore calcítico, que apresentam espessuras significativas, delimitadas espacialmente em setores, pela presença de um sistema de falhas e/ou fraturas, o que sugere a existência de um certo controle tectônico para a mineralização do mármore
		<b>Áreas sem ocorrência de Mármore:</b> camadas de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações de gnaisse fraturado
Alto	> ~1300	Caraterização da presença de rochas gnáissicas (rocha sã).

Fonte: Autor (2023).

#### 8.2.4 Dados Magnetométricos

Os dados da anomalia magnética de Intensidade Total, disponibilizados para a região da pesquisa, já foram corrigidos pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). O IGRF é a representação teórica, para um dado intervalo de tempo, do campo magnético normal da Terra, somando-se os campos causados por materiais magnéticos da crosta e correntes elétricas induzidas por campos magnéticos externos a crosta. Pode ser necessária a remoção se a área for muito e ou, se necessário a obtenção de uma grande precisão. Em áreas pequenas, um único IGRF pode ser utilizado para a área toda.

Foi utilizado o *software Oasys Montaj* (GEOSOFT INCORPORATED, 2007), para fazer o recorte do banco de dados para a área de interesse.

O processo de interpolação dos dados da anomalia magnética residual (*gridagem*), segundo Vasconcelos *et al.*, (1994) a célula deve ter o tamanho de 1/4 a 1/5 do espaçamento entre as linhas de voo, que é o valor ideal para que se minimize a variação dos dados pontuais na geração de uma malha regular.

Os sistemas de “*gridagem*” mais difundidos na prospecção geofísica são: Mínima Curvatura, *Krigagem* e Bi-direcional.

Neste trabalho utilizou-se a *gridagem* Bi-direcional, a qual é ideal para dados de levantamentos de dados geofísicos aéreos potenciais, principalmente quando

existe uma alta densidade em uma determinada direção preferencial, ou seja, na direção de aquisição dos dados. A *gridagem* consiste em uma interpolação linear ao longo de duas direções. O algoritmo do *Bi-grid* também é composto por um filtro não linear que elimina ruídos de alta frequência (*spikes*) e um parâmetro de realce de *trends* que evita o aparecimento de feições lineares compostas de várias anomalias de pequenos comprimentos de onda.

Segundo o trabalho de Ferreira e Rosales (2012), que utilizou dados magnetométricos terrestre em área sobreposta a deste trabalho, o topo de fontes perturbadoras correspondentes ao embasamento gnáissico, se encontram a 250 m de profundidade, logo não temos informações de dados geoeletricos, nem sondagem mecânica a esta profundidade. Desta forma neste trabalho não se avançou em modelagens, e os dados magnetométricos foram utilizados apenas para inferir lineamentos magnéticos regionais e melhor entender a dinâmica local da área de estudo.

O fluxograma a seguir (figura 28), apresenta simplificada a sequência do processamento utilizado que culminou na geração dos mapas das anomalias do campo magnético residual e de seus produtos derivados, das técnicas de filtragens e de realce das anomalias. O processamento dos dados aeromagnetométricos para a presente pesquisa, foi direcionado para a identificação e caracterização geofísica de lineamentos magnéticos regionais, os quais poderiam estar associados com lineamentos geológicos regionais, que a sua vez poderiam apresentar algum vínculo de controle estrutural, com falhas e/ou com zonas de fraturas, localizadas mais próximas da superfície terrestre.

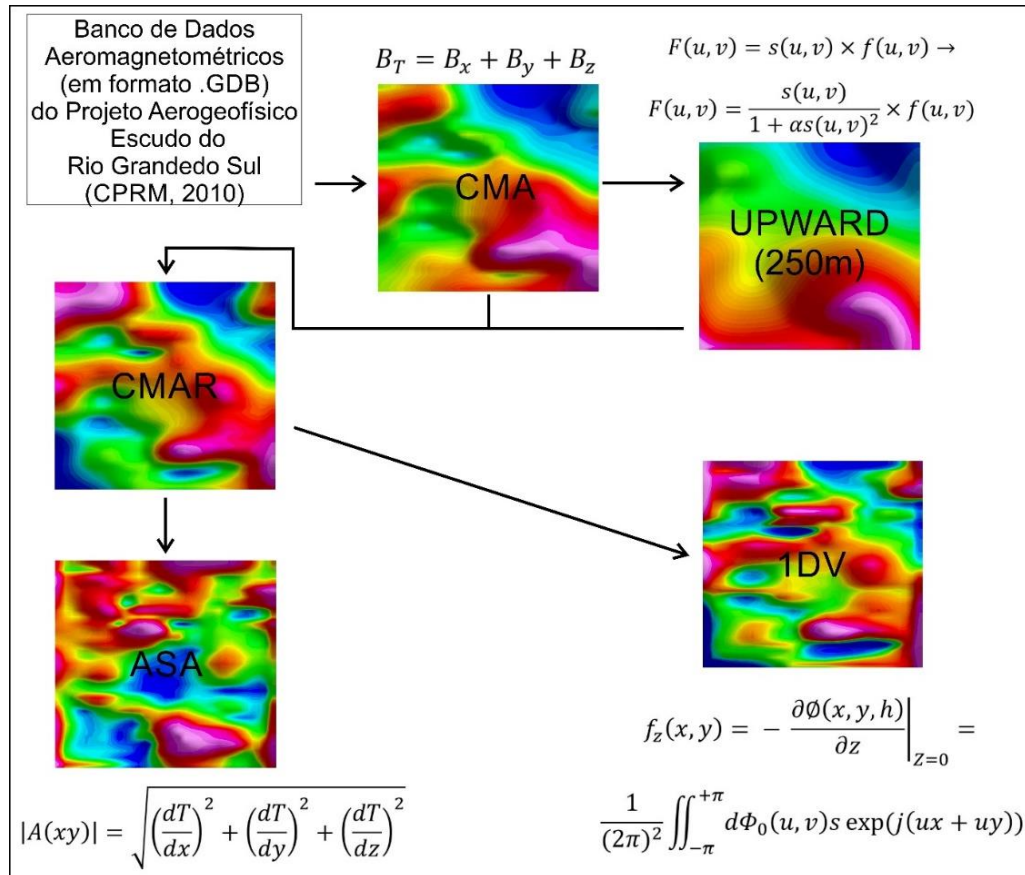


Figura 28 - Esquema ilustrativo do fluxograma de processamento dos dados da Anomalia Magnética de Intensidade Total.

Fonte: Autor (2023).

O mapa da Anomalia Magnética de Intensidade Total (CMA) apresentado na figura 29, é o produto inicial tomado como referência para o processamento dos dados, aplicando as técnicas de filtragens e de realce das anomalias.

Em termos regionais, é possível observar na porção NW da área de estudo um sinal negativo com valores de -3 nT a -10 nT, e na porção SE, um sinal positivo com valores de +2 nT a +10 nT.

Destacam-se lineamentos magnéticos em duas direções preferenciais: NE-SW e NW-SE, os quais poderiam estar associados com falhas geológicas regionais, que poderiam apresentar algum vínculo de controle estrutural, com falhas e/ou com zonas de fraturas, localizadas mais próximas da superfície terrestre, que sejam elementos delimitadores dos setores com ocorrências minerais para a área de estudo.



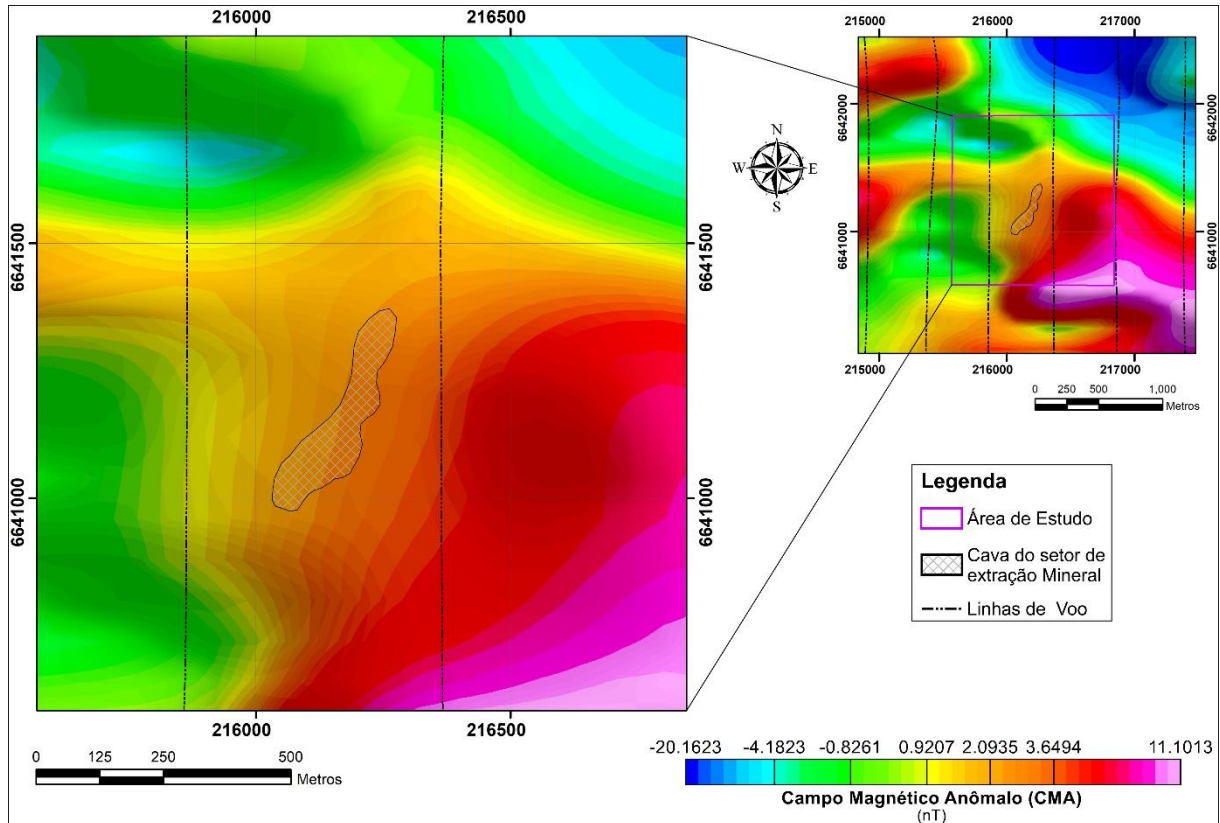


Figura 29 - Mapa da Anomalia Magnética de Intensidade Total (CMA).

Fonte: Autor (2023).

A partir da malha ou *grid* do mapa da Anomalia Magnética de Intensidade Total (CMA), foi aplicado um filtro de Continuação para cima (*UPWARD*), a 250 metros, que resultou no mapa da Anomalia Magnética (Continuação para cima: 250 metros), (figura 30) que resalta o efeito das fontes anômalas magnéticas profundas, de caráter regional. A continuação para cima (*UPWARD*), é uma transformação linear que simula a medição do campo potencial magnético, em diferentes planos de observação, acima do nível de observação inicial.

A intensidade do campo magnético é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o plano de aquisição dos dados e a fonte, ou seja, fontes profundas são associadas a sinais de baixa frequência, enquanto fontes rasas são relacionadas a sinais de alta frequência (BLAKELY, 1996; TELFORD *et al.*, 1990).

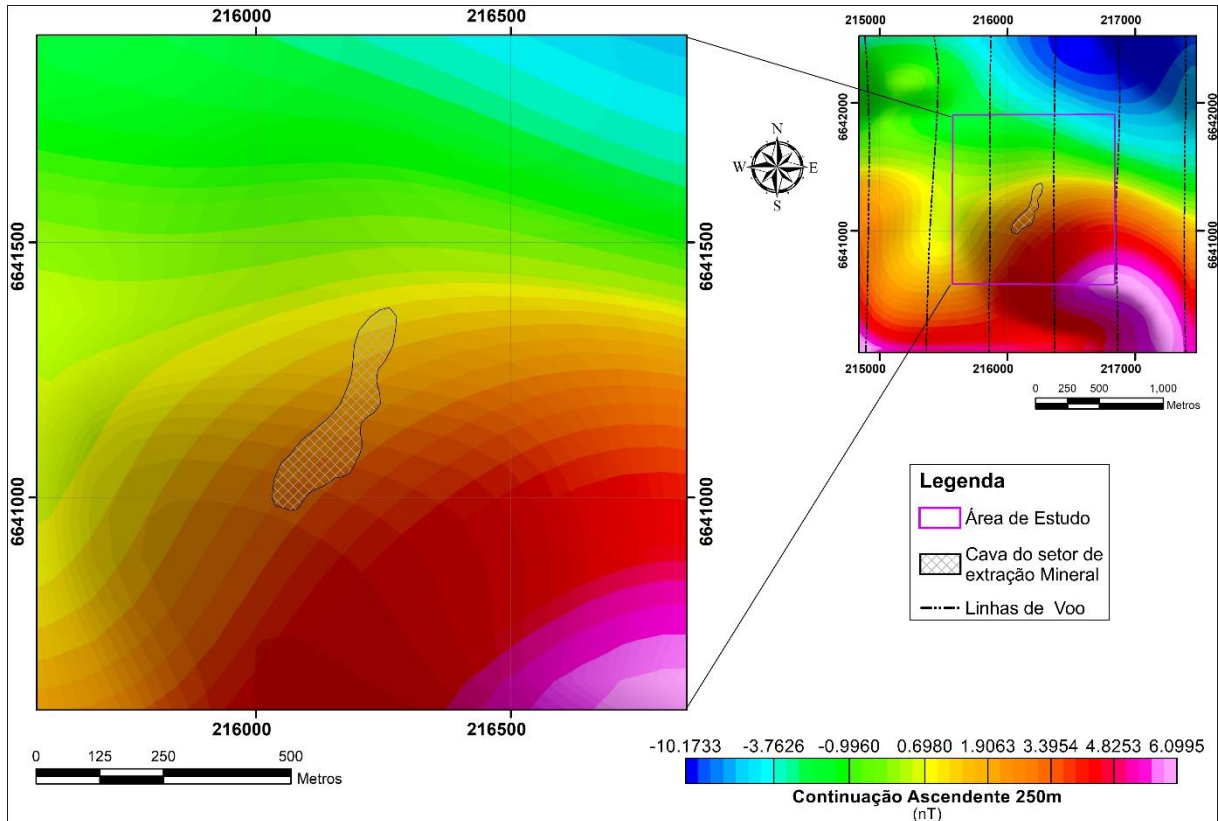


Figura 30 - Mapa da Anomalia magnética (Continuação para cima: 250 metros).  
Fonte: Autor (2023).

Como a área de estudo exige um detalhe maior, e uma melhor visualização das fontes anômalas mais superficiais, foi realizada a seguinte subtração: O “grid” do Campo Magnético Anômalo (CMA) menos o “grid” da Continuação para cima a 250 metros do Campo Magnético Anômalo (CMA\_UPWARD\_250m), resultando no mapa da componente residual do Campo Magnético Anômalo (CMAR) (figura 31).



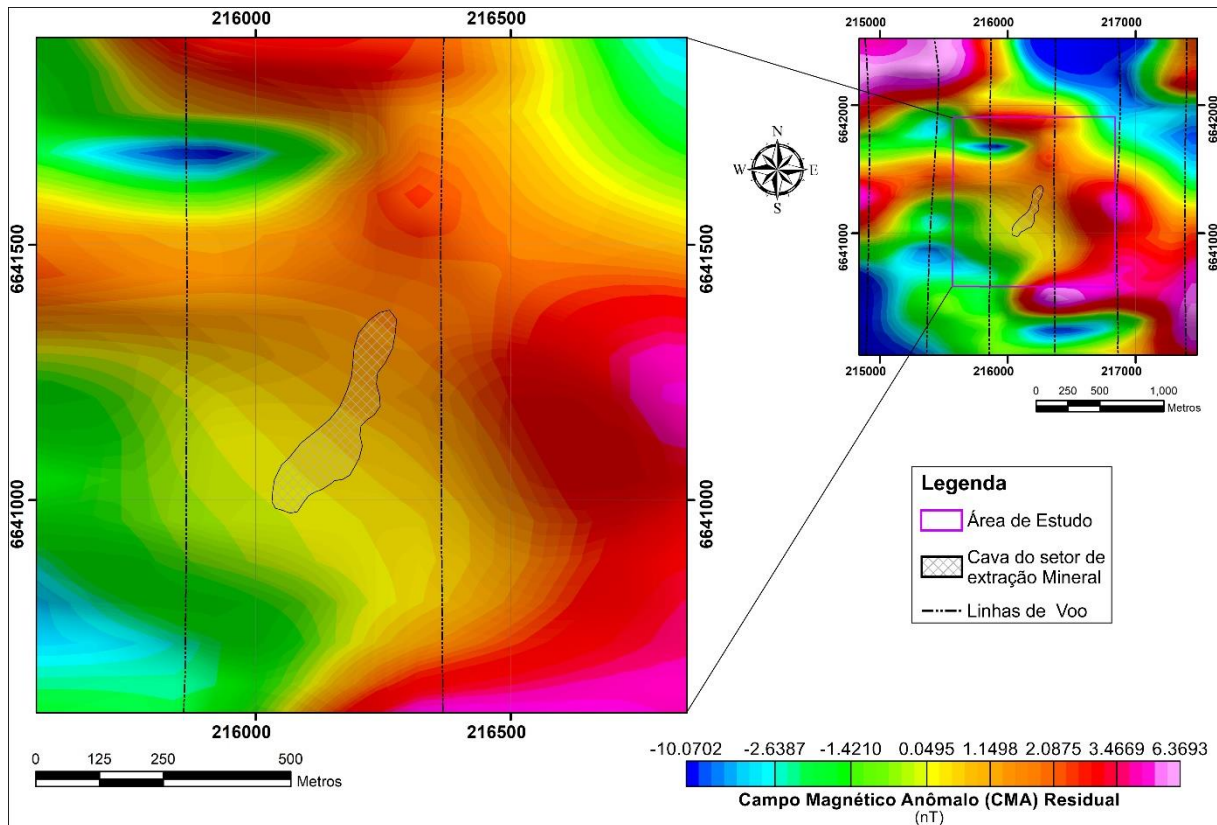


Figura 31 - Mapa da Anomalia Residual do Campo Magnético Anômalo (CMAR).  
Fonte: Autor (2023).

O mapa da Primeira Derivada Vertical (1DV) exposto na figura 32, é resultado do uso de técnicas para realçar informações de alta frequência que existem nas fontes mais superficiais em função da eliminação das baixas frequências regionais (BLAKELY, 1996). Consiste da aplicação de um filtro responsável para o cálculo da primeira derivada da componente vertical do campo magnético anômalo. Este produto tem grande aplicabilidade para interpretar alinhamentos magnéticos, e o mesmo ressaltou no mapa regional, pontos anômalos em direções preferencias sugerindo a presença de lineamento magnéticos regionais nas direções NE-SW e NW-SE possivelmente associados a falhas profundas que afetam o topo do embasamento.

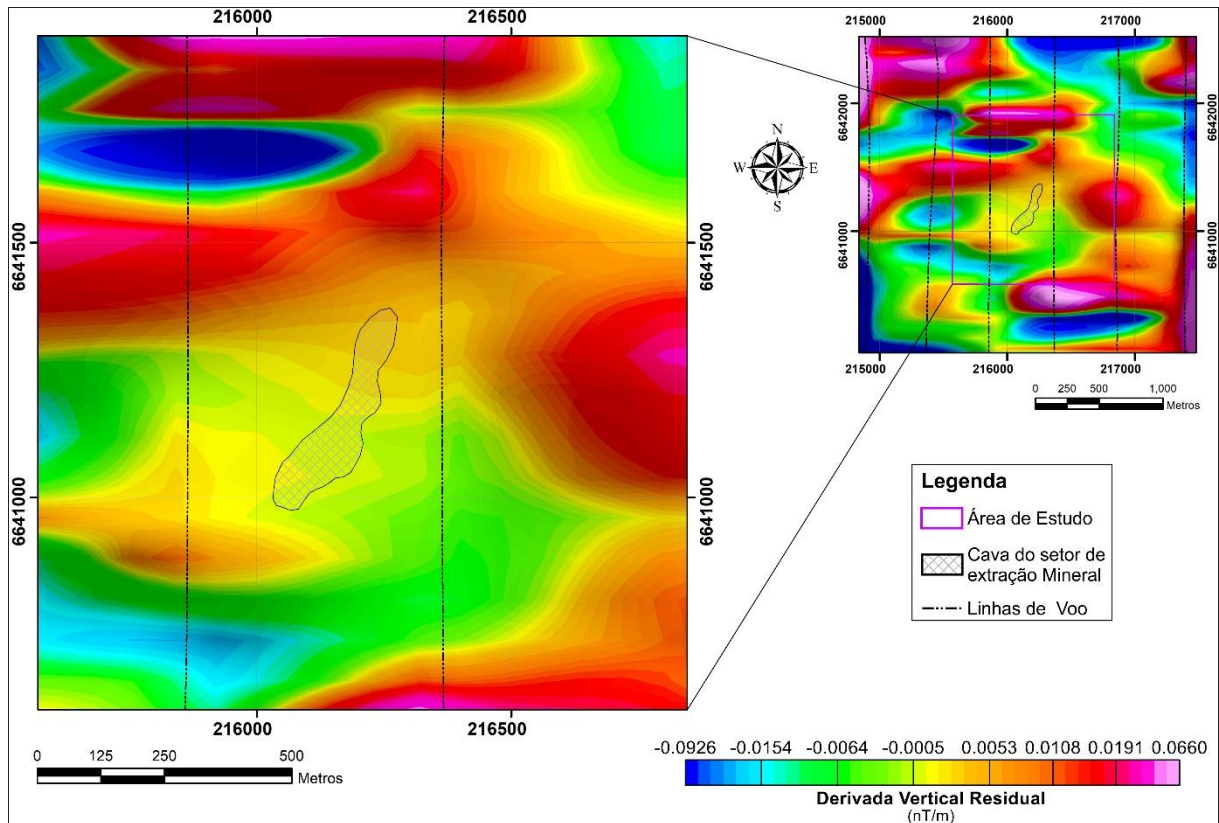


Figura 32 – Mapa da Anomalia Residual da Primeira Derivada Vertical (1DV).  
Fonte: Autor (2023).

O mapa da anomalia residual da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (figura 33), é dado pela combinação dos gradientes vertical e horizontais de uma anomalia magnética. O sinal analítico tem uma forma sobre corpos causadores que depende de sua posição, mas não da direção de magnetização. A aplicação do sinal analítico de interpretação magnética foi iniciada por Nabighian (1972, 1974), é um método que dispensa a redução ao polo, o que é muito vantajoso a baixas latitudes magnéticas quando aplicada para a locação das fontes magnéticas.

O setor de extração mineral está situado em uma zona de valores muito baixos e/ou ausência de magnetização, resultado já esperado por se tratar de uma mina de mármore calcítico.

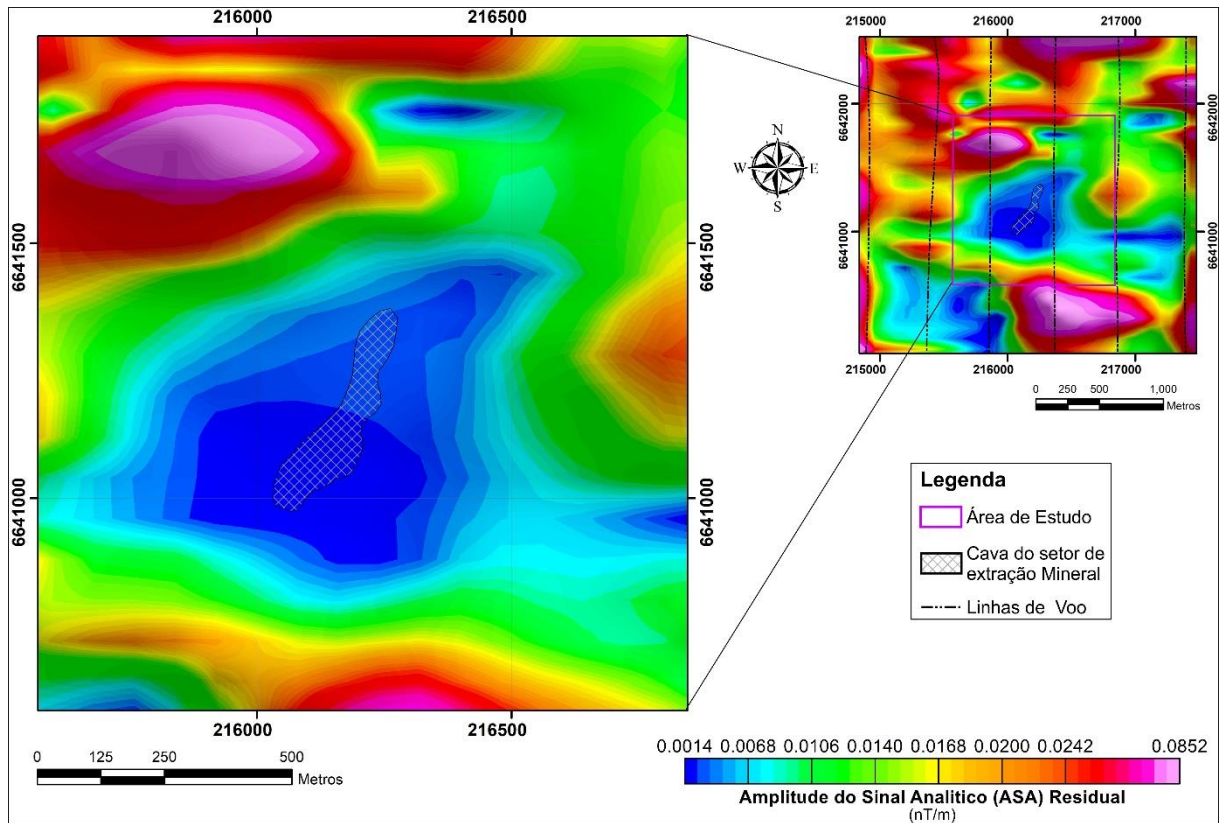


Figura 33 – Mapa da Anomalia da Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

Fonte: Autor (2023).

## 9 INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A integração dos dados de Caminhamento Elétrico (CE), Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e colunas geradas para as Sondagens resultou em modelos geológico/geofísico para a área de estudo.

A figura 34 ilustra a integração entre o “log” confeccionado para a sondagem mecânica S\_46, uma entre as disponibilizadas em uma planilha Excel pela empresa *Calcário Andrezza Ltda*, o “log” confeccionado a partir do modelo de inversão 1D da Sondagem Elétrica Vertical SEV\_04, e o modelo de inversão 2D gerado para o Caminhamento Elétrico. A sondagem S\_46 se encontra distante 16 m da SEV\_04, mas ambas estão praticamente na mesma cota, desta forma foi possível obter uma boa correlação entre os dados, onde a SEV\_04 apresentou duas camadas com resistividade baixas, 142 Ohm.m associadas a um solo um pouco mais úmido, seguido de uma camada de 245 Ohm.m de solo seco e uma terceira camada com resistividade de 5399 Ohm.m associada a rochas gnáissicas. A informações da sondagem S\_46 e da SEV\_04 corroboram e reforçam os resultados do modelo de inversão 2D.

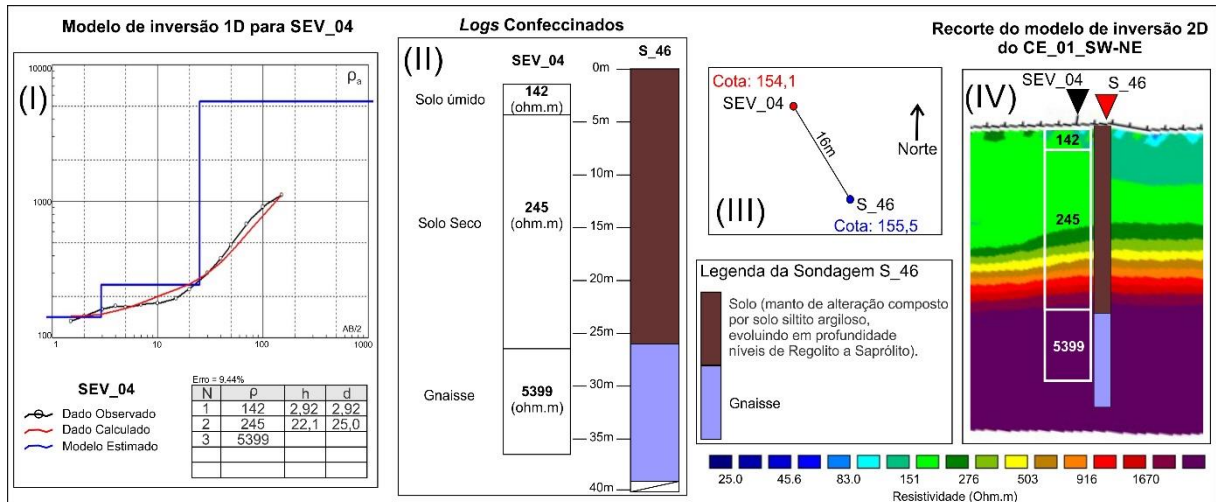


Figura 34 – Exemplo de comparação e integração de dados. (I) Modelo gráfico de Inversão 1D para SEV\_04; (II) Logs confeccionados a partir da interpretação do modelo de inversão 1D, e da planilha de dados da sondagem S\_46, respectivamente; (III) Intervalo de distância e cota entre a SEV\_04 e a sondagem S\_46; (IV) Recorte do modelo de inversão 2D do Caminhamento Elétrico CE\_01\_SW-NE com sobreposição dos logs da SEV\_04 e S\_46.  
Fonte: Autor (2023).

A figura 35 ilustra a integração da SEV\_12 com as sondagens S\_05 e S\_01, onde ambas apresentam camadas de calcário. A SEV\_12 apresenta 3 camadas, com intervalos de resistividade de 109 Ohm.m relacionado a uma pequena camada de solo, seguido de um intervalo de 1315 Ohm.m associado a camadas de mármore intercaladas com gnaiss parcialmente fraturado e/ou alterado e por fim uma camada de resistividade elevada de 16.125 Ohm.m associada ao gnaiss (rocha sã).

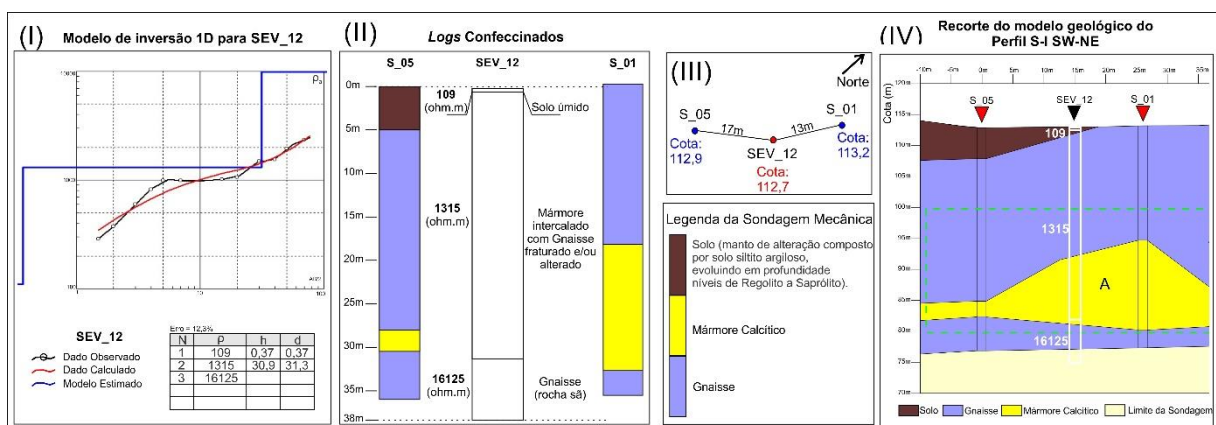


Figura 35 – Exemplo de comparação e integração de dados. (I) Modelo gráfico de Inversão 1D para SEV\_12; (II) Logs confeccionados a partir da interpretação do modelo de inversão 1D, e da planilha de dados das sondagens S\_05 e S\_01, respectivamente; (III) Intervalo de distância e cota entre a SEV\_12 e as sondagens S\_05 e S\_01; (IV) Recorte do modelo geológico do perfil S-I SW-NE.  
Fonte: Autor (2023).



A integração do modelo de inversão de resistividade elétrica 2D para a linha de Caminhamento Elétrico CE\_01\_SW-NE, as colunas geradas para os modelos de inversão de resistividade elétrica 1D oriundos das Sondagens Elétricas Verticais (01, 02, 03, 04, 05 e 06), e as colunas geradas para as Sondagens (46, 33, 34 e 41) compõem o modelo geológico/geofísico Mod\_01\_SW-NE (figura 36).

O modelo Mod\_01\_SW-NE apresenta 4 patamares de resistividade elétrica, conforme descrição dos patamares apresentados anteriormente na (tabela 5), sendo um patamar muito baixo ( $< \sim 90$  Ohm.m) associado a camadas de solo, saturadas em água que ocorrem em áreas superficiais e pouco espessas.

O patamar baixo ( $\sim 90$  até  $\sim 400$  Ohm.m) correlacionado com manto de alteração (solo siltítico em estado seco) o mesmo atinge uma espessura de cerca de 20m, seguido de um gradiente médio ( $\sim 400$  até  $\sim 1300$  Ohm.m), composto de uma fina camada de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações de gnaiss fraturado, seguido de um alto patamar de resistividade elétrica ( $> 1300$  Ohm.m) relacionado a presença de rochas gnáissicas (rocha sã).

As colunas geradas para os pontos de SEV e para as sondagens mecânica são compatíveis com os resultados da linha CE. Estes dados foram importantes na interpretação e corroboram com o modelo proposto.

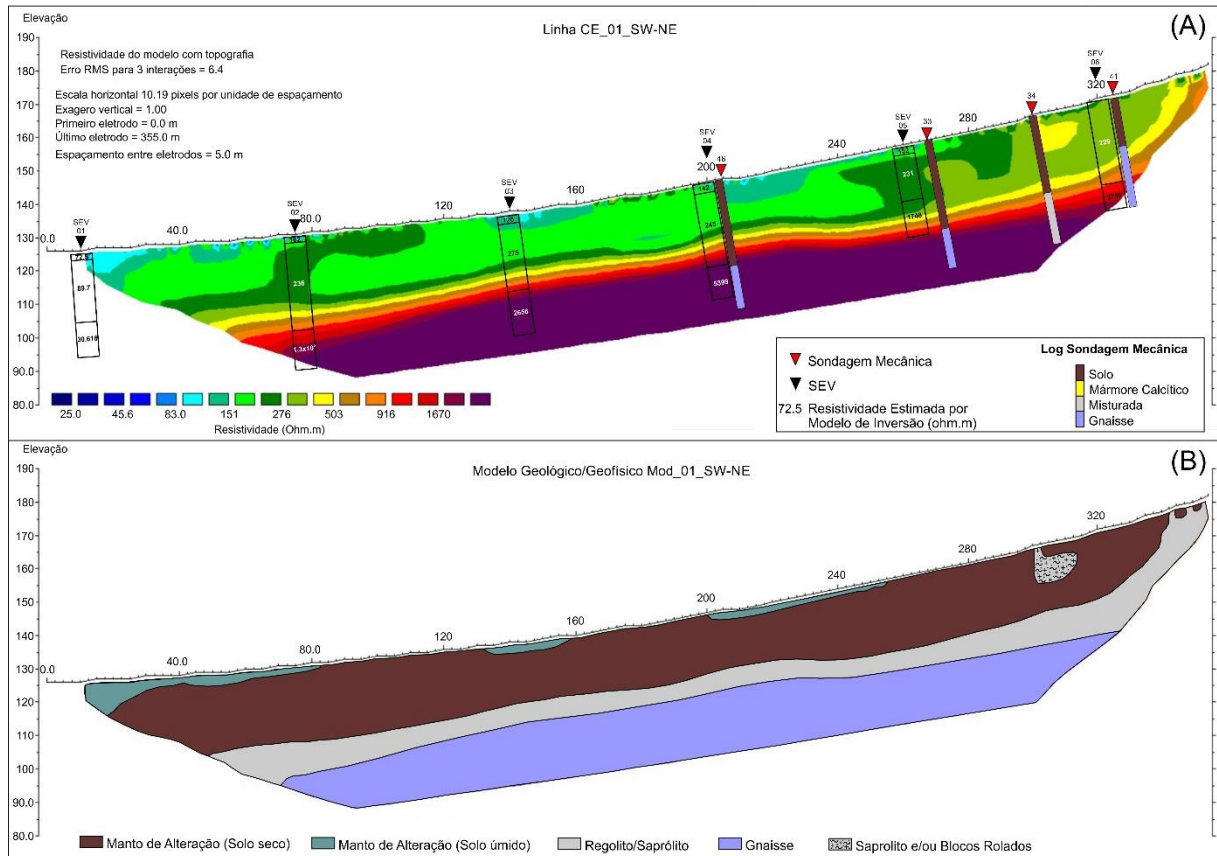


Figura 36 – A) Modelo 2D de resistividade verdadeira integrado com as colunas das SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod\_01\_SW-NE.  
Fonte: Autor (2023).

A integração do modelo de inversão de resistividade elétrica 2D para a linha de Caminhamento Elétrico CE\_02\_NW-SE, as colunas geradas para os modelos de inversão de resistividade elétrica 1D oriundos das Sondagens Elétricas Verticais (07, 08, 03, 09, 10 e 11), e as colunas geradas para as Sondagens (46, 13, 10 e 20) compõem o modelo geológico/geofísico Mod\_02\_NW-SE (figura 37).

O modelo Mod\_02\_NW-SE apresenta 4 patamares de resistividade elétrica, sendo um patamar muito baixo ( $< \sim 90$  Ohm.m) associado a camadas de solo, saturadas em água que ocorrem em duas áreas superficiais e bem isoladas, uma entre os 40m e 120m e a outra a partir dos 240m até o final do modelo.

Destaca-se um intervalo de resistividades entre 90 Ohm.m a 400 Ohm.m, associado com o manto de alteração (solo siltítico em estado seco) que atinge espessura de até 25m. Em profundidade o modelo evolui para um patamar de maiores valores de resistividades, entre 400 Ohm.m a 1300 Ohm.m, composto de uma camada pouco espessa de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalação de gnaiss fraturado. A base do modelo apresenta um alto patamar

de resistividade elétrica (> 1300 Ohm.m) relacionado a presença de rochas de composição gnáissicas (rocha sã).

Este modelo aos 200 metros apresenta uma descontinuidade em termos de resistividade elétrica, que sugere a presença de uma falha, as colunas das SEV\_03 e SEV\_09 e da sondagem (S\_46) corroboram com o modelo e reforçam a interpretação da citada presença da uma descontinuidade vertical inferida.

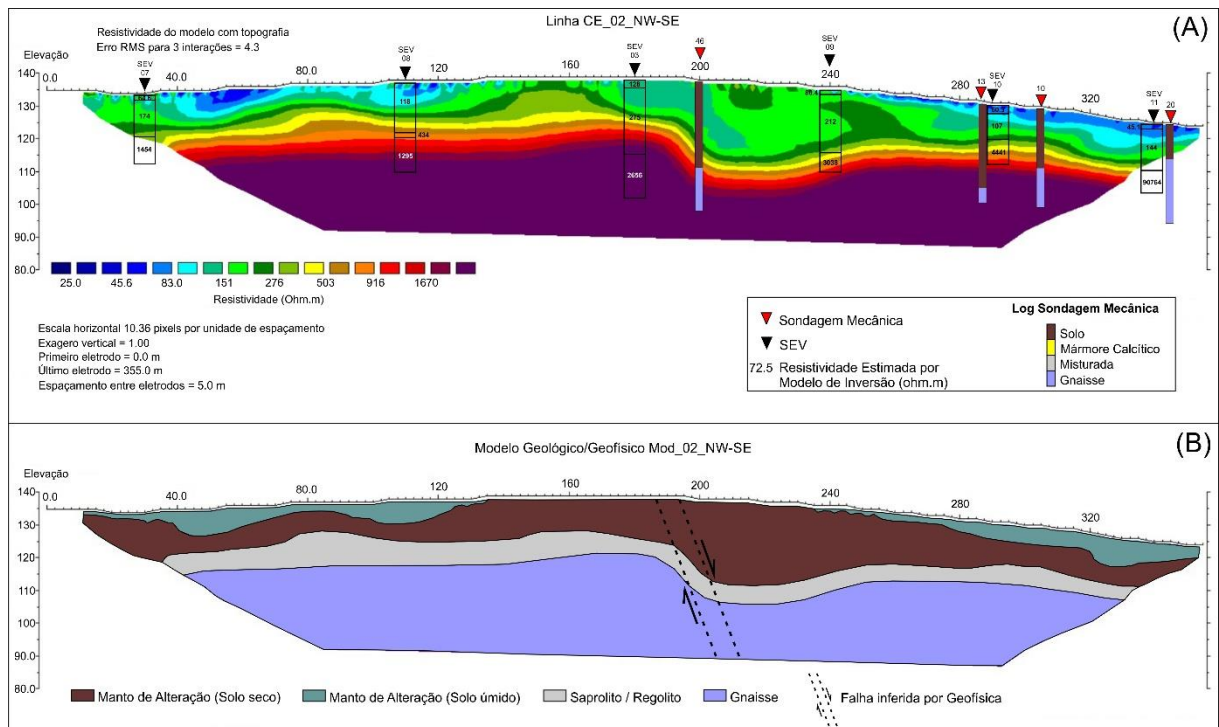


Figura 37 – A) Modelo 2D de resistividade verdadeira integrado com as colunas de SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod\_02\_NW-SE.  
Fonte: Autor (2023).

A integração do modelo de inversão de resistividade elétrica 2D para a linha de Caminhamento Elétrico CE\_03\_SSW-NNE, a coluna gerada para o modelo de inversão de resistividade elétrica 1D da SEV\_11, e as colunas geradas para as Sondagens (8, 49, 20, 23, 19, 17, 22, 16 e 15) compõem o modelo geológico/geofísico Mod\_03\_SSW-NNE (figura 38).

O modelo Mod\_03\_SSW-NNE apresenta 4 patamares de resistividade elétrica, muito baixo (< ~90 Ohm.m) associado a camada de solo pouco espessa e saturada em água que ocorre ao longo de toda a superfície do modelo, seguido de um patamar baixo (~90 até ~400 Ohm.m) correlacionado com manto de alteração (solo siltítico em estado seco), o mesmo atinge uma espessura de cerca de 20m até a posição 160 metros ao longo do modelo e diminui sua espessura na porção final do modelo.

O patamar médio (~400 até ~1300 Ohm.m) de resistividade elétrica para a primeira parte do modelo está associado a uma espessa camada de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações de gnaiss, enquanto que na porção final do modelo o mesmo está associado a camadas de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações de camadas de mármore calcítico, que apresentam espessuras significativas delimitadas espacialmente em setores, pela presença de um sistema de falhas e/ou de fraturas, o que sugere a existência de um certo controle tectônico para a mineralização do mármore.

O alto patamar de resistividade elétrica (> 1300 Ohm.m) ocorre somente na porção final do modelo relacionado a presença de rochas gnáissicas (rocha sã) não alteradas. A presença de gnaiss na primeira metade no modelo ocorre na forma de gnaiss fraturado com grau de alteração de intemperismo e parcialmente saturado em água, correlacionado com a presença de camadas de gnaiss fraturado, sendo este associado aos patamares médio e baixo de resistividade elétrica.

Esta porção do modelo não apresenta altos valores de resistividade elétrica, logo sugere-se que a presença de rochas gnáissicas não alteradas ocorre a maiores profundidades, corroborando com a interpretação da falha inferida através da integração dos dados geofísicos.



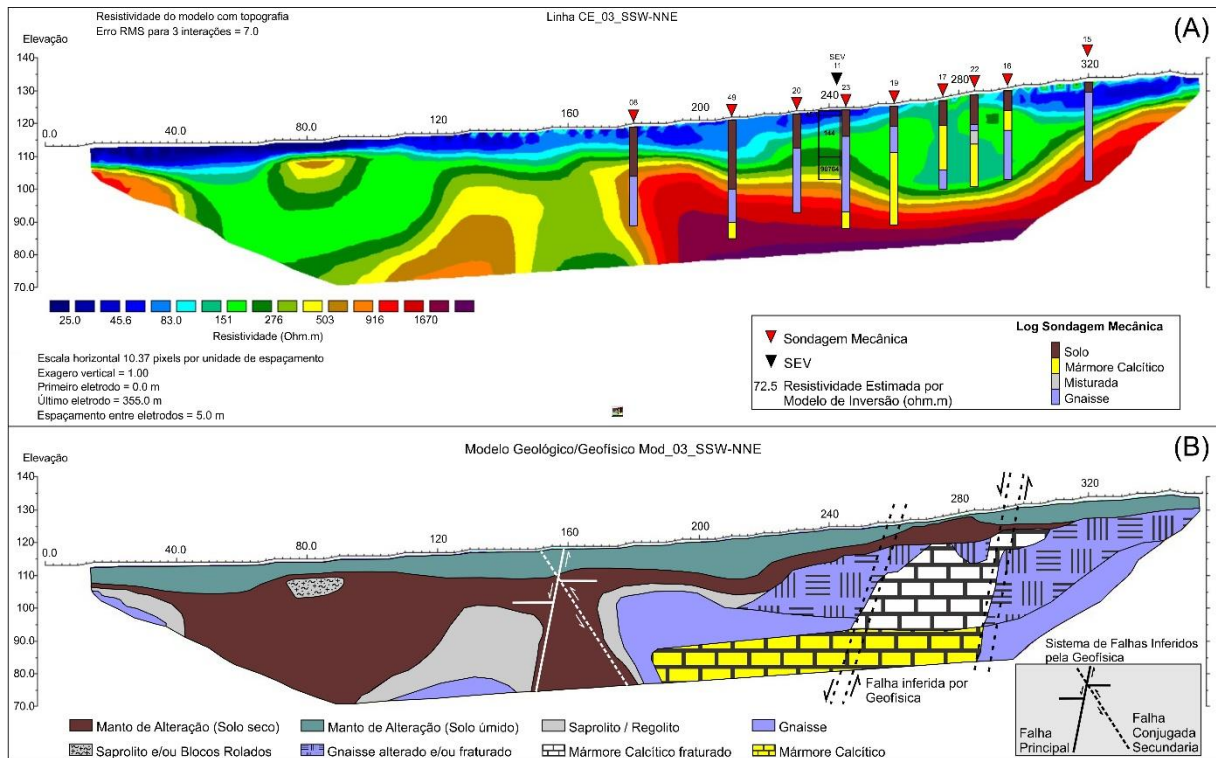


Figura 38 – A) Modelo 2D de resistividades verdadeiras integrado com colunas de SEV e colunas das sondagens mecânicas; B) Modelo geológico/geofísico Mod\_03\_SSW-NNE.  
 Fonte: Autor (2023).

Os modelos 1 e 2 não apresentaram indícios de ocorrência de mármore, porem foram fundamentais para um melhor conhecimento da área de estudo. Onde o Mod\_01\_SW-NE apresenta um comportamento mais homogêneo da cobertura de solo e do topo rochoso, enquanto o Mod\_02\_NW-SE apresentou uma descontinuidade, a qual sugere a presença de uma falha que provavelmente é um dos fatores condicionantes da ocorrência do corpo de mármore.

O modelo Mod\_03\_SSW-NNE é o único que em sua integração foi possível afirmar a presença de mármore entre o meio e o final do perfil (figura 39). Sugere-se que está ocorrência de mármore está condicionada as falhas SW-NE e NW-SE identificadas nos modelos Mod\_02\_NW-SE e Mod\_03\_SSW-NNE respectivamente.

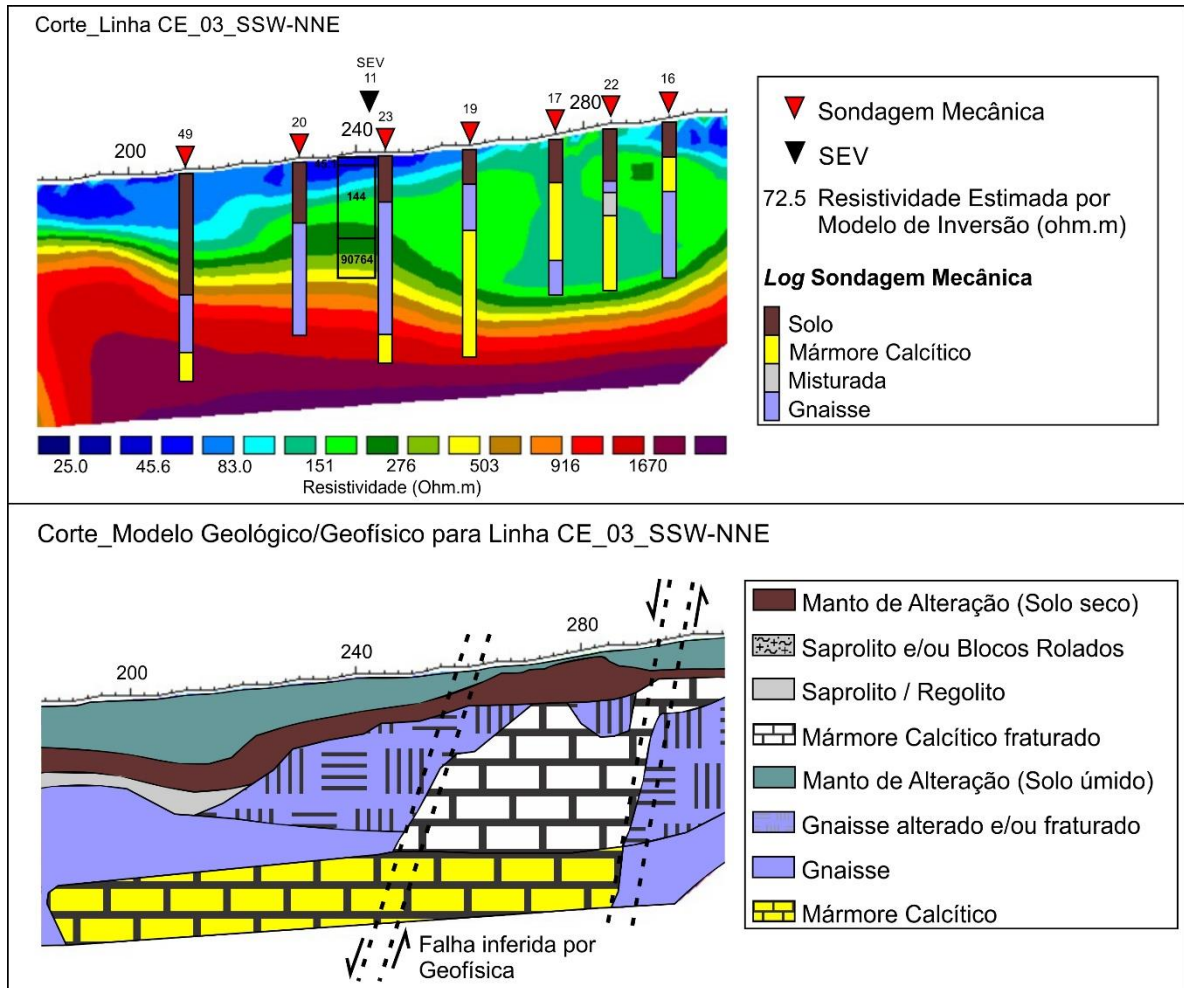


Figura 39 – Recorte ampliando (zoom) o setor com ocorrência de mármore do Modelo 2D Mod\_03\_SSW-NNE apresentado na figura 38.

Fonte: Autor (2023).

A análise conjunta de todos os produtos oriundos dos dados magnetométricos, utilizando as técnicas de filtragem e de realce das anomalias apresentou resultados significativos para o mapa da anomalia da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (figura 40), que limitou o setor de extração mineral a áreas com valores muito baixos de ASA, além de resultar na identificação de dois *trends* de lineamentos magnético-estruturais de caráter regional, seguindo duas direções preferenciais: NW-SE e SW-NE, associados à presença de falhas profundas que afetam o topo do embasamento gnáissico, e que provavelmente mantem alguma relação tectônica com a presença de enxames de fraturas ou de falhas localizadas a uma menor profundidade, que afetam as rochas suprajacentes ao embasamento.

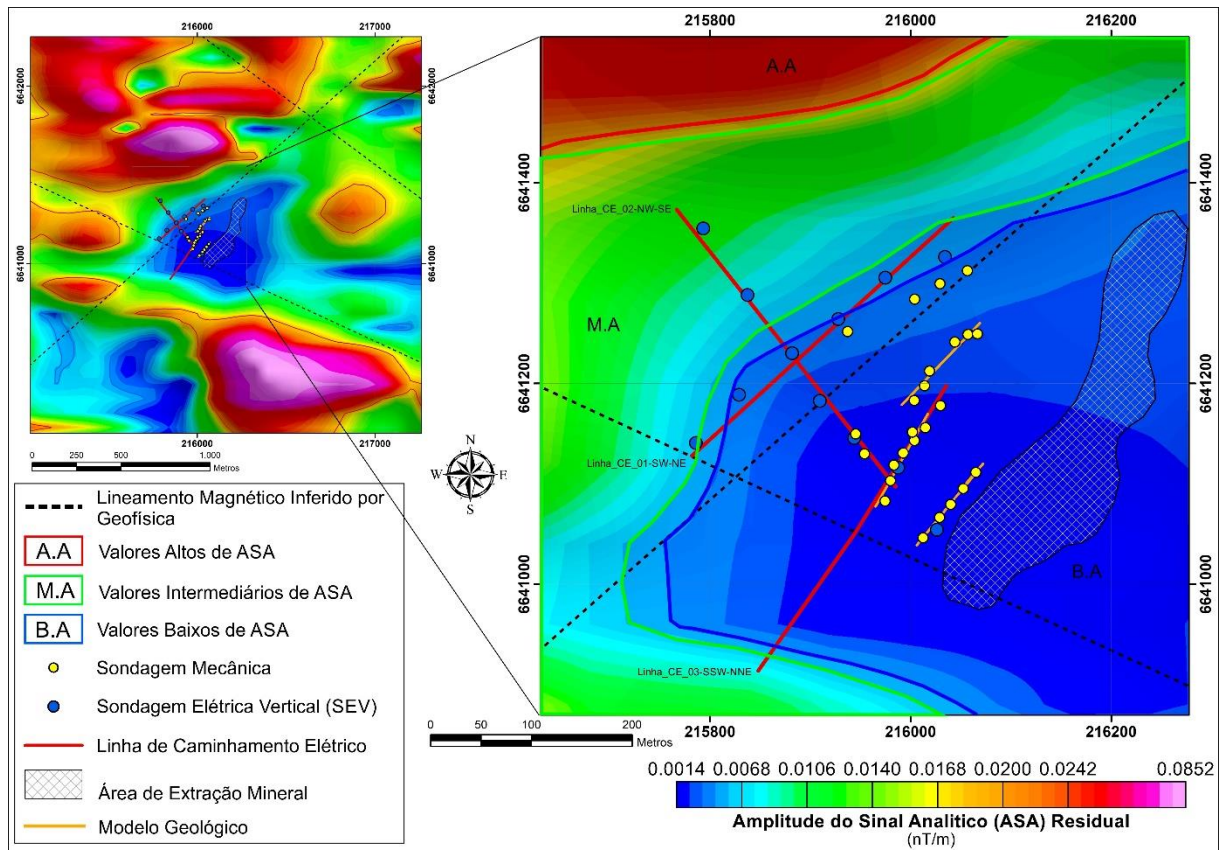


Figura 40 – Localização dos principais dados de campo e lineamentos magnéticos inferidos, oriundos das interpretações geofísicas representados sobre o mapa da anomalia residual da Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: Autor (2023).

Os modelos geológico/geofísicos Mod\_01, Mod\_02 e Mod\_03, resultantes da integração do modelo de inversão de resistividade elétrica 2D para as linhas de Caminhamento Elétrico (CE), as colunas geradas para o modelo de inversão de resistividade elétrica 1D das Sondagem Elétrica Vertical (SEV), as colunas geradas para as sondagens mecânicas, os modelos geológicos propostos para os perfis S-I, S-II e S-III obtidos a partir da integração das sondagens mecânicas, e os resultados de lineamentos magnéticos estruturais e setores com valores baixos de ASA são apresentados conjuntamente na (figura 41).



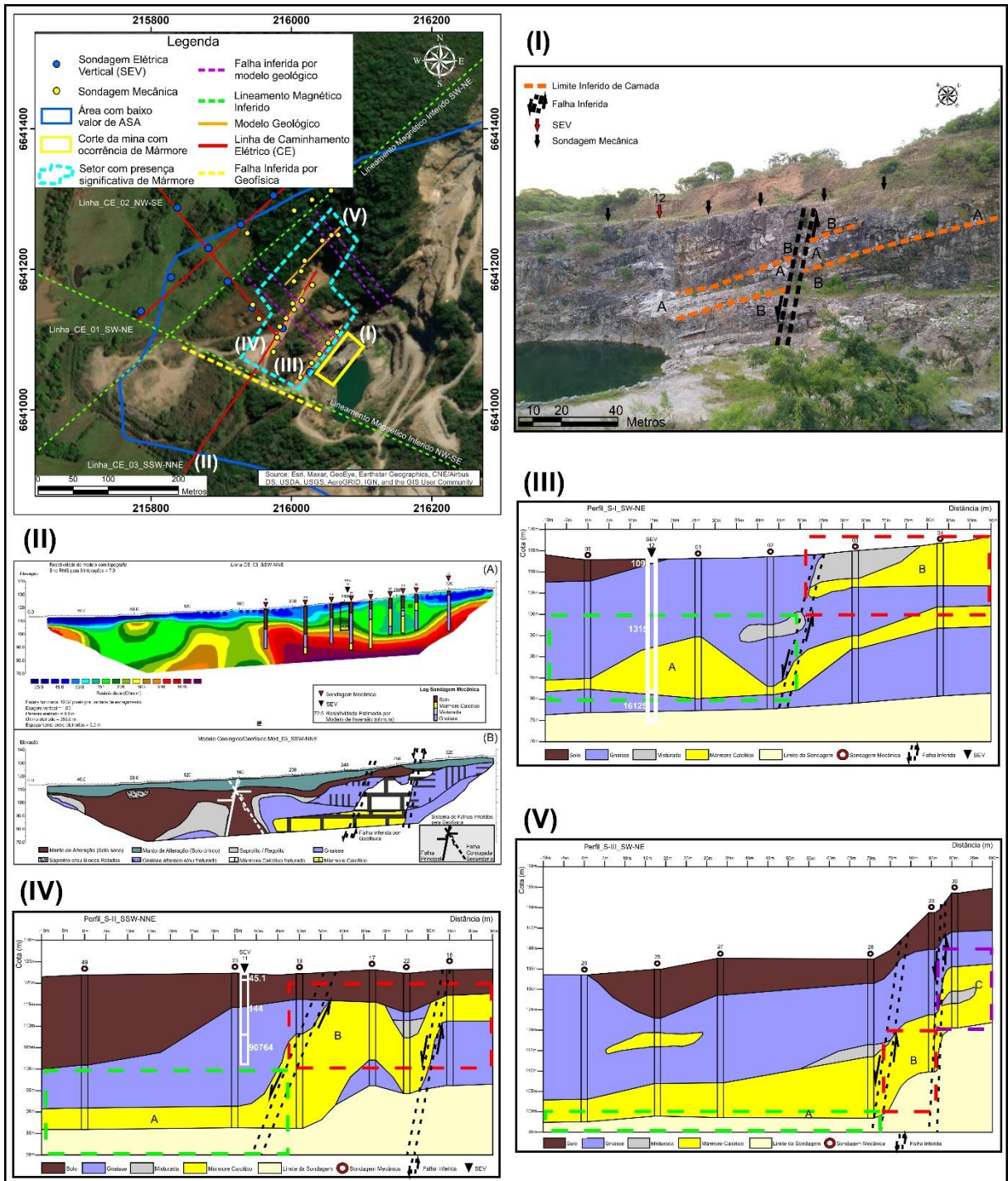


Figura 41 – Quadro de integração e localização dos principais resultados oriundos do processamento e interpretação dos dados de campo.  
 Fonte: Autor (2023).

A análise conjunta destes produtos resultou na delimitação de um setor com ocorrência significativa de mármore, está se encontra limitada entre os lineamentos magnéticos de caráter regional com direções SW-NE e NW-SE, e localizada a Noroeste (NW) do setor de extração mineral da mina Cerro da Cadeia.

A partir da delimitação desta área se gerou um banco de dados com informações litológicas que ocorrem na área e suas respectivas cotas topográficas, onde foi atribuído um valor específico para os intervalos com presença de mármore. O tratamento e interpolação deste conjunto de dados resultou em um modelo tridimensional (figura 42) estimado para a ocorrência de mármore na área estudada da mina Cerro da cadeia.

O modelo apresenta camadas significativas de mármore que se tornam mais profundas na porção Sudoeste (SW) do modelo. As mesmas são possivelmente controladas por falhas e/ou fraturas que condicionam a ocorrência das camadas de mármore em três (03) blocos: Baixo entre (80 e 100 metros); médio entre (100 e 120 metros); e alto entre (120 e 135 metros).

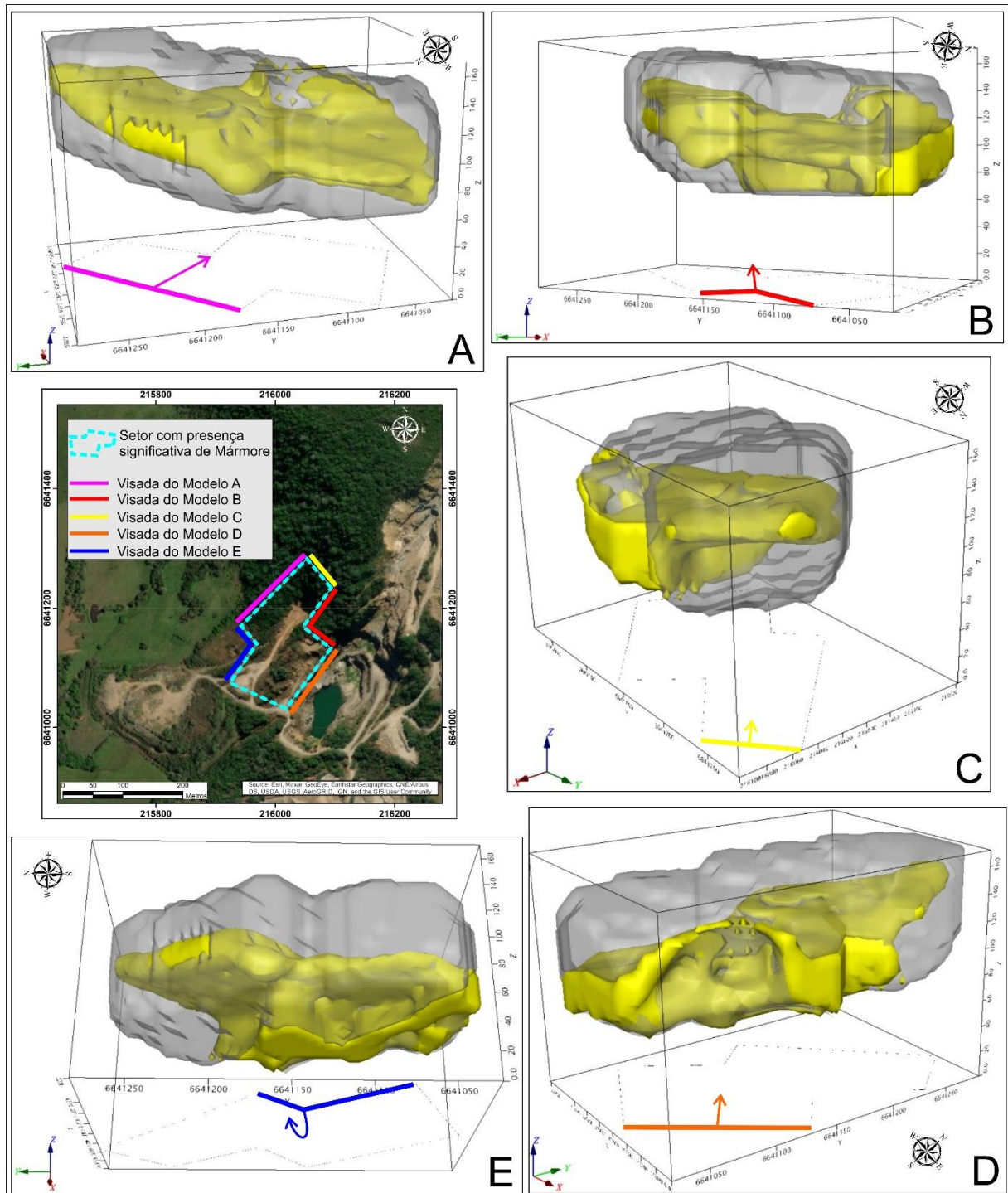


Figura 42 – Modelo tridimensional em bloco, visando a identificação do corpo de mármore, gerado para a área de estudo da mina Cerro da Cadeia, exibindo visadas de diferentes ângulos e direções, onde o bloco em amarelo representa o mármore e o bloco em tons de cinza com transparência representa o restante do meio geológico, no contexto rochoso encaixante.

Fonte: Autor (2023).

## 10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais e mais significativas conclusões para este estudo são apresentadas a seguir.

A integração dos dados permitiu identificação de dois *trends* de lineamentos magnéticos de caráter regional com direções preferencias NW-SE e SW-NE, associados à presença de falhas profundas, que afetam o topo do embasamento gnáissico, e que provavelmente mantem alguma relação tectônica com a presença de enxames de fraturas ou de falhas localizadas a uma menor profundidade, que afetam as rochas suprajacentes ao embasamento.

O setor com presença de mármore está restrito a zonas com valores baixos Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

Os modelos geológico-geofísicos elaborados a partir da integração dos dados geoeletricos e informações das sondagens mecânicas reforçam a presença das falhas inferidas associadas aos lineamentos regionais, e apresentam valores intermediários de resistividade elétrica entre 400 a 1300 Ohm.m para camadas de solos com presença de quartzitos, posicionadas em profundidade, com intercalações de camadas de mármore calcítico, que apresentam espessuras significativas, delimitadas espacialmente em setores, pela presença de um sistema de falhas, o que sugere a existência de um certo controle tectônico para a mineralização do mármore.

Os modelos 2D elaborados a partir das informações das sondagens mecânicas, sugerem a presença de falhas de caráter mais local com direção preferencial NW-SE e que condicionam as ocorrências de mármore em diferentes cotas: Camada A) entre as cotas 80 e 100m; Camada B) entre as cotas 100 e 120m; e Camada C) entre as cotas 120 e 135m.

A somatória e integração de todos os dados, possibilitou restringir a ocorrência de mármore, gerar um banco de dados, e confeccionar um modelo de bloco para a ocorrência, a qual apresenta uma direção preferencial de mineralização para Noroeste (NW) e um ângulo de mergulho para Sudoeste (SW).

Sendo assim, como guia de perspectiva de prospecção mineral para a área de estudo e para expor um quadro diagnóstico, visando à prospecção de mármore calcítico, estabelecem-se os seguintes critérios interpretativos:

- a) Setores da área de estudo que apresentam patamares anômalos de altos valores de resistividades maiores que 1300 Ohm.m, podem estar associados com rochas de composição gnáissica, as quais de fato, apresentam maiores valores de susceptibilidade magnética, do que as rochas de composição mármore calcítico.
- b) Setores da área de estudo que apresentam patamares anômalos de valores de resistividades considerados, de intermediários a altos, em torno de 400 Ohm.m a 1300 Ohm.m, podem estar associados com rochas de composição mármore calcítico, apresentando diferentes graus de alteração, e/ou, de conservação, na dependência do controle tectônico existente.

As ocorrências de mármore situadas na camada denominada A, entre as cotas 80 e 100m apresentam indícios de serem mais espessas em profundidade, portanto sugere-se fazer furos de sondagem mecânica mais profundos a fim de investigar o limite dessas camadas, o que pode aumentar significativamente a reserva de mármore.

Realizar ao menos três (03) sondagens mecânicas com no mínimo 50 metros de profundidade, a Sudoeste (SW) do lineamento magnético-estrutural de direção NW-SE, pois, nesta zona ainda ocorre valores baixos de ASA, podendo haver ocorrência de mármore em um bloco mais baixo, devido ao condicionamento estrutural.

Segundo Ferreira e Rosales (2012) modelos 2D da Anomalia Residual Magnética para a região de estudo, destacam a presença de um embasamento magnético associado a presença de rochas de composição gnáissica a uma profundidade em torno de 250 metros, com algumas intercalações de corpos intrusivos, de composição básica-ultrabásica. Logo para trabalhos futuros sugere-se uma aquisição de dados magnetométricos terrestres em escala de detalhe para a área, a fim de refinar esse modelo 2D e a delimitação dos setores que apresentam valores muito baixos e/ou negativos de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).



## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. del P. M. de.; ZERFASS, H.; BASEI, M. A. S.; PETRY, K.; GOMES, C. H. **The Acampamento Velho Formation, a lower cambrian bimodal volcanic package: geochemical and stratigraphic studies from the Cerro do Bugio, Perau and Serra de Santa Bárbara (Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brazil)**. Gondwana Research, Amsterdam, v.5, n. 3, p.721-733, 2002. DOI: [http://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70640-7](http://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70640-7).
- ALMEIDA, D. del P. M. de; CHEMALE JÚNIOR, F.; MACHADO, A. **Late to post-orogenic Brasiliano-Pan-African volcano-sedimentary basins in the Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil**. In: AL-JUBOURY, A. I. (ed.). *Petrology: new perspectives and applications*. Rijeka, Croatia: Intech, 2012.
- ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y.; BRITO-NEVES, B. B. de; FUCK, R. A. **Províncias estruturais brasileiras**. In: SIMPÓSIO DA GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande, PB. *Atas[...]* Campina Grande, PB: SBG, 1977. p. 363-391.
- ARAÚJO, Jefferson Ferraz. **Construção de um magnetômetro Hall para caracterização de partículas magnéticas utilizadas em ensaios imunológicos**. Dissertação (Mestrado em Física). Programa de Pós-Graduação em Física da PUC-Rio. Instituto de Física. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- BHATTACHARYA, P. K. & PATRA, H. P. **Direct Current Geoelectric Sounding**. Elsevier Publishing Company, New York, 1986.
- BLAKELY R.J., **Potential theory in gravity & magnetic applications**. Cambridge University Press, 1996.
- BOBACHEV, C.: **"IPI2Win"** A Windows Software for an Automatic Interpretation of Resistivity Sounding Data, Ph. D, Moscow State University, Moscow, Russia, 2002.
- BORBA, A. W.; MIZUSAKI, A. P. M.; SANTOS, J. O. S; MCNAUGHTON, N. J.; ONOE, A.T.; HARTMANN, L. A. **U/ Pb zircon and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Marica Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil**. Basin Research, [Nova Jérsey], v. 20, 359–375, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00349.x>.
- BORGES, W.R. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando GPR e eletrorresistividade**. Departamento de Geofísica-IAP/USP, 153.p. São Paulo, 2002.
- BORTOLOTTI, O. J.; **Petrografia dos Mármore de Caçapava do Sul, Ciência e Natura**. V. 9, 1987, p. 37-65.
- BRAGA, A. C. O.. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas:**

**uma abordagem metodológica e prática.** Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2006.

CARVALHO, P.F. **Reconhecimento Geológico no Estado do Rio Grande do Sul.** Instituto Geológico e Mineralógico do Brasil, Boletim 66, 1932, p.1- 72.

CERVA-ALVES, T.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V. D.; LANA, C. **Integrated ophiolite and arc evolution, southern Brasiliano Orogen.** Precambrian Research, Amsterdam, v. 341, e105648, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105648>.

CHEMALE JÚNIOR, F. **Evolução geológica do Escudo Sul-riograndense.** In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (ed.) Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, 2000. p. 13-52.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto aerogeofísico Escudo do rio grande do Sul: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos.** Vol. I, Texto técnico. Lasa Prospecções S/A, 2010.

DANIELS, F., ALBERTY, R. A.. **Physical Chemistry.** John Wiley and Sons, Inc., 1966.

DUNLOP, D. J., ÖZDEMIR, O.. In: EDWARDS, D.. **Rock magnetism.** Nova Iorque. Cambridge University Press, 1997.

FERREIRA, M. V. S. ; ROSALES, M. J. T. . **Processamento e integração de dados magnetométricos aplicados ao estudo do mapeamento geológico de rochas de composição básica/ultrabásica em uma região ao norte de Vila Nova do Sul - RS..** In: V Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2012, Salvador - BA. V SimBGf, 2012.

FIORITE, L. A.; LIMA, J. P. R. ; HANSEN, M. A. F. ; AMARAL, J. N. . **Caracterização geoeétrica e sensoriamento remoto do Mármore Dolomítico, Caçapava Do Sul - RS..** In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2014, Porto Alegre - RS. VI SimBGf, 2014.

GEOPROSPEC, Geologia, Mineração e Topografia Ltda. **Plano de Controle Ambiental (P.C.A).** Calcário Andreazza Ltda., Vila Nova do Sul, 1995.

GEOSOFT INCORPORATED. **Montaj magmap filtering; 2-d frequency domain of potential field data extension for oasis montaj v 6.1.** Toronto, Ontario, Canada, 2007.

GEOTOMO SOFTWARE. **Rapid 2-D Resistivity & Ip Inversion Using The Least-Squares Method, Res2dinv Ver 3.59.** Geoelectrical Imaging 2D & 3D, Malásia, 2010.

GORDON JÚNIOR, M. **Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.** Notas Preliminares e Estudos DNPM, Rio de Janeiro, n. 38, 1947.

HARTMANN, L.A. & REMUS, M. V. D.. **Origem e Evolução das rochas ultramáficas do Rio Grande do Sul desde o Arqueano até o Cambriano.** In: Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

HOERLLE, G. S.. **Interações e Reações Entre Fluidos Magmáticos e Marmores de Vila Nova do Sul, RS.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR, 2013.

HOLZ, M.; FRANÇA, A. B.; SOUZA, P. A.; IANNUZZI, R.; ROHN, R. **A stratigraphic chart for the Late Carboniferous/ Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America.** Journal of South American Earth Sciences, Amsterdam, v. 29, n. 2, 2010, p. 381-399.

ILHA, G. F.. **Caracterização Geofísica da Ocorrência de Mármore Dolomítico a Partir dos Métodos de Eletroresistividade e Refração Sísmica.** Trabalho de graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, 2015.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I., **An Introduction to Geophysical Exploration;** 3ª ed. United Kingdom: Blackwell Publishing Company, 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.. **Geofísica de Exploração.** Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos. Tradução de: An introduction to geophysical exploration, 2009.

KELLER, G. V., FRISCHKNECHT, F. C.. **Electrical methods in geophysical prospecting.** Pergamon Press Inc., Oxford, 1966.

LAUX, J. H. **Escudo Sul-Rio-Grandense, estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre : CPRM, 2021.

LENA, L. O. F. de; PIMENTEL, M. M.; PHILIPP, R. P.; ARMSTRONG, R.; SATO, K. **The evolution of the Neoproterozoic São Gabriel juvenile terrane, southern Brazil based on high spatial resolution U-Pb ages and  $\delta^{18}O$  data from detrital zircons.** Precambrian Research, Amsterdam, v. 247, n. 7, p. 126–138. 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.010>.

LOKE, M. H., **Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys,** 2004.

LOWRIE, W., **Fundamentals of Geophysics.** 2ª. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

LUIZ, J. G & SILVA, L. M de C. **Geofísica de Prospecção.** – Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup, 1995.

MACHADO, L. V. T.; DIAS, G. A. N.; BRAGA, M. A.. **Integração de Dados GPR e ERT no Estudo de Carbonatos da Bacia de Itaboraí-RJ/Brasil.** 16º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ/Brasil. 2019. DOI: 1022564/16cisbgf2019.115

MARQUES-TOIGO, M. **Palinologia, Bioestratigrafia e Paleocologia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Brasil.** Porto Alegre, 1988. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências. 241 p.

MENDES, J. M. B.. **Prospecção de calcário por métodos geofísicos em Matosinhos-MG Geologia – Eletrorresistividade.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, 2007, p. 265-287

MORAIS, M. S. ; FREITAS ILHA, G. ; MAGALHAES SOBRINHO, M. ; FRIGO, E. ; LIMA, M. V. A. G. . **Caracterização da ocorrência de mármore calcítico no Complexo Cambai utilizando o método da eletrorresistividade.** In: Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2015, Alegrete, RS. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2015.

NABIGHIAN, M. N.. **Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section.** *Geophysics*, v. 39, 1974, p. 85-92.

NABIGHIAN, M.N. **The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation.** *Geophysics*, v 37,1972, p. 507-517.

NAPEIA Consultoria e Projetos. **Relatório de Reavaliação de Reservas**, Porto Alegre, 2009.

NETTO, R. G.; PAIM, P. S. G.; ROSA, C. L. M. **Informe preliminar sobre a ocorrência de traços fósseis nos sedimentitos das Bacias do Camaquã e Santa Bárbara.** In: WORKSHOP SOBRE AS BACIAS MOLÁSSICAS BRASILIANAS, 1., 1992, São Leopoldo, RS. Anais[...] São Leopoldo, RS: UNISINOS, 1992. p. 90-96

ORELLANA, E. **Prospeccion geolectrica em corriente continua**, Madrid, 1972.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JÚNIOR, F.; LOPES, R. da C. **A Bacia do Camaquã.** In: HOLZ, M., DE ROS, L. F. (ed.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, 2000. p. 231- 274.

PELOSI, A. P. M. R.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Proposta de classificação para o Grupo Maricá. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33 n. 2, 2003, p.137-148.

PORCHER, C. A.; LEITES, S. R.; RAMGRAB G. E.; CAMOZZATO, E. **Passo do Salsinho, Folha SH.22-Y-A-I-4:** estado do Rio Grande do Sul. Brasília: Escala

1:100.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB, CPRM 1995.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. da C. **Cachoeira do Sul, Folha SH.22-Y-A: estado do Rio Grande do Sul.** Brasília: Escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. CPRM, 2000.

REMUS, M. V. D. **Geologia e geoquímica do Complexo Cambaizinho, São Gabriel, RS.** 1990. 267 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

RIBEIRO, G. A. P. **As propriedades magnéticas da matéria:** Um primeiro contato. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 22, 2000, 299-305.

SCHÖN, J. H. **Physical Properties of Rocks, Fundamental and Principles of Petrophysics, Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration.** Volume 18. Ed. Elsevier, 2004.

SILVA, K. C. F.. **SIG integrado a aerogeofísica no reconhecimento e delimitação de limites litológicos e estruturas - NW do Escudo Sul-Riograndense, RS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Geologia. Universidade Federal do Pampa, 2021.

SOMMER, C. A. **O vulcanismo ácido da porção sul do Platô do Taquarém, Dom Pedrito-RS.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SOMMER, C. A. **O vulcanismo neoproterozóico do Platô da Ramada, região de Vila Nova do Sul, RS.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F. de; NARDI, L. V. S.; FIGUEIREDO, A. M. G.; PIEROSAN, R. **Potassic and low- and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, Amsterdam, v. 18, p. 237–254, 2005. DOI 10.1016/j.jsames.2004.11.003.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F. de; NARDI, L. V. S.; LIZ, J. D.; WAICHEL, B. L. **The evolution of Neoproterozoic magmatism in Southernmost Brazil: shoshonitic, high-K tholeiitic and silicasaturated, sodic alkaline volcanism in post-collisional basins.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 78, n. 3, p. 573-589, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0001-37652006000300015>.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.. **Applied Geophysics.** 2 ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros - Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica.** 5.ed. LTC, 2006.

VASCONCELOS, R. M.; METELO, M. J.; MOTTA, A. C.; GOMES, R. D.  
**Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil.** CPRM, Rio de Janeiro, 1994.

WHITE, I. C. Geology of the South Brazil. **Boletim de Directivas Agrícolas, Viação, Indústria e Obras Públicas**, Rio de Janeiro, v. 6, n.8, 1906, p. 582-586.

WILDNER, W.; LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S.; SOMMER, C. **Volcanic cycles and setting in the Neoproterozoic Ill to Ordovician Camaquã Basin Succession in Southern Brazil: characteristics of post-collisional magmatism.** Journal of Volcanology and Geothermal Research, Amsterdam, v. 2495, 2002, p. 1-23.

WILDNER, W.; NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. **Postcollisional alkaline magmatism on the Taquarembó Plateau: a well preserved Neoproterozoic-Cambrian Plutono--volcanic association in southern Brazil.** International Geology Review, v. 41, 1999, p. 1082-1098.