

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARIELI MACHADO ZAGO

**GEOFÍSICA APLICADA A CARACTERIZAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM
MINA SUBTERRÂNEA E O ESTUDO DA SUAVIZAÇÃO DO RUÍDO EM SEÇÕES
GEOELÉTRICAS**

Caçapava do Sul

2017

MARIELI MACHADO ZAGO

**GEOFÍSICA APLICADA A CARACTERIZAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM
MINA SUBTERRÂNEA E O ESTUDO DA SUA VIZAÇÃO DO RUÍDO EM SEÇÕES
GEOELÉTRICAS**

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

Orientador: Maximilian Fries

Caçapava do Sul

2017

MARIELI MACHADO ZAGO

**GEOFÍSICA APLICADA A CARACTERIZAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM
MINA SUBTERRÂNEA E O ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO RUÍDO EM SEÇÕES
GEOELÉTRICAS**

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

Área de concentração: Geociências

Dissertação defendida e aprovada em: 29 de novembro 2017.
Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira
UFPR

Prof. Dra. Cristiane Heredia Gomes
UNIPAMPA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Selso e Marieta Zago, ao mano Bruno e a Durga.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Selso e Marieta pelo incentivo, carinho e apoio em momentos felizes e principalmente por compreender e respeitar meu espaço em momentos de extremo encontro com meu próprio eu.

Ao Bruno pelo simples fato de ser o melhor mano que poderia existir, como gato e rato a gente se entende, se respeita e aprende todos os dias um com o outro, obrigada por me fazer rir de tudo desde sempre.

Ao Cris Amorim que trouxe até meus olhos a capacidade de enxergar um novo rumo em minha trajetória, a ti digo que, um café, palavras sinceras e geografia mudam sim a vida das pessoas.

A Durga, presente em minhas horas de estudo e dona de um coração enorme que me fez seguir adiante mesmo depois de momentos que perdia a esperança e o sossego mental.

Ao Max, que me incentivou desde o princípio, nada teria sido tão intenso e verdadeiro se não fosse suas palavras e seus conselhos. Além de nossa enorme amizade e conexão incrível eu guardo no coração um grande orgulho, respeito e admiração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Maximilian Fries que proporcionou todo o suporte para que todas as minhas necessidades geofísicas fossem supridas. No Laboratório de Geofísica Aplicada enfrentamos dragões e lutamos lado a lado em prol de resultados finais, foram inúmeras horas dedicadas a projetos, saídas de campo, pesquisas e reuniões. Obrigada pela confiança ao longo de todos estes anos.

Ao meu fiel escudeiro Filipi Godinho por estar sempre disposto a enfrentar desafios acadêmicos e principalmente, estar presente nos momentos que mais precisei com sua calma e serenidade invejáveis.

Aos meus colegas, por serem do jeitinho que são, turma de muita personalidade, juntos enfrentamos medos, desafios e através de nossa competitividade crescemos como seres humanos e como profissionais.

A equipe Orinoco Gold e Mineração Curral de Pedra pela oportunidade de estagiar e estar em contato com profissionais que além de acrescentar conhecimento agregaram uma visão de mercado de trabalho, mundo e relações humanas que levarei com respeito e carinho para toda minha vida.

Ao Orlando Leite, geofísico que em pouco tempo mostrou-me um novo caminho em dias de tempestade, seus ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento de meu ócio criativo na elaboração deste projeto.

A Sociedade Brasileira de Geofísica SBGf que através do apoio financeiro por meio de bolsa de iniciação científica proporcionou todo o suporte para que fosse viável e possível a elaboração e execução deste projeto.

“... Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida e viver com paixão, perder com
classe e vencer com ousadia, porque o mundo
pertence a quem se atreve e A VIDA É
MUITO para ser insignificante”

Charles Chaplin

RESUMO

Recursos minerais são fundamentais para a existência da humanidade e sua exploração é sinônimo de avanço desde a época de nossos ancestrais. O século XXI tem como característica a preocupação com os recursos hídricos do planeta Terra, a preservação e a reutilização de forma sustentável é uma das principais metas da população. A mineração de energias renováveis e não renováveis ocorre geralmente por meio da abertura de minas subterrâneas ou cavas a céu aberto, algumas desenvolvem-se abaixo do nível freático, com isso há a percolação de água em subsuperfície. Em casos em que o volume de água é relativamente grande ocorre prejuízos e atrasos nos processos de exploração dos recursos minerais. Com isso há a necessidade de uma investigação mais aprofundada para a caracterização da zona de recarga de maior intensidade do aquífero e posterior solução da infiltração da água de forma sustentável e que não ocasione agressão para o meio ambiente. Neste trabalho sugere-se o uso da geofísica aplicada por meio do método de eletrorresistividade para a caracterização do entorno de uma mina subterrânea em pleno funcionamento no município de Faina, estado de Goiás. Foram geradas seções de eletrorresistividade e modelos de visualização tridimensionais e por meio dos contrastes de resistividade elétrica em subsuperfície foram delimitados baixos anômalos de resistividade elétrica para a identificação da zona de recarga. A partir das seções 2D foi realizado um experimento com a finalidade de analisar e minimizar os ruídos visíveis das seções com o uso de filtragem juntamente com o processo de inversão dos pontos de medida de resistividade elétrica. Obteve-se resultados satisfatórios no estudo de caso de grande escala envolvendo a problemática de infiltração em mina subterrânea e os testes experimentais se mostraram eficazes no auxílio do procedimento de obtenção da qualidade dos resultados finais de seções 2D, com a redução/atenuação do ruído visível em uma porção da área de pequena escala estudada.

Palavras-chave: zonas de recarga, geofísica aplicada, método de eletrorresistividade, processamento de dados, qualidade das seções geoeletricas.

ABSTRACT

Mineral resources are fundamental to the existence of mankind and their exploitation is synonymous with advancement since the time of our ancestors. The twenty-first century is characterized by concern for the water resources of the planet Earth, preservation and reuse in a sustainable way is one of the main goals of the population. Renewable and non-renewable energy mining usually occurs through the opening of underground mines or open pit caves, some of which develop below the water table, with sub-surface water percolation. In cases where the volume of water is relatively large, there are losses and delays in the exploitation of mineral resources. With this, there is a need for a more in-depth investigation to characterize the recharge zone of greater intensity of the aquifer and subsequent solution of water infiltration in a sustainable way and that does not cause aggression to the environment. This work suggests the use of applied geophysics by means of the electroresistivity method to characterize the surroundings of an underground mine in full operation in the municipality of Faina, state of Goiás. Electroresistivity sections and three - dimensional visualization models were generated and by means of the resistivity contrasts in subsurface, anomalous resistivity lows were determined to identify the recharge zone. From the 2D sections an experiment was carried out with the purpose of analyzing and optimizing the visible noises of the sections with the use of filtrations together with the process of reversing the electrical resistivity measurement points. Satisfactory results were obtained in the large-scale case study involving the infiltration problem in underground mine and the experimental tests proved to be effective in aiding the procedure of obtaining the quality of the final results of 2D sections with the reduction/attenuation of visible noise, in a portion of the small-scale area studied.

Keywords: recharge zones, applied geophysics, electroresistivity method, data processing, geoelectric section quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Em a) Área de estudo com municípios e rodovia GO-164, b) detalhe da área com estradas de acesso.	10
Figura 2 - Ilustração das características no entorno da mina Cascavel.....	10
Figura 3 - Galerias subterrâneas da mina Cascavel e indicação da localização da percolação de água nas faces de desenvolvimento (A, B e C).	11
Figura 4 - Fotos da água nas faces de desenvolvimento A, B e C. Em a) localizada no plano inclinado, b) grande quantidade de água na galeria e c) água na rampa de acesso das galerias.....	12
Figura 5 - Veios de quartzo com óxido de manganês (seta vermelha) no entorno das galerias subterrâneas.....	12
Figura 6 – Esquema composto por a) Estado de Goiás com o Maciço de Goiás, b) Maciço de Goiás com os complexos granito gnáissicos e Greenstone Belts, no retângulo vermelho o GBF.....	13
Figura 7- Coluna estratigráfica do Greenstone Belt Faina.....	14
Figura 8 – Mapa das litologias da área de estudo e localização das galerias subterrâneas da mina Cascavel.	15
Figura 9 - Circuito elétrico com bateria e resistência.	17
Figura 10 - Circuito elétrico com material de comprimento L e área de seção de reta A.	18
Figura 11 – Superfície de um semi-espaco com eletrodo de corrente e potencial.....	19
Figura 12 - Determinação do potencial com eletrodos de corrente e de potencial e o campo gerado em subsuperfície.	20
Figura 13 - Disposição dos eletrodos do arranjo wenner em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.	22
Figura 14 - Disposição dos eletrodos do arranjo dipolo dipolo em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.	23
Figura 15 - Disposição dos eletrodos do arranjo polo-dipolo em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.	24
Figura 16 - Disposição dos eletrodos do arranjo wenner schlumberger em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.	25
Figura 17 – Ilustração de uma superfície com eletrodo de corrente (C1), eletrodo de potencial (C2).	31
Figura 18 - Fluxo de atividades realizadas na etapa do estudo de caso.	33
Figura 19 - Mapa de localização das linhas programadas para a campanha geofísica.	34

Figura 20 - Resistivímetro Syscal Pro, unidade de aquisição, bateria, multicabos de conexão e eletrodos.....	35
Figura 21 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo Wenner.	36
Figura 22 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo wenner schlumberger.	37
Figura 23 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo dipolo dipolo.....	37
Figura 24 - Sequência elaborada para o arranjo polo dipolo.	38
Figura 25 - Esquema representando o desenvolvimento do arranjo polo-dipolo em campo.....	39
Figura 26 - Fluxo das atividades da etapa de análise e otimização de ruídos das seções de resistividade elétrica.....	41
Figura 27- Comparação das seções 180_A, 160_A, 220_A.	42
Figura 28 - Gráfico com os valores de resistividade elétrica do primeiro nível de investigação (vermelho) e resistividade elétrica com aplicação do filtro (verde).....	43
Figura 29 – Fluxograma explicativo do desenvolvimento dos testes em a) 1º teste, b) 2º teste, c) 3º teste e d) 4º teste.	44
Figura 30 – Seções de eletrorresistividade dos arranjos a) dipolo-dipolo, b) polo-dipolo, c) Wenner e d) Wenner-Schlumberger.....	46
Figura 31- Seções de eletrorresistividade para cada perfil executado na campanha geofísica.....	49
Figura 32 - Mapa de localização dos perfis identificados por cores e nomes.....	50
Figura 33 - Em a) mapa de altimetria com os perfis executados e as galerias da mina cascavel (60 % de transparência), b) Galerias subterrâneas com identificações em pontos importantes.	50
Figura 34 - Em a, b, e c modelos de visualização 3D da resistividade elétrica das seções entre 0 e 200 ohm.m e galerias subterrâneas.	51
Figura 35 – Seções de eletrorresistividade da linha 180_A em a) invertida em b) filtrada com o teste 3.....	51
Figura 36 - Gráficos de resistividade elétrica dos quatro primeiros níveis de profundidade para o teste 3.....	52
Figura 37 – Modelo de visualização tridimensional em a) dos níveis de profundidade invertidos e em b) níveis de profundidade invertidos e filtrados (teste 3).....	53
Figura 38 - Seções de resistividade elétrica da linha 180_A em a) invertida, b) filtrada.	54
Figura 39 – Seções de resistividade elétrica da linha 160_A em a) invertida, b) filtrada.....	55
Figura 40 - Gráficos das resistividades elétricas invertidas e filtradas a) Seções no 2º nível de investigação, b) Seções no 4º nível de investigação e c) Seções no 6º nível de investigação.	55
Figura 41 - Seções de resistividade elétrica da linha 140_A em a) invertida, b) filtrada.	56

Figura 42 - Modelo de visualização 3D em níveis de profundidade da resistividade elétrica nas três seções com o procedimento de inversão.	56
Figura 43 – Modelo de visualização em níveis de profundidade da resistividade elétricas nas três seções com o procedimento de filtragem e inversão (teste 4).....	56
Figura 44 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo dipolo-dipolo.....	64
Figura 45 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo polo-dipolo.....	65
Figura 46 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo Wenner.....	66
Figura 47 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo Wenner-Schlumberger.	66
Figura 48 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A e especificações do processamento.	68
Figura 49 - Seção da resistividade elétrica da Linha 140_A e especificações do processamento.	69
Figura 50 - Seção da resistividade elétrica da Linha 150_M e especificações do processamento. ...	69
Figura 51 - Seção da resistividade elétrica da Linha 160_A e especificações do processamento.	70
Figura 52 - Seção da resistividade elétrica da Linha 160_M e especificações do processamento. ...	70
Figura 53 - Seção da resistividade elétrica da Linha 180_A e especificações do processamento.	71
Figura 54 - Seção da resistividade elétrica da Linha 180_M e especificações do processamento. ...	71
Figura 55 - Seção da resistividade elétrica da Linha 190_M e especificações do processamento. ...	72
Figura 56 - Seção da resistividade elétrica da Linha 200_A e especificações do processamento.	72
Figura 57 - Seção da resistividade elétrica da Linha 210_M e especificações do processamento. ...	73
Figura 58 - Seção da resistividade elétrica da Linha 220_A e especificações do processamento.	73
Figura 59 - Seção da resistividade elétrica da Linha 230_M e especificações do processamento. ...	74
Figura 60 - Seção de eletrorresistividade (uso do filtro) da linha 140_A e especificações.	75
Figura 61 - Seção de eletrorresistividade (uso do filtro) da linha 160_A e especificações.	76
Figura 62 - Seção de eletrorresistividade (uso do filtro) da linha 180_A e especificações.	76

LISTA DE SÍMBOLOS

I – Corrente elétrica

t – Tempo

q – Carga elétrica

J – Densidade de Corrente

A – Área de secção de reta

ρ – Resistividade elétrica

E – Campo elétrico

R – Resistência

L – Comprimento

V – Potencial

k_{geom} – Fator Geométrico

X – Distância

ΔV – Diferença de Potencial

σ_e – Condutividade elétrica

e – Módulo de carga eletrônica

z_i – Valência (em módulo e sinal)

c_i – Concentração volumétrica

μ_{ei} – Mobilidade de cada espécie iônica

t_j – Número de transferência de Hittorf

c_j – Concentração de íon na espécie j no eletrólito

σ'_{ei} – Condutividade específica

c – Concentração do eletrólito na solução

ρ – Porosidade

ρ_p – Fração de poros

W - Filtro de rugosidade

λ - Fator de amortecimento do filtro de rugosidade

q_{i-1} - Modelo de inversão de corrente

Δ_{qi} - Alteração na resistividade do modelo a ser calculado

g - Diferença entre valores de resistividade aparente medidos e calculados

JZ - Matriz Jacobiana de derivadas parciais ou sensibilidade.

N – Número total de pontos de medida de resistividade

d_i^{Pred} – Valores de resistividade elétrica previstos

d_i^{Meas} – Valores de resistividade elétrica medidos.

δ_τ – Resistividade elétrica dentro de um pequeno volume

δ_ρ – Pequena quantidade de resistividade elétrica

δ_ϕ – Mudança de potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
3 JUSTIFICATIVA – ESTUDOS ANTERIORES	7
4 ÁREA DE ESTUDO	9
4.1 Localização	9
4.2 Mina Cascavel – características	10
4.3 Geologia Regional	12
4.4 Geologia local	15
4.5 Contexto Hidrogeológico	16
5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
5.1 Conceitos da física eletromagnética	16
5.1.2 A física aplicada no método geofísico de eletrorresistividade	19
5.1.3 Arranjos de eletrodos	21
5.1.4 Propriedades elétricas dos materiais - rochas e fluídos	25
5.1.5 Resistividade elétrica dos materiais	27
5.2 Processamento de dados	29
5.2.1 Inversão e software de processamento	30
5.2.2 Sensitividade dos arranjos	31
5.2.3 O uso do filtro não linear no processamento de dados geofísicos	32
6 MATERIAIS E MÉTODOS	32
6.1 Estudo de caso	32
6.1.1 Planejamento dos perfis	34
6.1.2 Comparação de arranjos – Configuração de sequências	35
6.1.3 Processamento	38
6.1.4 Campanha geofísica	39
6.2 Análise e suavização de ruídos das seções de resistividade elétrica	40
6.2.1 Escolha das seções de eletrorresistividade	41

6.2.2 Testes de procedimentos para a redução de ruídos	43
6.2.3 Desenvolvimento dos testes	43
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
7.1 Estudo de caso:	45
7.1.1 Comparação de arranjos	45
7.1.2 Seções de eletrorresistividade da campanha geofísica.....	47
7.2 Análise de ruídos das seções de eletrorresistividade.....	51
7.2.1 Modelo final do teste da análise de ruídos das seções de resistividade	53
8 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE I	64
APÊNDICE II.....	67
APÊNDICE III	75

1 INTRODUÇÃO

Os bens minerais são fundamentais na subsistência da nossa civilização. São constituintes da matéria-prima formadora de todos materiais e ferramentas empregados pelo homem desde a pré-história e são essenciais em atividades econômicas como o agronegócio, construção civil, indústrias, ou seja, todas as cadeias produtivas e necessidades da humanidade.

O século XIX foi marcado pela mineração do carvão mineral, que desde o século XVIII foi o responsável pela geração de vapor para movimentar as máquinas, depois o vapor passou a ser aproveitado na produção de energia elétrica (ANEEL, 2008). O século XX foi marcado pela extração do petróleo que impulsionou a indústria automobilística, a aeronáutica, a naval e a petroquímica, bem como proporcionou inúmeros confortos como as primeiras cidades iluminadas em larga escala com querosene e gás, fogões domésticos abastecidos com gás liquefeito de petróleo, plásticos, fios elétricos e tecidos sintéticos (ALMANAQUE ABRIL, 2011). O atual século XXI tem como principal desafio a conscientização da sociedade da necessidade do uso sustentável dos recursos hídricos. A água é vital para a vida humana, pode-se viver sem eletricidade, sem petróleo, com menos conforto, mas é possível. A escassez de água não é apenas física, mas também pode ser econômica, no sentido de não haver recursos (LOPES, 2009).

A água é importante também para o funcionamento de processos e operações em atividades de mineração. Algumas minas desenvolvem-se abaixo do nível freático e há incidência, além das águas superficiais e meteóricas, da flutuação do nível freático com menor ou maior intensidade. Em alguns casos ocorre grande vazão em galerias subterrâneas e cavas acarretando, conseqüentemente, prejuízos e atrasos nos processos de exploração dos recursos minerais (RUBIO, 2006).

Em diversas minas espalhadas ao redor do mundo ocorre a extração de maior quantidade de água do que minério, esse é o caso de minas localizadas abaixo do nível piezométrico, de aquíferos livres e confinados, dos quais deve ser bombeada enquanto durar a exploração da mina. É necessário a implementação de ações para reduzir o acesso de águas à lavra com medidas como o desvio do escoamento superficial, o aproveitamento de barreiras geológicas, a prevenção do fraturamento de tetos, trabalhos de impermeabilização, dentre outros. Se as medidas de prevenção não satisfizerem a problemática, pode-se efetuar a drenagem da mina. Uma tecnologia muito conveniente é a Drenagem Preventiva em Avanço (DPA) (RUBIO, 2006).

A técnica DPA consiste em extrair a água do aquífero em setores afastados a uma certa distância da lavra, de maneira que a água não seja afetada pelas operações da mina, dessa forma é possível reduzir o nível piezométrico abaixo das cotas da frente de lavra, podendo obter-se água para atender as demandas das operações de mineração e a de abastecimentos de quaisquer tipos. A DPA é aplicada em diversos tipos de mineração, como, por exemplo, em minas de zinco, carvão-bauxita e ouro (RUBIO, 2006).

Neste trabalho sugere-se o uso da geofísica onde há a problemática de infiltração de água em galerias de minas subterrâneas de exploração aurífera. A partir do contraste da resistividade elétrica dos materiais em subsuperfície é possível determinar o contato entre a zona insaturada e saturada (nível d'água), a profundidade e principais estruturas associadas a um maciço rochoso.

A aplicação da geofísica constitui uma ferramenta de investigação indireta não invasiva, sendo os métodos geoeletricos amplamente usados e vantajosos considerando-se a rapidez de execução e os resultados obtidos. Estudos anteriores (FILHO, 1997; OLIVA, et al., 2006; OLIVEIRA, 2011; NAZARUDDIN et al., 2017) corroboram com as premissas expostas e apresentam resultados satisfatórios utilizando o método geofísico de eletrorresistividade no estudo de localização de zonas de recarga e caracterização de diferentes tipos de aquíferos. A partir da localização das zonas de recarga serão sugeridos melhores pontos para a exploração da água com a instalação de poços de drenagens, visando a utilização técnica de DPA.

Considerando a detecção e delimitação das zonas anômalas resistivas/condutivas por meio de modelos matemáticos (níveis de investigação) é importante levar-se em conta que entre o meio investigado e os sensores/receptores além do material (solos e rocha) há influência externa como ruídos antrópicos e naturais do meio. Estudos anteriores (INMAN, 1975; ZHDANOV e YOSHIOKA, 2005; CHRISTENSEN e DODDS, 2007; ALMEIDA e RIJO, 2011; KEATING e PINET, 2011) mostram a utilização de métodos lineares e não lineares para a filtragem de dados com características ruidosa, utilizados em diversos métodos da geofísica aplicada, bem como complemento para a modelagem com técnicas de inversão. Com isso, neste estudo sugere-se também, a análise e otimização de ruídos das seções de resistividade elétrica por meio do reprocessamento de dados com a aplicação de filtragem não linear.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo da pesquisa é a aplicação do método geofísico de eletrorresistividade a partir da técnica de caminhamento elétrico para localizar zonas de recarga

(percolação) de água nos arredores de uma mina subterrânea. Especificamente foram realizados procedimentos experimentais visando a redução do ruído visível por meio da aplicação de filtros de suavização dos valores brutos de resistividade adquiridos na área.

Para a elaboração do estudo proposto foram estabelecidas duas etapas principais:

Estudo de Caso

- Comparar os arranjos geométricos obtidos e respectivas respostas a partir da execução dos mesmos em uma linha teste e escolha do mais satisfatório para utilização no estudo de caso;
- Processar dados de eletrorresistividade e gerar seções de resistividade elétrica para detecção e caracterização das zonas de recarga;
- Gerar modelo de visualização 3D das zonas condutivas (zonas de recarga) e galerias existentes na mina subterrânea.

Análise de ruídos de seções de resistividade elétrica

- Detectar e seleccionar os ruídos em seções de resistividade elétrica processadas para a problemática do estudo de caso;
- Definir a seção experimental com base nos ruídos visíveis e erro RMS;
- Realizar testes para determinar filtro para a suavização de picos de resistividade elétrica;
- Elaborar e executar as tentativas de ajuste do ruído visível;
- Apresentar um modelo final de uma porção da área de estudo com a aplicação da sugestão de reprocessamento de dados das seções de eletrorresistividade;
- Gerar gráficos, seções 2D e mapas de visualização 3D apresentando os diferentes níveis de profundidade para os resultados obtidos.

3 JUSTIFICATIVA – ESTUDOS ANTERIORES

A identificação de anomalias condutivas correlacionadas com a presença de zonas saturadas em subsuperfície foram publicados e apresentaram significantes resultados, como, por exemplo, Filho (1997) com o objetivo de determinar a profundidade do topo até o embasamento cristalino de aquíferos aluviais e orientação geral das zonas fraturadas do embasamento em aquífero cristalino, onde obteve-se os resultados esperados e estes foram confirmados por meio de sondagens mecânica.

Elis et al. (2004) interpretaram qualitativamente variações laterais de resistividade com a técnica de Caminhamento Elétrico, relacionadas a contatos geológicos, zonas de falhas e fraturas. O estudo da estratigrafia, profundidade e a posição do aquífero livre foi analisado com ensaios de Sondagem Elétrica Vertical.

Seções de eletrorresistividade integradas a estudos estruturais forneceram a Oliveira (2011) um modelo que auxiliou na identificação de rochas fraturadas do embasamento cristalino e áreas propícias para locação de poços, Oliva et al. (2006) elaboraram um modelo geoeletrico com determinação da profundidade d'água e as diferentes litologias existentes em uma zona de recarga do Sistema Aquífero Guarani e Nazaruddin et al. (2017) integraram os contrastes de resistividade elétrica com dados geológicos e identificou zonas potencialmente favoráveis para obtenção de água subterrânea.

A técnica DPA traz benefícios sustentáveis para o consumo interno nas minas e para o abastecimento de comunidades e áreas próximas. Na mina de zinco de Reocín, na Cantabria, Espanha, com uma vazão média de 1200 L/s (litros por segundo) é utilizada para atender todos os requerimentos da mina, abastecimento de grandes indústrias e manutenção da vazão ecológica dos rios até cessar o bombeamento. Em minas de carvão-bauxita no entorno do lago Balatón, na Hungria, ocorre a extração de milhares de metros cúbicos de água com o uso de poços de drenagem em avanços perfurados na superfície e no interior da mina. A água é destinada para o abastecimento de, aproximadamente, meio milhão de habitantes. A drenagem é realizada a partir de uma série de poços situados no entorno das lavras subterrâneas (RUBIO, 2006).

Na mina de ouro de Batze-Post, localizada em Carlin Trend, Nevada, Estados Unidos, ocorre a exploração de uma jazida a céu aberto, corresponde a um depósito epitermal de ouro, localizado em carbonatos metamorfizados do Devoniano e em rochas intrusivas que hospedam o ouro. A drenagem é realizada a partir de poços, perimetrais e no interior da cava, bombeando 3670 L/s. Dessa água, aproximadamente, 5% é destinada ao consumo da mina; 10 % à irrigação de cerca de 2000 hectares; e 85% é reinjetado no mesmo sistema hidrogeológico, a distância, mediante poços profundos e recarga através de barragens de superfície (RUBIO, 2006).

O uso de métodos geofísicos requer um tratamento dos dados brutos adquiridos em campo, estes são realizados por meio de inversões (problema inverso), modelagens (problema direto) e a utilização de modelos matemáticos. Em 1975 Inman realizou estudos com métodos de inversão chamado de regressão de cume "*ridge regression*" para a interpretação de curvas de resistividade aparente. O método mostrou-se satisfatório, uma vez que foi possível encontrar

modelos geológicos que harmonizam-se aos dados, indicando a precisão do ajuste em relação ao ruído nos dados e prevê a precisão com que cada parâmetro é estimado.

Almeida e Rijo (2011), apresentaram soluções numéricas, através do método dos elementos finitos tridimensionais, para modelos geoeletricos mCSEM 3D (*marine Controlled Source Elettromagnetic*). Foi realizada a inversão de um modelo geoeletrico do mCSEM 3D para duas frequências, os resultados foram satisfatórios, ou seja, sem instabilidade numérica e incoerência na solução do problema. Christensen e Dodds (2007), utilizaram uma variação do método não linear Gauss-Newton (Tarantola e Valette, 1982) juntamente com estabilizadores para solucionar o problema da inversão de dados mCSEM 1D. Os dados observados usados na inversão eram as amplitudes e as fases de componentes eletromagnéticos com contaminação por ruídos. Zhdanov e Yoshioka (2005) utilizaram uma equação integral e o método não linear do gradiente conjugado para solucionar problemas de ruídos e altas amplitudes de dados direto e inverso de mCSEM 3D.

Keating e Pinet (2011) utilizaram um filtro não linear para remover gravidade regional e anomalias magnéticas, concluíram que o modelo obtido com a aplicação do filtro forneceu um componente regional da gravidade e campo magnético semelhante ao obtido a partir de uma separação gráfica.

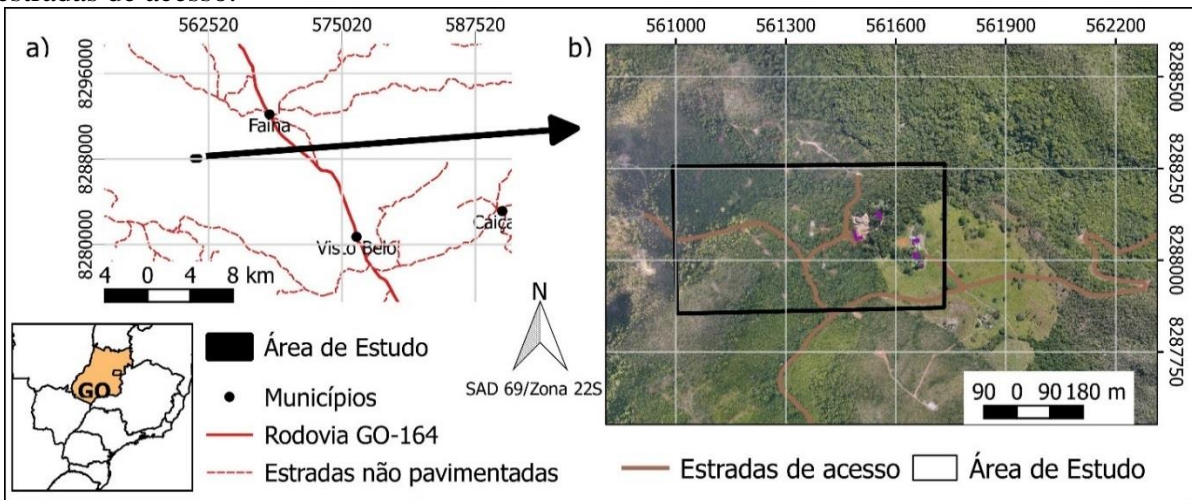
4 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo serão abordadas especificações da localização da área de estudo, as características e a problemática envolvida nas galerias subterrâneas da mina, a geologia em um contexto regional e local e por fim características do contexto hidrogeológico da região.

4.1 Localização

A área de estudo situa-se a 8 km da zona urbana do município de Faina, aproximadamente 250 km da capital Goiânia, Estado de Goiás, Brasil. No local encontra-se as instalações da Mineração Curral de Pedra Ltda, fundada em 24/11/2011 e que tem como atividade principal a extração de ouro em galerias de mina subterrânea denominada de Mina Cascavel. O acesso se dá pela rodovia GO-164, com um trecho de 8 km em estrada não pavimentada (Figura 1a).

Figura 1 – Em a) Área de estudo com municípios e rodovia GO-164, b) detalhe da área com estradas de acesso.

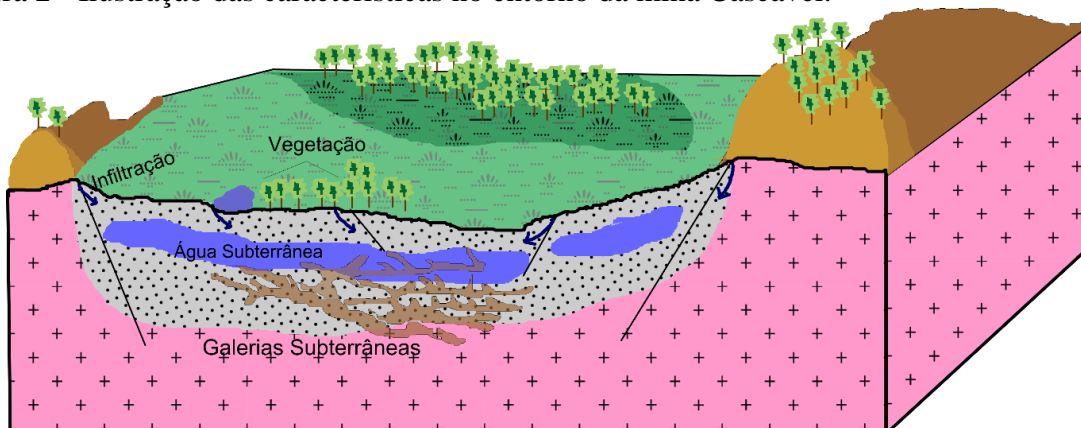


Fonte: adaptado de SIEG (2017) e ORINOCO GOLD (2017).

4.2 Mina Cascavel – características

A área de estudo possui relevo acentuado, vegetação densa e ocorrência de estruturas geológicas que facilitam a percolação de água para o entorno de galerias da mina subterrânea Cascavel (Figura 2).

Figura 2 - Ilustração das características no entorno da mina Cascavel.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

A grande quantidade de água encontrada no desenvolvimento das galerias é devido aos veios de quartzo encaixados em rochas quartzitos feldspáticos, esses veios facilitam o fluxo de água. A mina encontra-se em pleno funcionamento devido ao auxílio de bombas que realizam a drenagem da água para a superfície. São duas bombas operando com uma taxa de vazão de 75 m³/h cada (ORINOCO GOLD, 2017).

A mina Cascavel possui três principais faces de desenvolvimento nas galerias subterrâneas, a água nessas faces, migra constantemente de uma para a outra. Uma dessas faces sempre terá um volume maior de água, alternando conforme o aprofundamento das três galerias (MINERAÇÃO CURRAL DE PEDRA, 2017) (Figura 3).

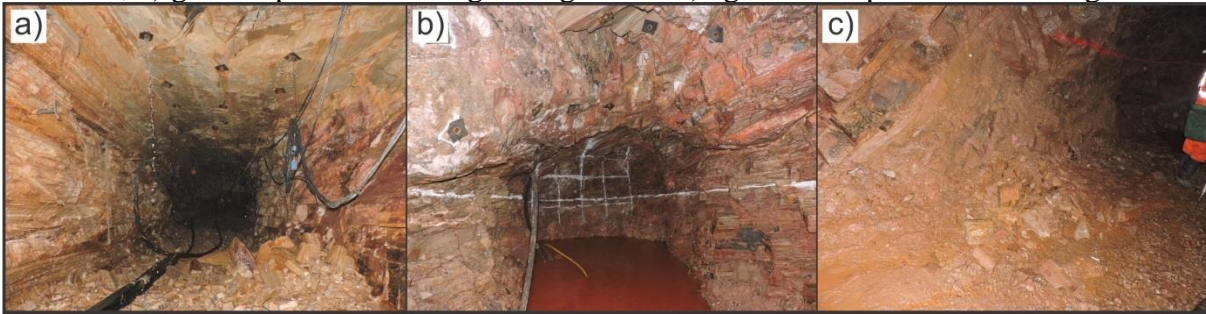
Figura 3 - Galerias subterrâneas da mina Cascavel e indicação da localização da percolação de água nas faces de desenvolvimento (A, B e C).



Fonte: MINERAÇÃO CURRAL DE PEDRA (2017).

Com o avanço das galerias ocorre a redução ou o aumento do volume de água. Na figura 4a observa-se água percolando pelas cavilhas do teto da galeria e por fraturas no desenvolvimento do plano inclinado. Na figura 4b observa-se água acumulada que migra por meio de fraturas e na Figura 4c nota-se um pequeno volume de água no piso, proveniente de fraturas na rampa de acesso das galerias.

Figura 4 - Fotos da água nas faces de desenvolvimento A, B e C. Em a) localizada no plano inclinado, b) grande quantidade de água na galeria e c) água na rampa de acesso das galerias.



Fonte: MINERAÇÃO CURRAL DE PEDRA (2017).

A percolação de água ocorre devido aos *stockworks* de quartzo com manganês (Figura 5). A baixa porosidade dos veios sela a água nos blocos gerados entre os *stockworks* e a água migra ao longo dos planos desses veios e entre os planos da foliação da rocha.

Figura 5 - Veios de quartzo com óxido de manganês (seta vermelha) no entorno das galerias subterrâneas.



Fonte: MINERAÇÃO CURRAL DE PEDRA (2017).

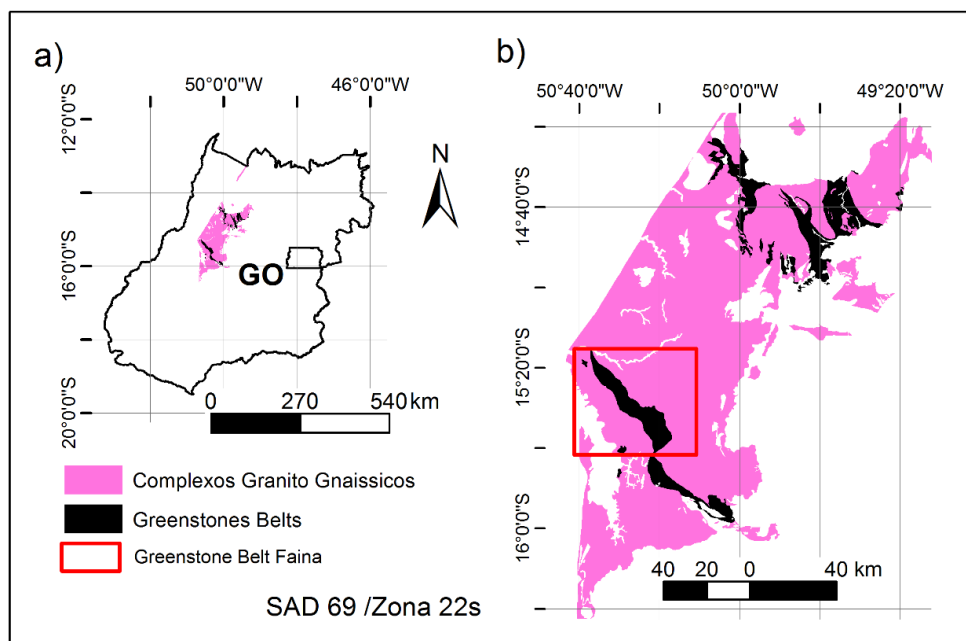
4.3 Geologia Regional

A área proposta está inserida na Província Estrutural Tocantins desenvolvida durante o Ciclo Brasileiro que ocorreu no Neoproterozoico (ALMEIDA et al., 1977), sendo, o Maciço de Goiás, principal representante da província, situado na região centro-oeste de Goiás e na porção central da Província de Tocantins (Figura 6a). É formado por segmentos colisionais brasileiros que envolvem um microcontinente arqueano (FUCK, 1994). O maciço é composto por Complexos Granito-gnáissicos, correspondente a 80% da área total, e por *Greenstone Belts* com 20% da área (JOST et al., 2005) (Figura 6b).

Na porção norte do Maciço estão situados os complexos Hidrolina, Moquén e Anta, divididos entre si pelos *Greenstone Belts* de Pilar de Goiás, Guarinos e Crixás. Na porção Sul encontram-se os complexos Caiçara e Uvá, divididos pelos *Greenstone Belt* da Serra de Santa Rita e Faina (GBF) sendo, este último, onde está inserida a área de estudo do presente trabalho.

O GBF é separado por uma falha direcional N30°E designada Falha de Faina, o contato com os complexos adjacentes é tectônico e a rara ocorrência de *klippen* nos ortognaisses indica que estas rochas supracrustais são alóctones (JOST et al., 2005, 2013).

Figura 6 – Esquema composto por a) Estado de Goiás com o Maciço de Goiás, b) Maciço de Goiás com os complexos granito gnáissicos e *Greenstone Belts*, no retângulo vermelho o GBF.



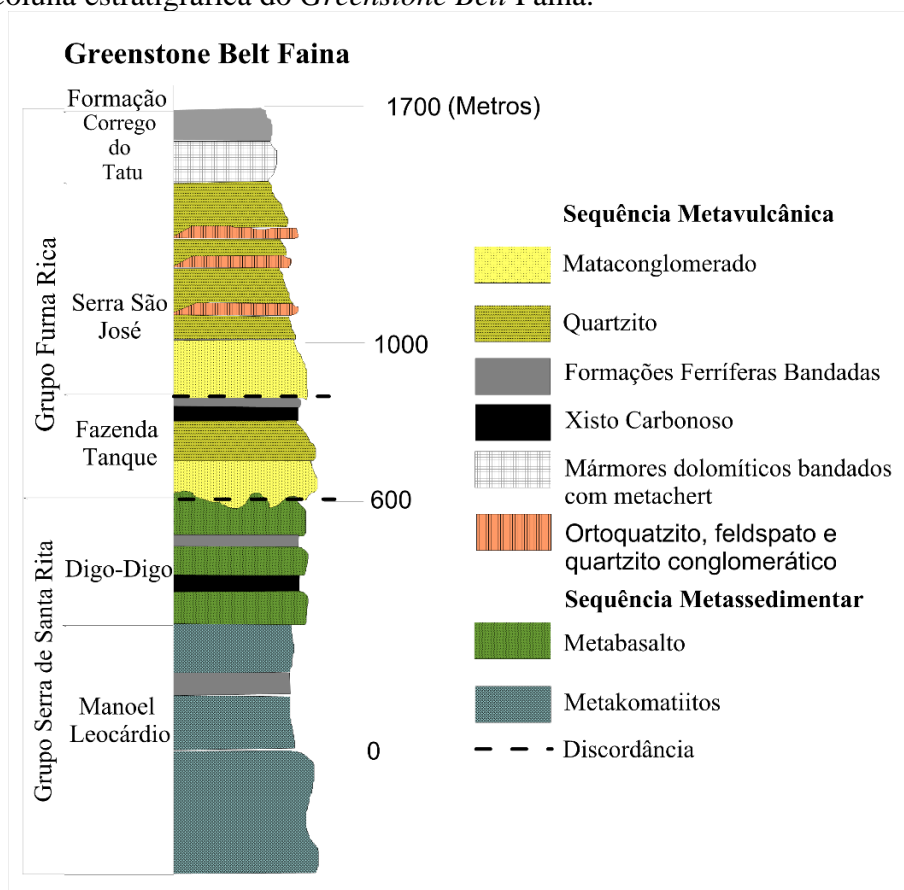
Fonte: adaptado de SIEG (2017).

No *greenstone belt* Faina, a estratigrafia inicia-se pelo Grupo Serra Santa Rita, subdividido em duas formações: i) Formação Manoel Leocárdio, localizada na base, composta por metakomatiitos com intercalações de formação ferrífera bandada, chert e xisto carbonoso;

ii) Formação Digo-Digo, sobreposta a primeira, constituída por metabasaltos toleíticos com intercalações de formação ferrífera bandada, chert e xisto carbonoso (RESENDE et al, 1998).

O topo da sequência é caracterizado pelo Grupo Furna Rica, composto por rochas metassedimentares com contato tectônico com rochas metavulcânicas localizadas no topo do Grupo Serra de Santa Rita. O grupo é formado por i) Formação Fazenda Tanque, composto por metaconglomerado, quartzito, metapelito, xisto carbonoso e formações ferríferas bandadas; ii) Formação Serra de São José, composta por ortoquartzitos, quartzitos carbonosos com lentes de mármores e localmente formação ferrífera bandada, metapelitos com raras e finas intercalações de ortoquartzito e feldspato e quartzito conglomerático. No topo do grupo situa-se a Formação Córrego do Tatu, representada por mármores dolomíticos bandados com metachert e formações ferríferas bandadas hematíticas (RESENDE et al., 1998) (Figura 7).

Figura 7- Coluna estratigráfica do *Greenstone Belt Faina*.



Fonte: adaptado de RESENDE et al. (1998).

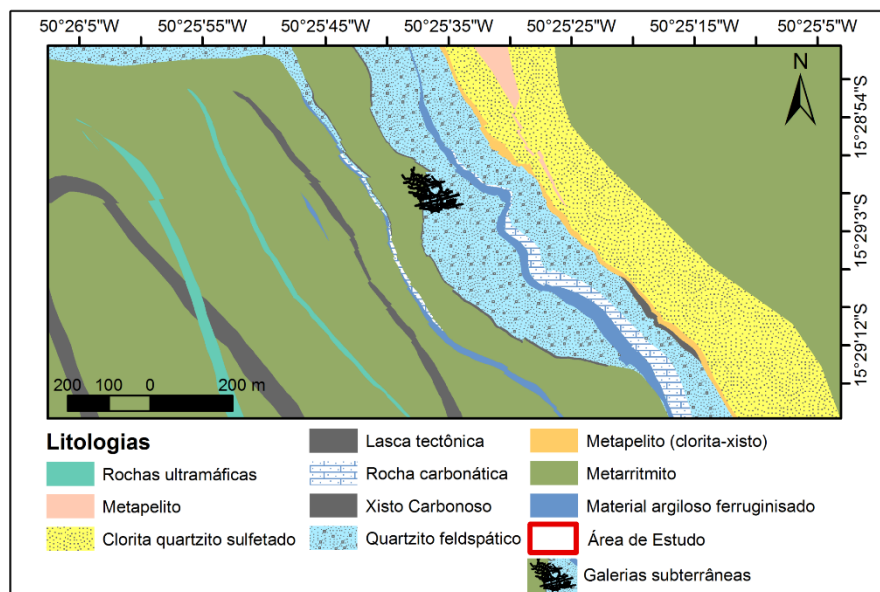
4.4 Geologia local

Na porção oeste da área (Figura 8) são encontradas: i) lentes de rochas ultramáficas (talco-clorita-actinolita xisto); ii) Metarritmitos, xisto com venulações milimétricas de carbonato, apresenta foliações, ocorre algumas fraturas e veios de quartzo; ii) xisto carbonoso, lente encaixada no metarritmito com aproximadamente 10 metros de espessura; iii) lasca tectônica, também encaixada no metarritmito, de aproximadamente 15 metros de espessura composto por quartzito feldspático, rocha carbonática, ocorre alteração polimetálica de cobre (Cu) e prata (Ag) e observa-se a presença de veios de quartzo (ORINOCO GOLD, 2017).

Na região central da Figura 8 encontra-se o quartzito feldspático e um material argiloso ferruginizado com alto teor em cobre (Cu), prata (Ag) e tungstênio (W). Em até 200 metros de profundidade observa-se lama e rocha carbonática impura com fraturamento moderado. O quartzito feldspático localizado a leste tem espessura que varia de 20 a 30 metros. Na porção NE (Figura 8) observa-se uma fina camada de metapelito com aproximadamente 7 metros de espessura (ORINOCO GOLD, 2017).

As galerias subterrâneas da mina estão localizadas entre o metarritmito e o quartzito feldspático. No entorno das galerias encontra-se quartzito feldspático com espessura variando de 80 a 120 metros. Associado ao quartzito observa-se sericita, roscoerita e biotita com concentração maior nos grãos de feldspato de provável alteração hidrotermal. Há predomínio de foliações e lineações fortemente penetrativas (ORINOCO GOLD, 2017).

Figura 8 – Mapa das litologias da área de estudo e localização das galerias subterrâneas da mina Cascavel.



Fonte: adaptado de ORINOCO GOLD (2017).

4.5 Contexto Hidrogeológico

No Brasil existem dez províncias hidrogeológicas, que abrangem diferentes tipos litológicos (MENT, 2000). O Estado de Goiás apresenta o maior número de províncias, com diversidade e heterogeneidades. Encontra-se áreas com elevado potencial hidrogeológico, como a região sudoeste, que possui em seu subsolo rochas porosas e fraturadas com alto potencial hídrico. As regiões nordeste e noroeste apresentam os menores índices de disponibilidade subterrânea (ALMEIDA et al., 2006).

De acordo com Almeida et. al (2006) os sistemas aquíferos de Goiás foram classificados a partir de informações da integração de dados geológicos, climáticos, geomorfológicos e pedológicos. O local de estudo está sobre o Sistema Aquífero *Greenstone Belts* (SAGB), classificado como grupo profundo e domínio fraturado. Engloba todas as rochas supracrustais dos terrenos arqueanos, associadas aos *Greenstone Belts* de Faina, Goiás, Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás. Os dados existentes indicam tratar-se de um sistema com potencial restrito, por ser desenvolvido sobre rochas pelíticas. As vazões médias são de 4,3 m³/h, com máxima de 12 m³/h.

Os aquíferos do SAGB dependem da litologia; i) Aquíferos desenvolvidos em metachert apresentam produtividade muito acima da média do sistema, devido ao comportamento rúptil destas rochas; ii) Em rochas metacalcissilicáticas, ocorre o incremento na produtividade dos poços, mas podem ter problemas na qualidade da água (ALMEIDA et al., 2006).

5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos dos conceitos da física eletromagnética e do processamento dos dados no método de eletrorresistividade.

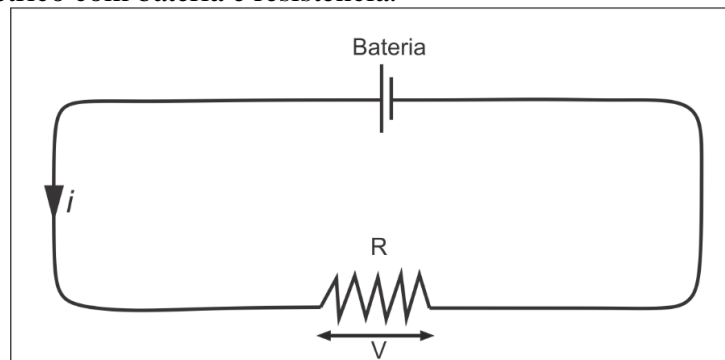
5.1 Conceitos da física eletromagnética

Considerando as análises realizadas a partir dos dados medidos em campo, neste capítulo efetuou-se um estudo de validação dos conceitos básicos da física eletromagnética, a física aplicada no método geofísico de eletrorresistividade, fez-se também uma revisão bibliográfica sobre os arranjos geométricos desenvolvidos no presente estudo, o comportamento das propriedades elétricas nos materiais (rochas e fluídos) e a resposta de resistividade elétrica dos materiais.

Para o entendimento do método geofísico de eletrorresistividade é indispensável a compreensão de alguns conceitos básicos da física eletromagnética. Foram inclusos estudos de Young e Freedman (2009), em sua 12^o edição, onde faz a releitura da obra de Sears e Zamansky, publicado em 1949.

Considera-se um circuito elétrico básico que contém uma bateria conectados a fios e uma resistência (Figura 9). A bateria mantém uma diferença de potencial em dois pontos: seu terminal positivo e seu terminal negativo, ela funciona como uma fonte de energia na movimentação de cargas através do circuito, bem como uma bomba movendo água dentro de tubos. Para que esse fluxo ocorra é preciso que a bateria mova cargas positivas de um baixo potencial no terminal negativo para um alto potencial no terminal positivo, para acontecer a mudança de potencial é necessário que uma força seja aplicada, esse agente que faz a corrente fluir denomina-se força eletromotriz (BURGER et al., 1992).

Figura 9 - Circuito elétrico com bateria e resistência.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

De acordo com Young e Freedman (2009) a corrente elétrica é a quantidade de carga que flui através de uma área especificada por unidade de tempo, ou seja, as cargas móveis do fio condutor:

$$I = \frac{q}{t} \quad (1)$$

Onde, I é a corrente em Amperes, q é a carga em Coulombs e t é o tempo em segundos.

A densidade de corrente (j) é definida como a corrente (i) que flui por unidade de área da seção reta (A):

$$J = \frac{I}{A} \quad (2)$$

A densidade de corrente em um condutor depende do campo elétrico e das propriedades do material. Para certos materiais, como os metais em uma dada temperatura, a densidade de

corrente é diretamente proporcional ao campo elétrico, e a razão entre os módulos destes permanece constante, essa relação foi descoberta em 1826 pelo físico Georg Simon Ohm (1787-1854), denomina-se Lei de Ohm (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

A resistividade (ρ) de um material é definida como a razão entre o módulo do campo elétrico (E) e o módulo da densidade de corrente (J):

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (3)$$

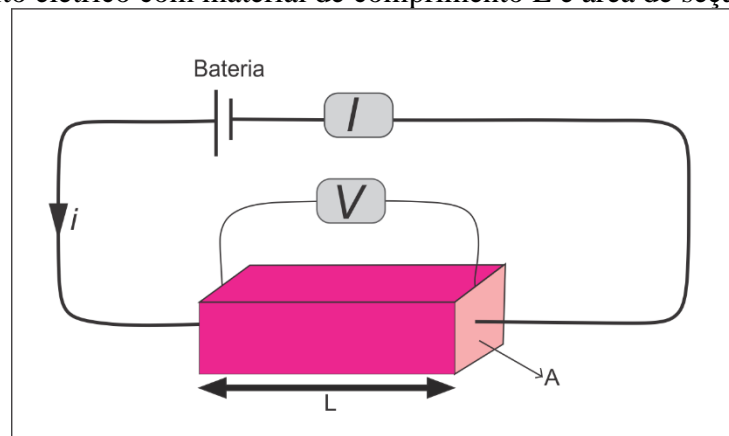
Quanto maior for o valor de resistividade, maior será o campo elétrico necessário para produzir uma dada densidade de corrente, ou menor será a densidade de corrente gerada por um campo elétrico. Um bom condutor possui resistividade pequena; um bom isolante apresenta resistividade grande. A Lei de Ohm é válida para muitos materiais, afirma que ρ é uma constante e não depende do valor do campo elétrico (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Para materiais que obedecem a Lei de Ohm, a diferença de potencial V através de uma amostra particular do material é proporcional à corrente I que passa pelo material. A resistência é dada pela Equação 4:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

A resistência não depende apenas do material, mas também de suas dimensões (Figura 10).

Figura 10 - Circuito elétrico com material de comprimento L e área de seção de reta A .



Fonte: elaborado pela autora (2017).

A resistência de um condutor cilíndrico está relacionada a resistividade ρ , comprimento L e área de seção reta A :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5)$$

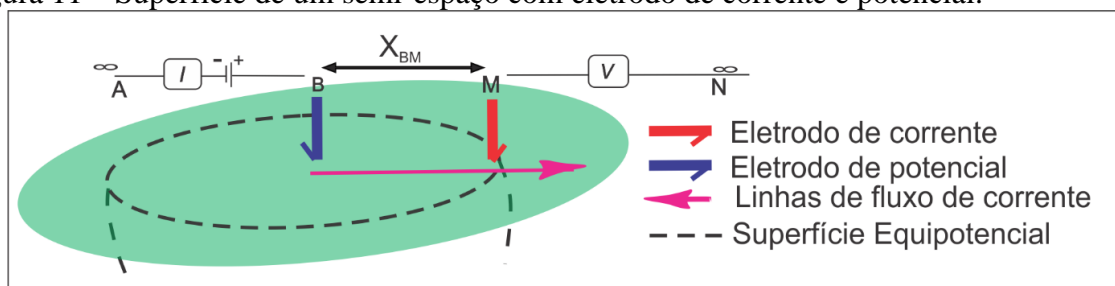
A Equação 5 mostra que a resistência de um fio ou de outro condutor com seção reta uniforme é diretamente proporcional ao comprimento do fio e inversamente proporcional à área de sua seção reta e é proporcional à resistividade do material com o qual o condutor é feito (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

5.1.2 A física aplicada no método geofísico de eletroresistividade

O método de eletroresistividade é utilizado no estudo de discontinuidades horizontais e verticais através dos contrastes de resistividade elétrica. As propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície são determinadas com o uso de uma fonte de corrente e um amperímetro que mede a intensidade da corrente introduzida no solo através dos eletrodos de corrente para que se estabeleça um campo elétrico. O campo elétrico gerado é analisado por meio de um par de eletrodos de potencial conectados à um instrumento capaz de medir a diferença de potencial (TELFORD et al., 1976). O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (ORELLANA, 1972).

Considera-se a situação teórica de um eletrodo de corrente (B) isolado na superfície de um semi-espaço elétrico que projeta um campo hemisférico em subsuperfície (Figura 11).

Figura 11 – Superfície de um semi-espaço com eletrodo de corrente e potencial.



Fonte: adaptado de DENTITH e MUDGE (2014).

O potencial (V) é medido em um ponto localizado a partir do eletrodo de corrente (M) e conectado ao eletrodo N localizado no infinito. A distância X_{BM} é equivalente ao comprimento e considera-se a área do hemisfério ($2\pi X^2$) (Figura 11). A resistividade é descrita por:

$$\rho = \frac{V}{I} K_{geom} \quad (6)$$

Reescrevendo a Equação 6, considerando que o fator geométrico K_{geom} é dado pela razão entre a área de seção de reta (A) e comprimento (L):

$$K_{geom} = \frac{A}{L} \quad (7)$$

Tem-se:

$$\rho = \frac{V}{I} \left(\frac{2\pi X^2}{X} \right) = \frac{V}{I} (2\pi X) \quad (8)$$

Então, para um eletrodo em uma superfície de meio espaço:

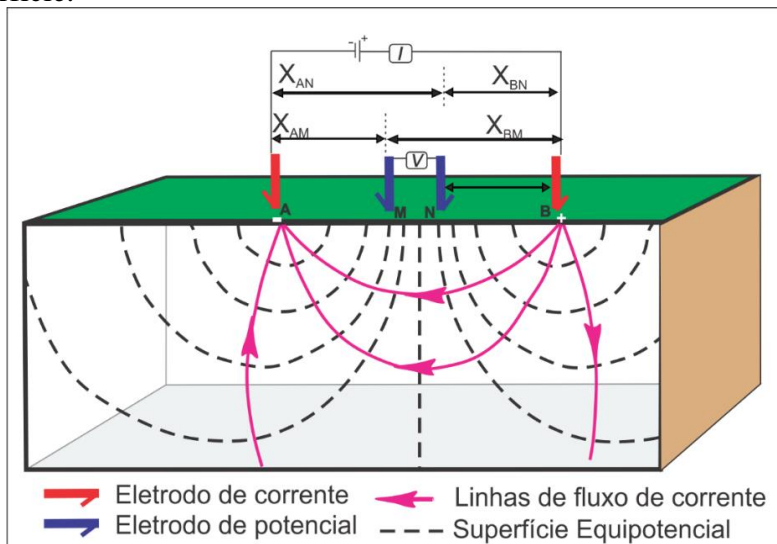
$$K_{geom} = 2\pi X \quad (9)$$

Reescrevendo a equação 8 tem-se o potencial a uma distância X do eletrodo:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi X} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X} \right) \quad (10)$$

Agora, considera-se um meio espaço com dois eletrodos de corrente e dois eletrodos de potencial localizados em qualquer lugar da superfície para a determinação do potencial elétrico. Para descrever os arranjos de eletrodos utiliza-se as letras 'A' e 'B' para eletrodos de corrente e 'M' e 'N' para eletrodos de potencial (Figura 12).

Figura 12 - Determinação do potencial com eletrodos de corrente e de potencial e o campo gerado em subsuperfície.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Os parâmetros de resistividade podem ser definidos em termos da distância entre eletrodos. Utiliza-se a equação 10 para determinar o potencial nos eletrodos. O potencial em qualquer ponto é a soma dos potenciais devido aos dois eletrodos de corrente, que tem polaridades opostas (sinais opostos).

- Potencial no eletrodo M:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} \right) \quad (11)$$

- Potencial no eletrodo N

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{AN}} - \frac{1}{X_{BN}} \right) \quad (12)$$

A diferença de potencial resultante ΔV_{MN} entre os eletrodos M e N:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad (13)$$

Onde:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right) \quad (14)$$

A resistividade aparente para meios heterogêneos é dada por:

$$\rho = k_{geom} \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

O fator geométrico k_{geom} é dado por:

$$k_{geom} = 2\pi \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right)^{-1} \quad (16)$$

Fatores geométricos de arranjos de eletrodos são descritos na Tabela 1 a partir da equação 16 reduzida.

Tabela 1 – Equações reduzidas de fatores geométricos de arranjos de eletrodos.

Arranjos	Fator geométrico (k_{geom})
Polo-Dipolo	$2\pi n(n+1)(n+2)X_{MN}$
Dipolo-Dipolo	$\pi n(n+1)(n+2)X_{MN}$
Wenner	$2\pi X_{MN}$
Schlumberger	$\pi \frac{(X_{AB}/2)^2}{X_{MN}}, X_{MN} \leq X_{AB}/20$

Fonte: extraído de DENTITH e MUDGE (2014).

5.1.3 Arranjos de eletrodos

A escolha do arranjo depende de fatores como o tipo de alvo que será mapeado, a razão sinal/ruído, profundidade de investigação, dentre outros. As aquisições geralmente são realizadas ao longo de uma linha, definindo-se uma abertura entre eletrodos. A profundidade

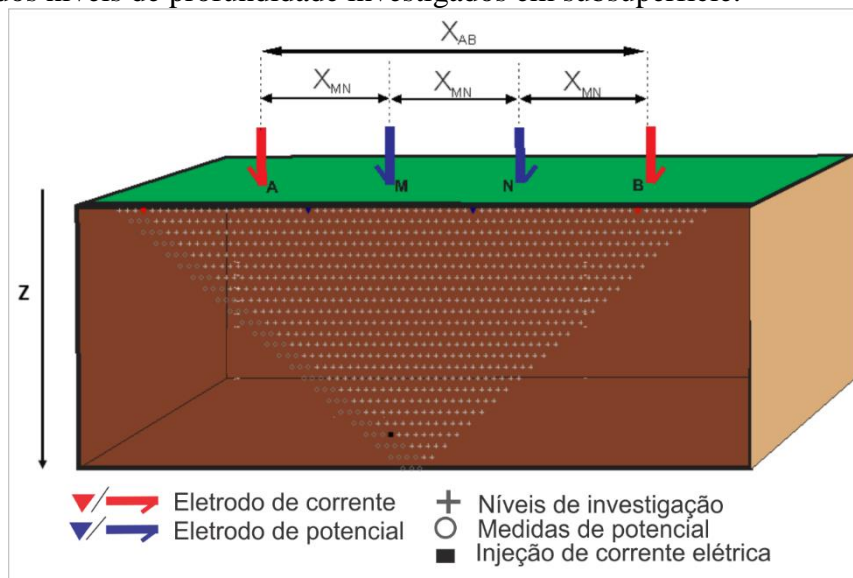
de investigação está diretamente relacionada ao fator de separação entre eletrodos de corrente e potencial, quanto maior for a abertura, maiores serão as profundidades alcançadas (ORELLANA, 1972; BURGER et al., 1992, GANDOLFO, 2007).

As geometrias de arranjos de eletrodos utilizados no presente trabalho foram wenner, wenner schlumberger, dipolo dipolo e polo dipolo. A seguir serão descritos a disposição dos arranjos em campo.

5.1.3.1 Arranjo wenner

Utiliza-se quatro eletrodos dispostos em linha e igualmente espaçados. A profundidade de investigação aumenta com o incremento da abertura dos eletrodos (X_{MN}) (Figura 13).

Figura 13 - Disposição dos eletrodos do arranjo wenner em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

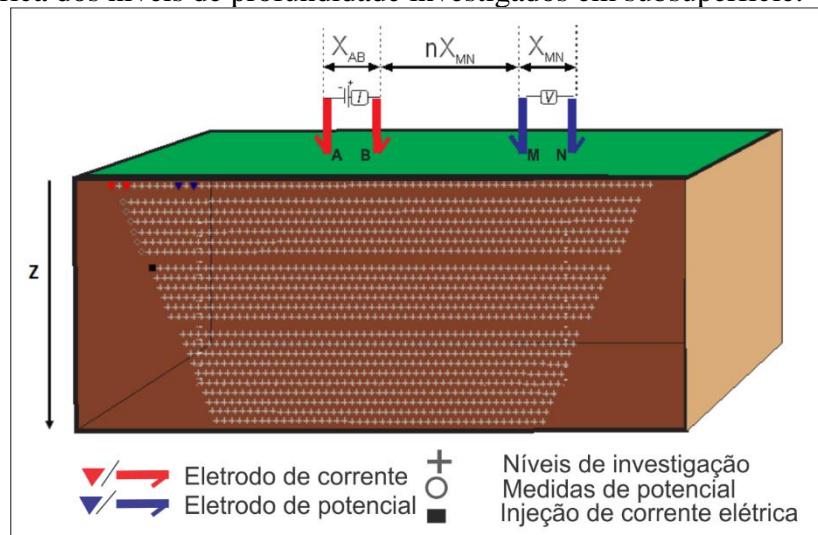
Apresenta bons resultados no mapeamento de estruturas horizontais, devido a sensibilidade a variações verticais de resistividade em subsuperfície, desta forma, uma boa resolução vertical. Não é muito eficaz para variações horizontais, apresentando baixo desempenho na definição de estruturas estreitas e verticais (GANDOLFO, 2007).

5.1.3.2 Arranjo dipolo-dipolo

Considera-se o mesmo espaçamento entre eletrodos de corrente e de potencial. O centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, se deslocam ao longo da linha levantada, cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação (ROBINSON; ÇORUH, 1988).

O valor medido de resistividade elétrica aparente é representado em um ponto da subsuperfície localizado na intersecção das retas que partem a 45° do centro dos dipolos, posicionado, portanto, no meio deles (Figura 14).

Figura 14 - Disposição dos eletrodos do arranjo dipolo dipolo em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.



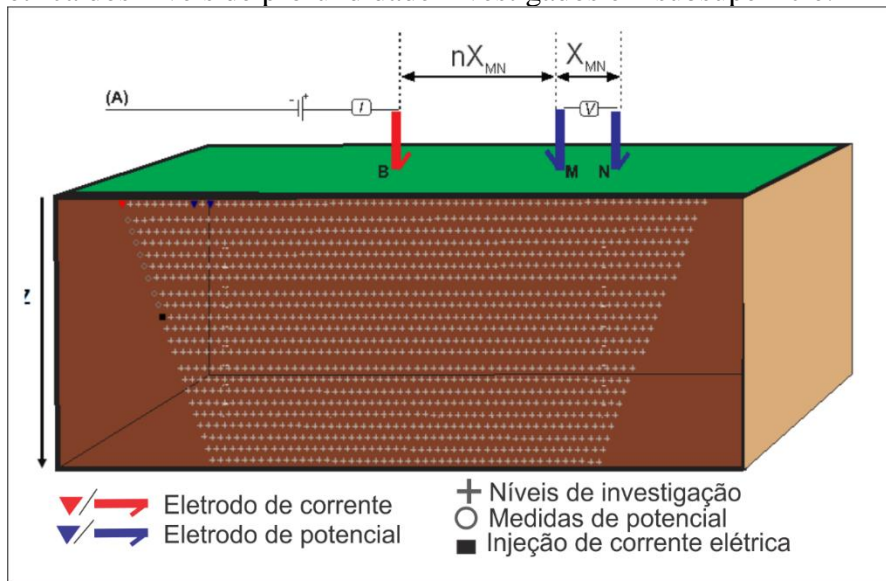
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Apresenta boa resolução lateral (WARD, 1990), oferece a melhor resolução como um todo, se comparado com outros arranjos, porém são fortemente influenciados por irregularidades da cobertura superficial (COGGON, 1973). Outra desvantagem é a baixa razão sinal/ruído, principalmente quando a separação entre os pares de dipolos é grande (GANDOLFO, 2007).

5.1.3.3 Arranjo polo-dipolo

Consiste em três eletrodos móveis ao longo do perfil de caminhada, sendo um de corrente (B) e dois de potencial (MN) cujo espaçamento (X_{MN}) permanece constante. A sequência de medidas é efetuada mantendo-se fixo o eletrodo de corrente (B) do perfil, aumentando-se a distância deste ao dipolo receptor (Figura 15).

Figura 15 - Disposição dos eletrodos do arranjo polo-dipolo em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

O arranjo polo-dipolo requer um eletrodo remoto que deve ser colocado a uma distância suficientemente longe da linha do levantamento (LOKE, 2000). Então, outro eletrodo (A) é mantido fixo a uma distância, denominada de “infinito” que corresponde a pelo menos dez vezes a maior abertura entre os eletrodos extremos do arranjo que permanecem na linha do levantamento (KELLER e FRISCHKNECHT, 1966; TELFORD et al., 1990), de forma a garantir que este tenha pouca influência sobre o resto do arranjo.

O arranjo apresenta uma cobertura horizontal satisfatória, tem uma intensidade de sinal significativamente maior em comparação com a matriz do dipolo dipolo e não é tão sensível ao ruído como a matriz polo polo. A intensidade do sinal é menor em comparação com os arranjos wenner e wenner schlumberger, mas maior do que o dipolo dipolo (LOKE, 2000).

O efeito do eletrodo remoto é aproximadamente proporcional ao quadrado da relação entre a distância entre os eletrodos AM e BM. Assim, a distância é menos afetada pelo eletrodo remoto em comparação com a matriz do polo polo. Se a distância do eletrodo remoto (A) for superior a 5 vezes a maior distância entre os eletrodos BM, o erro causado por negligenciar o efeito do eletrodo remoto é inferior a 5% (o erro exato também depende da localização do eletrodo N para a medida particular e a distribuição da resistividade em subsuperfície) (LOKE, 2000).

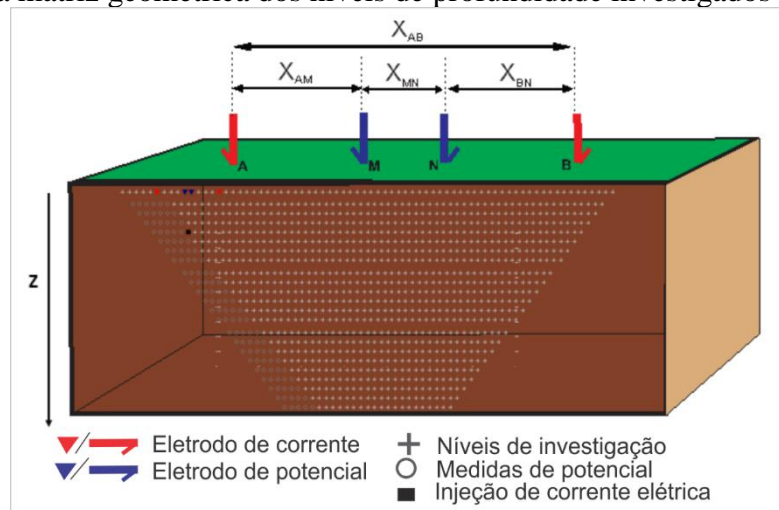
A força do sinal para o arranjo polo dipolo diminui com o quadrado do fator "n". Embora este efeito não seja tão severo como a matriz dipolo-dipolo, geralmente não é aconselhável usar

valores "n" maiores que 8 a 10. Além disso, o espaçamento " X_{MN} " entre o par dipolo MN deve ser aumentado para obter uma força de sinal mais forte (LOKE, 2000).

5.1.3.4 Arranjo Wenner-Schlumberger

Esse arranjo está entre os arranjos wenner e schlumberger (PAZDIREK; BLAHA, 1996). Utiliza-se quatro eletrodos em linha, sendo que a distância X_{MN} é mantida fixa e o incremento de distância ocorre com X_{AM} e X_{BN} (Figura 16).

Figura 16 - Disposição dos eletrodos do arranjo wenner schlumberger em superfície e representação da matriz geométrica dos níveis de profundidade investigados em subsuperfície.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

A matriz geométrica é moderadamente sensível às estruturas horizontais e verticais, em áreas onde ambos os tipos de estruturas são esperados sugere-se o uso desta matriz ao invés de wenner ou dipolo dipolo. A profundidade teórica de investigação é cerca de 10 % maior do que a matriz wenner considerando a mesma distância de eletrodos. A intensidade do sinal apresenta-se menor do que a da matriz wenner e maior do que a do dipolo dipolo. A cobertura de dados horizontais é ligeiramente maior do que a matriz wenner, mas é mais estreita do que a obtida com a dipolo dipolo (LOKE, 2000).

5.1.4 Propriedades elétricas dos materiais - rochas e fluídos

A condutividade elétrica e sua inversa, a resistividade elétrica são as propriedades elétricas de maior amplitude de variação, sendo frequentemente empregada na exploração

geofísica, definem o comportamento elétrico das rochas sob a ação de campos eletromagnéticos contínuos ou alternados (LIMA, 2014).

Os transportadores de cargas elétricas, na maioria das vezes, são elétrons ou íons, o fenômeno de condução é classificado como eletrônico ou iônico. A eletrônica deve-se ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e o grau de impurezas. Já a condutividade iônica deve-se ao deslocamento dos íons existentes nas águas contidas nos poros e uma massa de solo, sedimentos inconsolidados ou fissuras das rochas (ORELLANA, 1972).

O fluxo de cargas ocorre por deslocamentos dos transportadores, sob a ação do campo elétrico, mas em situações geológicas, ocorrem também acoplados processos de difusão dos transportadores. Para os minerais que são os principais constituintes das rochas tem-se a classificação de condutores, semicondutores e dielétricos, em função do mecanismo de transporte de cargas. Para a compreensão destes mecanismos considera-se um modelo quântico simplificado para a estrutura elétrica de um átomo (PARKOMENKO, 1967; LIMA, 2014).

Considerando um átomo isolado, os elétrons se distribuem em torno do núcleo ocupando orbitais definidos por níveis e subníveis discretos de energia. Para a estrutura molecular de um cristal metálico ou de um cristal semi-condutor com vários átomos interligados, os níveis orbitais são aproximados gerando, na parte mais externa desses átomos, duas bandas de níveis permissíveis. Uma chamada de banda de valência, são as orbitais envolvidas na ligação interatômica ou intermolecular do material, quase sempre completamente cheia de elétrons e a outra denominada banda de condução, inclui os orbitais que não participam da ligação e que, em muitos materiais, estão vazias ou parcialmente preenchidas por elétrons (PARKOMENKO, 1967; LIMA, 2014).

Nos metais as bandas de valência e de condução são sobrepostas ou ficam muito próximas entre si. A energia associada a um campo elétrico externo pode ser suficiente para liberar elétrons da banda de condução e provocar seu fluxo contínuo através do meio. Os sólidos com bandas de condução vazias e bem separadas das bandas de valência são classificados como semicondutores e isolantes (PARKOMENKO, 1967; LIMA, 2014).

Nos fluidos a condução de eletricidade é de natureza eletrolítica na maioria das vezes, envolve a movimentação orientada de íons sob a ação de campos elétricos externos. Para um eletrólito aquoso diluído a condutividade elétrica σ_e é expressa por:

$$\sigma_e = \sum_{i=1}^n e z_i c_i \mu_{ei} \quad (17)$$

Onde, n é o número de componentes em solução, e o módulo da carga eletrônica, z_i a valência (em módulo e sinal), c_i concentração volumétrica e μ_{ei} mobilidade de cada espécie iônica.

De acordo com a equação 14, a água quando isenta de sais em solução conduz corrente elétrica devido a dissociação de H^+ e OH^- , só torna-se mais condutora, quando ocorrer a presença de sais dissolvidos em sua composição (RIEGER, 1987).

A corrente elétrica que flui em uma solução eletrolítica energizada por um campo elétrico externo é transportada, em parte pelos cátions, que são dirigidos para o eletrodo positivo e em parte pelos ânions, que são movidos para o eletrodo negativo. A fração de corrente que é transportada por cada espécie dissolvida é denominada de número de transferência de Hittorf t_j :

$$t_j = \frac{z_j c_j \mu_{ej}}{\sum_i z_i c_i \mu_{ei}} \quad (18)$$

Onde, c_j é a concentração de íon da espécie j no eletrólito. Sabendo que a corrente total é a soma das frações parciais, temos que $\sum_i t_i = 1$.

Em termos de condutividade específica, a mobilidade de cada espécie iônica em solução é dada pela Equação 16:

$$\mu_{ei} = \frac{\sigma'_{ei}}{|z_i|} \quad (19)$$

Onde, σ'_{ei} é uma condutividade específica ($\sigma'_{ei} = \sigma_e/c$, sendo c , a concentração do eletrólito na solução).

A equação 16 é obtida a partir da Lei de Ohm aplicada a um elemento de volume na solução. A condutividade específica e a mobilidade elétrica são grandezas que expressam a facilidade de transporte de cargas através de eletrólitos, sob a ação de campos elétricos (RIEGER, 1987; LIMA, 2014).

5.1.5 Resistividade elétrica dos materiais

As rochas podem ser tratadas como agregados heterogêneos de partículas sólidas, condutoras e/ou dielétricas compostos por espaços vazios preenchidos em proporções variáveis de eletrólitos aquosos. As propriedades elétricas dependem da textura e da composição mineral da matriz sólida, da geometria do espaço de poros e da proporção volumétrica de água nesses vazios (MENDELSON e COEHN, 1982; SEN et al., 1988; LIMA e SHARMA, 1990).

A água encontrada na natureza apresenta alta condutividade, pois sempre há sais dissolvidos como o NaCl. A quantidade de sais dissolvidos depende da natureza das rochas e o contato pela superfície do terreno ou subterrâneo (ORELLANA, 1972). Na tabela 2 estão algumas variações nos valores de resistividade da água.

Tabela 2 - Valores de Resistividade elétrica da água em diversos ambientes geológicos.

Água/ambientes geológicos	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Água de lagos e arroios de alta montanha	$10^3 - 3 \times 10^3$
Água em subsuperfície (rochas ígneas)	$0.1 - 3 \times 10^3$
Água em subsuperfície (sedimentares)	10 – 100
Água natural (rochas ígneas)	0.5 – 150
Água natural (sedimentares)	1 – 100
Aguas marinhas	~0,2

Fonte: extraído de ORELLANA (1972) e TELFORD et al. (1990).

A resistividade das rochas depende da quantidade de poros, seja em grande ou pequena proporção, que podem estar estão preenchidos por eletrólitos. As rochas se comportam como condutores iônicos de resistividade muito variável.

A resistividade da rocha e a água presente nos poros, pode ser expressa com o uso da resistividade e do volume de água presente nos poros de acordo com uma equação empírica proposta por Archie (1942).

$$poros = a \phi^{-b} f^{-c} \rho \quad (20)$$

Onde $poros$ é a porosidade, f é a fração de poros contendo água de resistividade ρ e a, b e c são constantes empíricas. ρ varia consideravelmente de acordo com as quantidades e condutividades dos materiais dissolvidos (KEAREY et al., 2009).

A resistividade elétrica é medida por meio de aquisições geoeletricas realizadas na superfície do terreno, como em sondagens elétricas verticais. Também pode ser efetuada em laboratório, através de amostras de rochas extraídas de afloramentos e testemunhos de sondagem, este último sistema de medição proporciona resultados interessantes para o estudo dos fatores que podem influenciar na resistividade das rochas, tais como no grau de umidade,

pressão e temperatura, mas estão sujeitas a erros experimentais e podem ser afetadas pela presença de fissuras microscópicas. A causa desses erros pode estar relacionada com a diferença de porosidade das amostras, a distribuição dos grãos na amostra e a anisotropia (ORELLANA 1972).

Na Tabela 3 estão alguns tipos de rochas e seus valores de resistividade, a variabilidade nos valores registrados é devido a variações em impurezas, a imperfeições ou defeitos nos cristais dos minerais que constituem as rochas ou ainda, pela presença de microfissuras dos minerais, em geral cheio de fluidos (PARKOMENKO, 1967; LIMA, 2014).

Tabela 3 - Valores de resistividades para diferentes tipos de rochas.

Tipo de Rocha	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Granito	$4.5 \times 10^3 - 1.3 \times 10^6$
Feldspato	4×10^3
Andesito	$4.5 \times 10^4 - 1.7 \times 10^2$
Gabro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$
Peridotito	$3 \times 10^3 - 6,5 \times 10^3$
Gnaisse	$6.8 \times 10^4 - 3 \times 10^6$
Quartzitos	$10 - 2 \times 10^8$
Argilitos	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Argilas	$1 - 100$

Fonte: extraído de TELFORD et al. (1990).

5.2 Processamento de dados

Após a aquisição de dados em campo, os valores de resistividade elétrica são submetidos a procedimentos de inversão que transforma dados de resistividade elétrica aparente em resistividade elétrica real. Neste tópico serão abordados conceitos de inversão de dados em *software* próprio para processamento. As etapas principais consistem em definição do erro quadrático médio das seções de eletrorresistividade, sensibilidade dos arranjos geométricos e especificações do uso do filtro não linear no processamento de dados geofísicos.

5.2.1 Inversão e software de processamento

A inversão é um procedimento eficiente para transformar as respostas dos dados amostrados em parâmetros que permitam modelar as estruturas em subsuperfície. Quando corretamente aplicado é capaz de gerar modelos com informações consistentes a partir dos dados conhecidos (ROCHA, 2013). De acordo com Bortolozzo (2011), inversão de dados geofísicos consiste em obter um conjunto de parâmetros que propicia o ajuste aos dados medidos e ao mesmo tempo satisfaz os vínculos geológicos.

No presente estudo o *software* empregado é o Res2Dinv que utiliza uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade que foi desenvolvida por Loke e Barker (1996a) e deGroot-Hedlin & Constable (1990) que baseia-se no método dos mínimos quadrados e “suavização restringida” (*Smoothness-constrained*). Determina-se um modelo 2D para o subsolo a partir dos dados de resistividade por um levantamento de imagem elétrica. De acordo com Loke (2015) o método utiliza a seguinte equação:

$$[JZ_i^T JZ_i + \lambda_i W^T W] \Delta_{qi} = JZ_i^T g_i - W^T W q_{i-1} \quad (21)$$

Onde, W , é o filtro de rugosidade; λ , fator de amortecimento do filtro de rugosidade; q_{i-1} modelo de inversão de corrente; Δ_{qi} , alteração na resistividade do modelo a ser calculado; g desajustes de dados, ou seja, a diferença entre valores de resistividade aparente medidos e calculados; JZ = Matriz Jacobiana de derivadas parciais ou sensibilidade. Normalmente, o vetor de parâmetro do modelo q contém o (logaritmo) dos valores de resistividade do modelo.

A inversão dos dados consiste na representação da distribuição em imagem da resistividade sob a superfície a partir dos dados de resistividade aparente. O objetivo da inversão é reduzir a diferença entre os dados da resistividade aparente medida e a resistividade aparente calculada. A diferença entre os dados é quantificada pelo erro quadrático médio (RMS – *root mean square*) em porcentagem (Equação 24).

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{a_i^{Pred} - a_i^{Meas}}{a_i^{Meas}}\right)^2}{N}} \times 100\% \quad (24)$$

Onde N é o número total de medições, d_i^{Pred} corresponde aos dados previstos e d_i^{Meas} aos dados medidos. O erro RMS é dependente do número de valores anômalos e da magnitude dos mesmos. Um único valor anômalo pode aumentar o valor do erro RMS, mesmo que o restante das medições seja de boa qualidade (LOPES, 2013). O modelo obtido com o menor erro nem sempre será o melhor, o recomendado é escolher o modelo em que a variação do erro entre uma e outra interação seja pequena e que geralmente acontece entre a terceira e a quinta interação (LOKE e BARKER, 1996a).

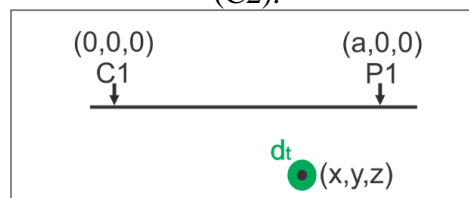
Os programas de inversão utilizam métodos iterativos, onde procura-se melhorar o padrão até que a diferença entre os valores de resistividade aparente calculada e os valores de resistividade aparente medida seja mínima. O modelo 2D alcançado pelo programa divide a subsuperfície em blocos retangulares, com a finalidade de definir a resistividade exata dos blocos retangulares que originaria uma pseudoseção de resistividades aparentes análogas a seção de resistividade aparente medida em campo.

5.2.2 Sensitividade dos arranjos

Consiste em uma função que expressa quanto a variação da resistividade elétrica do meio influenciará o potencial medido pelo arranjo geométrico. Quanto maior for o valor de sensibilidade, maior será a influência da região em superfície na medida (LOKE, 2015).

Considera-se a corrente elétrica de 1 Ampere injetada no solo através do eletrodo de corrente (C1), que resulta em um potencial ϕ observado no eletrodo potencial (P1) (Figura 17).

Figura 17 – Ilustração de uma superfície com eletrodo de corrente (C1), eletrodo de potencial (C2).



Fonte: adaptado de LOKE (2015).

De acordo com Loke (2015), se a resistividade elétrica dentro de um pequeno volume (δ_τ) em uma superfície qualquer localizada em um determinado espaço (x, y, z) for alterada por uma pequena quantidade (δ_ρ), a mudança no potencial (δ_ϕ), medida em P1 devido a uma fonte de corrente em C1 é dado pela equação abaixo:

$$\delta_{\phi} = \frac{\delta_{\rho}}{\rho^2} \int_V \nabla_{\phi} \cdot \nabla_{\phi}' d\tau \quad (25)$$

A sensibilidade é dada por $\delta_{\phi} / \delta_{\rho}$:

$$\frac{\delta_{\phi}}{\delta_{\rho}} F_{3D}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} \quad (26)$$

5.2.3 O uso do filtro não linear no processamento de dados geofísicos

Os filtros são aplicados a banco de dados geofísicos com a finalidade de remover erros, picos de amplitude e tendências regionais ou melhorar visivelmente características geológicas. Os sinais geralmente são corrompidos durante a transmissão ou processamento, a aplicação do filtro tem como objetivo restaurar o sinal original, esse processo denomina-se “remoção de ruídos”. (GEOSOFT, 2014).

O uso de filtros não lineares foi proposto por Naudy e Dreyer (1968) para remover ruídos de perfis magnéticos. Desde então, filtros não lineares são utilizados para o processo de remoção de ruído em diversos tipos de bancos de dados provenientes da aquisição de perfis geofísicos. O parâmetro principal que guia a filtragem é a largura máxima das anomalias a serem removidas. Filtros não lineares podem ser utilizados para remover comprimentos de onda muito curtos e altas amplitudes dos dados, a filtragem dos dados preserva características geológicas relevantes (KEATING; PINET, 2011).

Filtros não lineares apresentam vantagem em relação a filtros lineares como a remoção de ruído e suavização mais seletiva em relação aos pixels, bordas, linhas e pequenas estruturas nas imagens. O que difere dos filtros lineares é que os valores dos pixels utilizados nesses filtros são combinados com alguma função não linear (BURGUER et al. 2009).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração deste trabalho consiste em duas etapas principais: i) estudo de caso e ii) análise e suavização de ruídos das seções de resistividade elétrica.

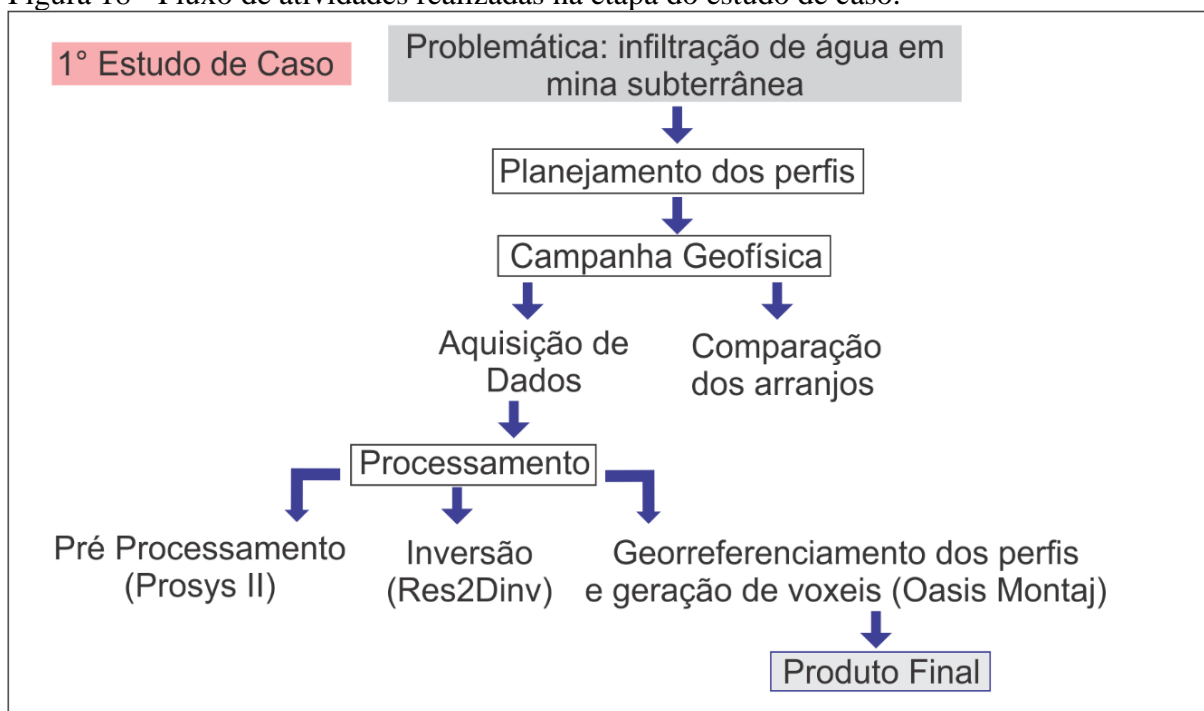
6.1 Estudo de caso

Utilizou-se o método da eletrorresistividade na resolução da problemática de infiltração de água na mina Cascavel. As etapas executadas serão descritas em itens:

- i) Planejamento dos perfis: Foram determinadas a localização, quantidade e extensão dos perfis na área de estudo; e a configuração das sequências dos arranjos geométricos com o uso do *software* Electre II, versão 05.06.00, fabricado por IRIS *Instruments*.
- ii) Campanha Geofísica: Consistiu nas atividades de campo para a aquisição dos dados geofísicos e comparação dos parâmetros de arranjos dos eletrodos a partir de uma linha teste.
- iii) Processamento, dividido basicamente em três itens:
 - a. Pré processamento → Utiliza-se o *software* Prosys II, versão 03.09.00 do fabricante IRIS *Instruments*;
 - b. inversão dos dados → Utiliza-se o *software* Res2Dinv, versão 3.4 do fabricante Geotomo Software;
 - c. Georreferenciamento de perfis para a geração de voxels → Utiliza-se o *software* Oasis Montaj, versão 6.4.2, fabricante Geosoft Inc.

Todas as etapas para realização do estudo são apresentadas em forma de fluxograma na Figura 18.

Figura 18 - Fluxo de atividades realizadas na etapa do estudo de caso.



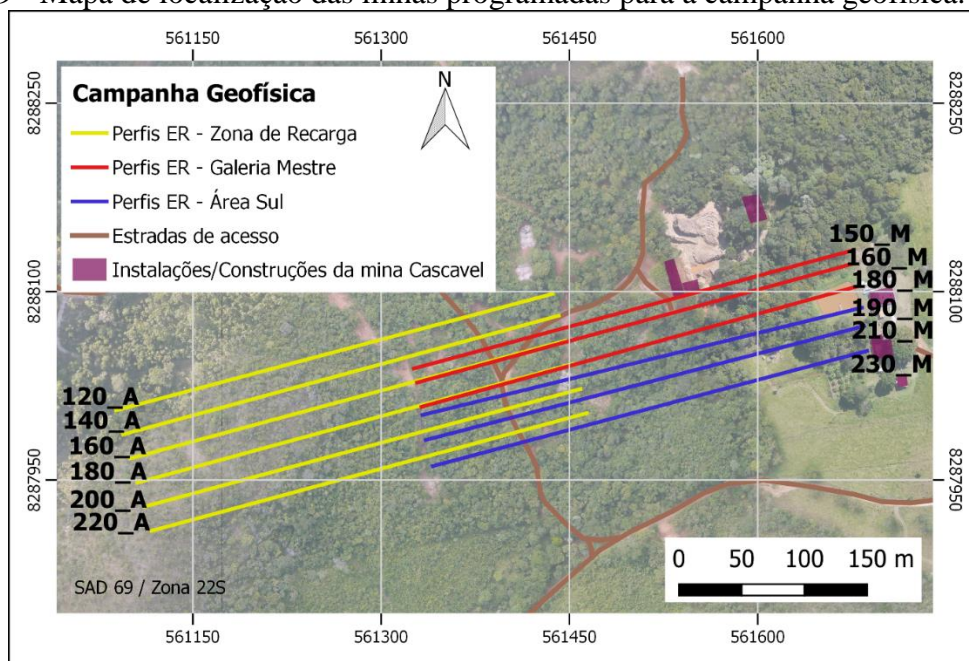
Fonte: elaborado pela autora (2017).

6.1.1 Planejamento dos perfis

A área de aquisição abrange aproximadamente 293,724 km². Localiza-se sobre a mina denominada Cascavel, onde se encontram córregos, áreas alagadas e cobertura vegetal densa nos arredores. Encontram-se instalações e benfeitorias como oficinas, escritórios e casa com geradores. Por meio da integração de mapas em um ambiente SIG (Sistemas de informações Georreferenciadas) foi possível descrever o relevo como acentuado e com variação altimétrica de até 150 metros.

No nível das galerias subterrâneas da Mina Cascavel predominam rochas quartzíticas feldspáticas, onde a estrutura que ocasiona a percolação de água para dentro da mina é uma falha preenchida por veio de quartzo fraturado. A partir da análise de direções preferenciais de falhas e fraturas determinou-se que os perfis devem seccionar as estruturas, com o objetivo de detalhar e caracterizar por meio de contrastes de resistividade elétrica dos materiais os contatos entre as litologias e estruturas. Foram realizados um total de 12 perfis de direção S218W com extensão de 360 metros, com 10 e 20 metros de espaçamento entre eles, visando uma cobertura densa de dados. Para melhor organização e planejamento fez-se uma divisão dos perfis de eletrorresistividade denominando-os: i) *Perfis ER – Zona de Recarga*; ii) *Perfis ER – Galeria Mestre*; iii) *Perfis ER – Área Sul*. Cada perfil possui um nome identificado com uma numeração seguido de uma letra (Figura 19).

Figura 19 - Mapa de localização das linhas programadas para a campanha geofísica.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Para o desenvolvimento dos perfis e leituras das medidas de resistividade utilizou-se um resistivímetro modelo Syscal Pro, fabricado pela Iris *Instruments*, quatro multicabos de 90 metros e 72 eletrodos. Todo o equipamento é de propriedade da Universidade Federal do Pampa – Unipampa, Campus Caçapava do Sul (Figura 20).

Figura 20 - Resistivímetro Syscal Pro, unidade de aquisição, bateria, multicabos de conexão e eletrodos.



6.1.2 Comparação de arranjos – Configuração de sequências

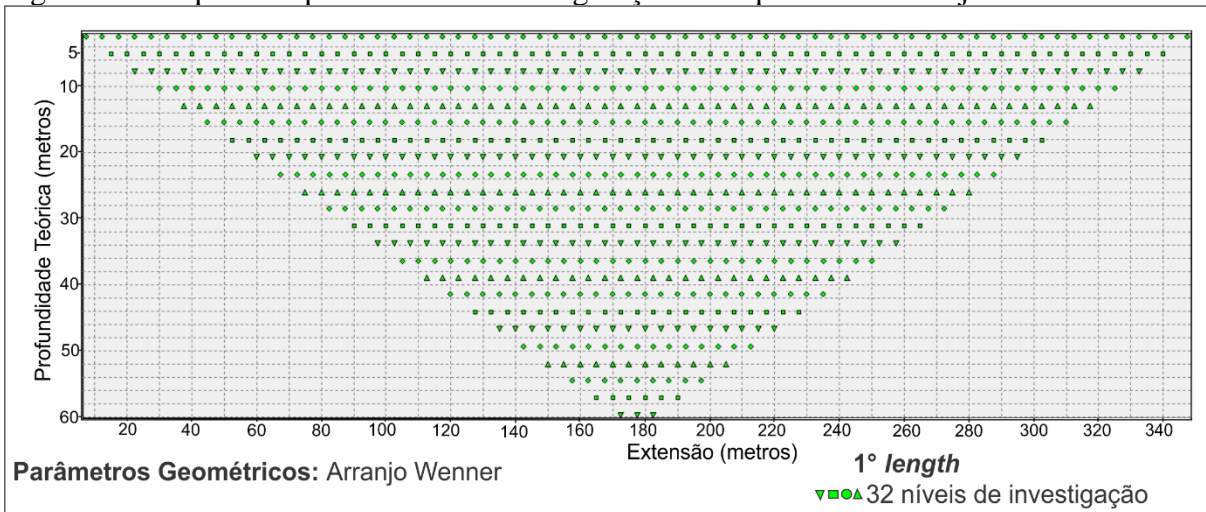
Foram desenvolvidos em uma linha teste diferentes arranjos geométricos. Configurou-se previamente as sequências das matrizes de distribuição de resistividade elétrica em subsuperfície no *software* Electre II para as geometrias dos arranjos Wenner, Wenner Schlumberger, dipolo-dipolo e polo-dipolo.

Para todas as sequências considerou-se o uso da técnica de caminhamento elétrico (CE), abertura de eletrodos de 5 metros e 360 metros de extensão total do perfil. Atingiu-se um máximo de 34 níveis de investigação e profundidades teóricas variando de 50 a 70 metros. Abaixo serão descritas as configurações dos parâmetros para cada arranjo geométrico de eletrodos:

i) Arranjo Wenner:

Configurou-se a sequência de uma camada de níveis com pontos de aquisição de resistividade elétrica distribuídos em 32 níveis de investigação, atingindo a profundidade teórica de 60 metros (Figura 21).

Figura 21 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo Wenner.

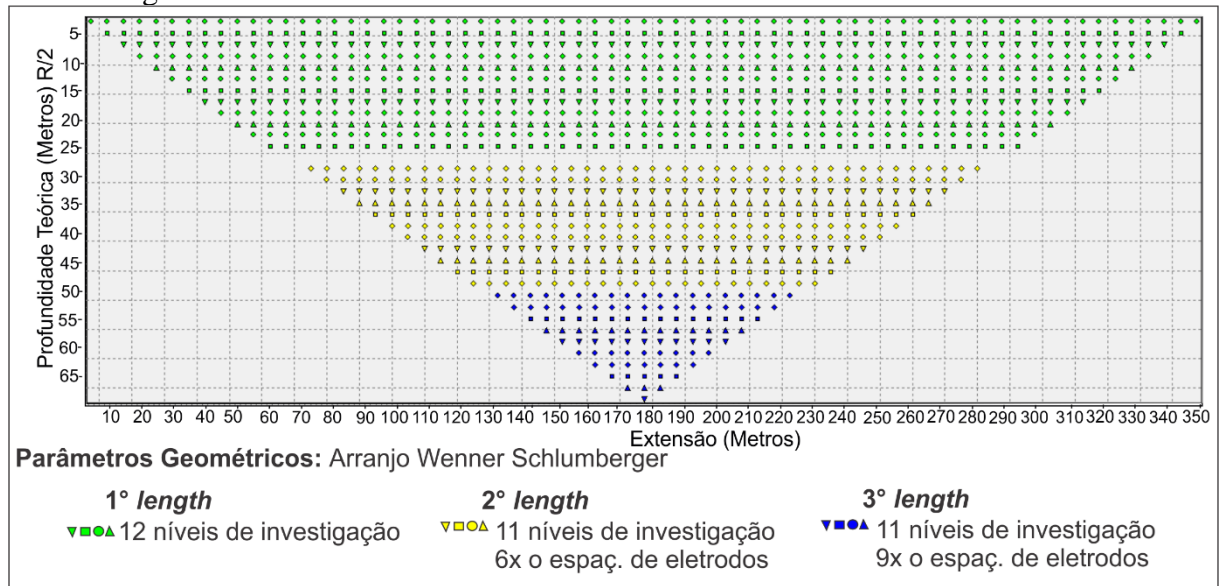


Fonte: elaborado pela autora (2017).

ii) Arranjo wenner schlumberger:

Sequência de três camadas com pontos de aquisição de resistividade elétrica distribuídos em 34 níveis de investigação. A injeção de corrente elétrica ocorre a uma distância de seis vezes o espaçamento dos eletrodos para a 2° camada e de 9 vezes para a 3° camada. A profundidade teórica é aproximadamente 70 metros (Figura 22).

Figura 22 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo wenner schlumberger.

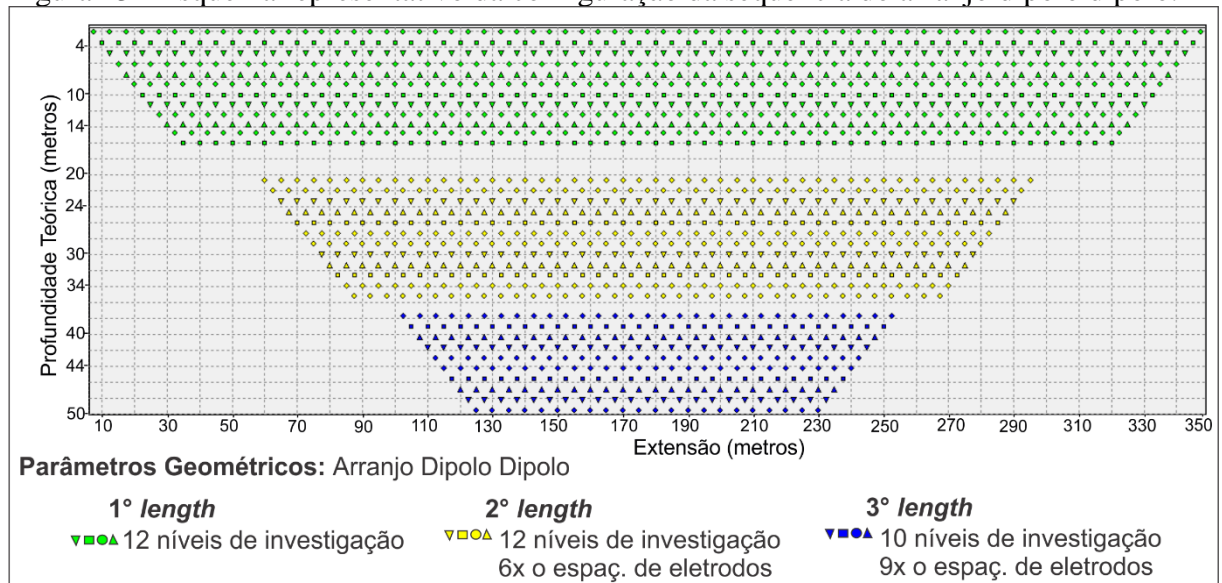


Fonte: elaborado pela autora (2017).

iii) Arranjo dipolo dipolo:

Sequência de três camadas com pontos de aquisição de resistividade elétrica distribuídos em 34 níveis de investigação. A injeção de corrente elétrica ocorre a uma distância de 6 vezes o espaçamento dos eletrodos para a 2º camada e de 9 vezes para a 3º camada. A profundidade teórica é aproximadamente 50 metros de profundidade (Figura 23).

Figura 23 - Esquema representativo da configuração da sequência do arranjo dipolo dipolo.

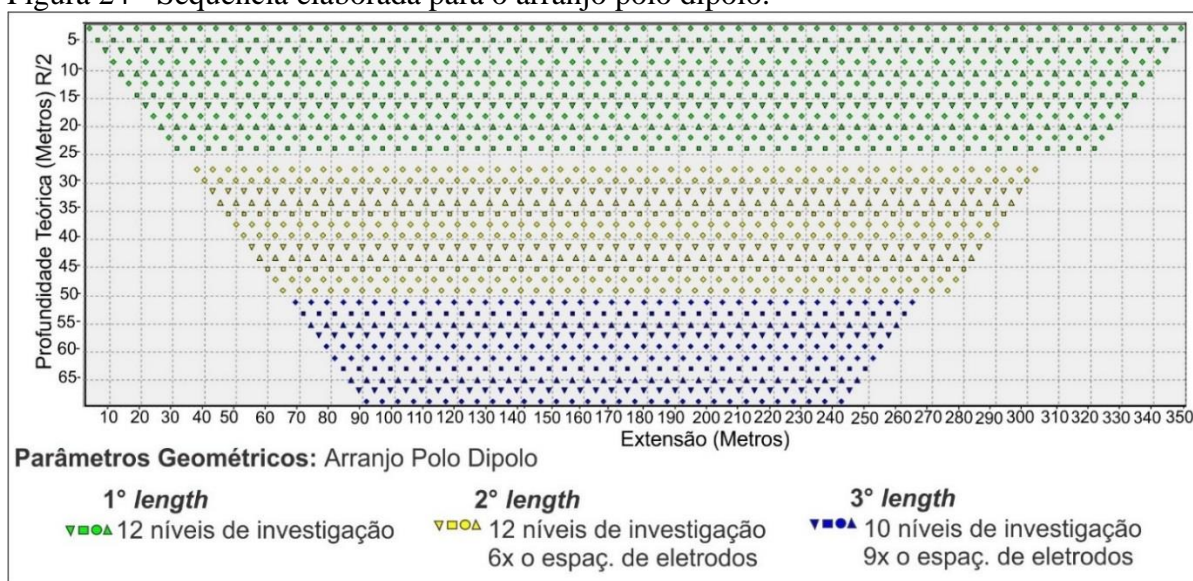


Fonte: elaborado pela autora (2017).

iv) Arranjo polo dipolo:

Sequência de três camadas com pontos de aquisição de resistividade elétrica distribuídos em 34 níveis de investigação. A injeção de corrente elétrica ocorre a uma distância de 6 vezes o espaçamento dos eletrodos para a 2ª camada atingindo 12 níveis de investigação e de 9 vezes para a 3ª camada com 10 níveis de investigação. A profundidade teórica é aproximadamente 70 metros de profundidade (Figura 24).

Figura 24 - Sequência elaborada para o arranjo polo dipolo.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

6.1.3 Processamento

Foi utilizado o *software* Prosys II para transferência (equipamento – computador) de dados adquiridos com o uso do resistímetro Syscal Pro. O pré processamento consiste basicamente em i) inserção da topografia do perfil, ii) controle dos valores de resistividade inicial com a remoção de valores negativos, iii) seleção de uma faixa (*range*) de valores de resistividade inicial e iv) controle do desvio padrão dos valores. A partir deste procedimento é gerado um arquivo e importado para o *software* res2Dinv para o processo de inversão dos valores de resistividade elétrica aparente medida. Foram realizados alguns testes para definir a quantidade de iterações que seriam utilizados para todos os perfis. Observou-se que entre a 4ª e 5ª iteração ocorreu uma pequena mudança no percentual de erro RMS, então definiu-se que para todas as seções de eletrorresistividade fossem consideradas 5 iterações.

Por último o georreferenciamento dos valores de resistividade elétrica em profundidade e extensão dos perfis com o uso do *software* Oasis Montaj. A geração de voxels representa um

valor em uma malha (grid) regular em um espaço tridimensional. O número de células X/Y/Z foi de 29/110/92, e considerou-se a quantidade de 2 pixels para a geração de células dos voxels. Apenas os valores de resistividade elétrica entre 0 e 200 ohm.m foram selecionados para a visualização tridimensional dos voxels. Os demais valores foram desconsiderados a fim de otimizar o resultado final (objetivo do trabalho).

6.1.4 Campanha geofísica

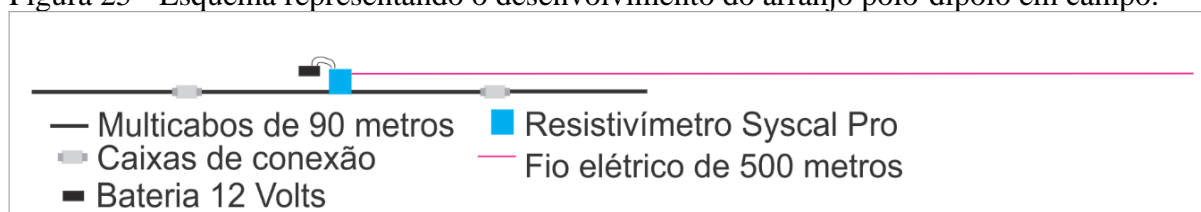
Após comparação das geometrias de arranjos na linha teste concluiu-se que o arranjo polo-dipolo foi mais acurado sendo, portanto, mais eficaz em termos de maior razão sinal/ruído. Atingiu uma profundidade de investigação em torno de 65 metros e abrangeu maior área em subsuperfície. Determinou-se que para todas as linhas (perfis) programadas a sequência com o arranjo polo-dipolo fosse usada.

A execução dos perfis em campo foi realizada por uma equipe de colaboradores da Mineração Curral de Pedra composta por auxiliares de campo, profissionais de geologia e geofísica e uma estagiária de geofísica (deslocamento dos cabos, implantação dos eletrodos e equipamento para realização das leituras).

O solo em todas as linhas programadas para o desenvolvimento dos perfis encontrava-se compactado e seco, para uma melhor propagação da corrente elétrica em subsuperfície fez-se necessário o uso de uma solução de água, sal e detergente em cada eletrodo do perfil com o objetivo de reduzir a resistividade elétrica inicial do solo.

Para o arranjo polo-dipolo, além de se estender os quatro multicabos de 90 metros foi preciso utilizar mais um cabo, cuja extensão fosse suficientemente grande para que o equipamento reconheça que o eletrodo está remoto. Foram utilizados 500 metros de fio elétrico para satisfazer essa exigência e obter uma qualidade dos dados considerável. O tempo para o desenvolvimento do arranjo em campo era de aproximadamente duas horas e o tempo de leitura dos dados com o equipamento era de quatro horas (Figura 25).

Figura 25 - Esquema representando o desenvolvimento do arranjo polo-dipolo em campo.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

6.2 Análise e suavização de ruídos das seções de resistividade elétrica

Algumas seções de eletrorresistividade apresentaram um ruído visível e erro RMS característico em aquisições deste tipo. Para a redução dos ruídos das seções de eletrorresistividade fez-se um estudo com base em tentativas. Estas compreendem:

i) Escolha da seção de eletrorresistividade: Fez-se uma seleção e comparação com base em parâmetros como o erro RMS, ruído visível e número de pontos de medida para a escolha do banco de dados com maiores problemas.

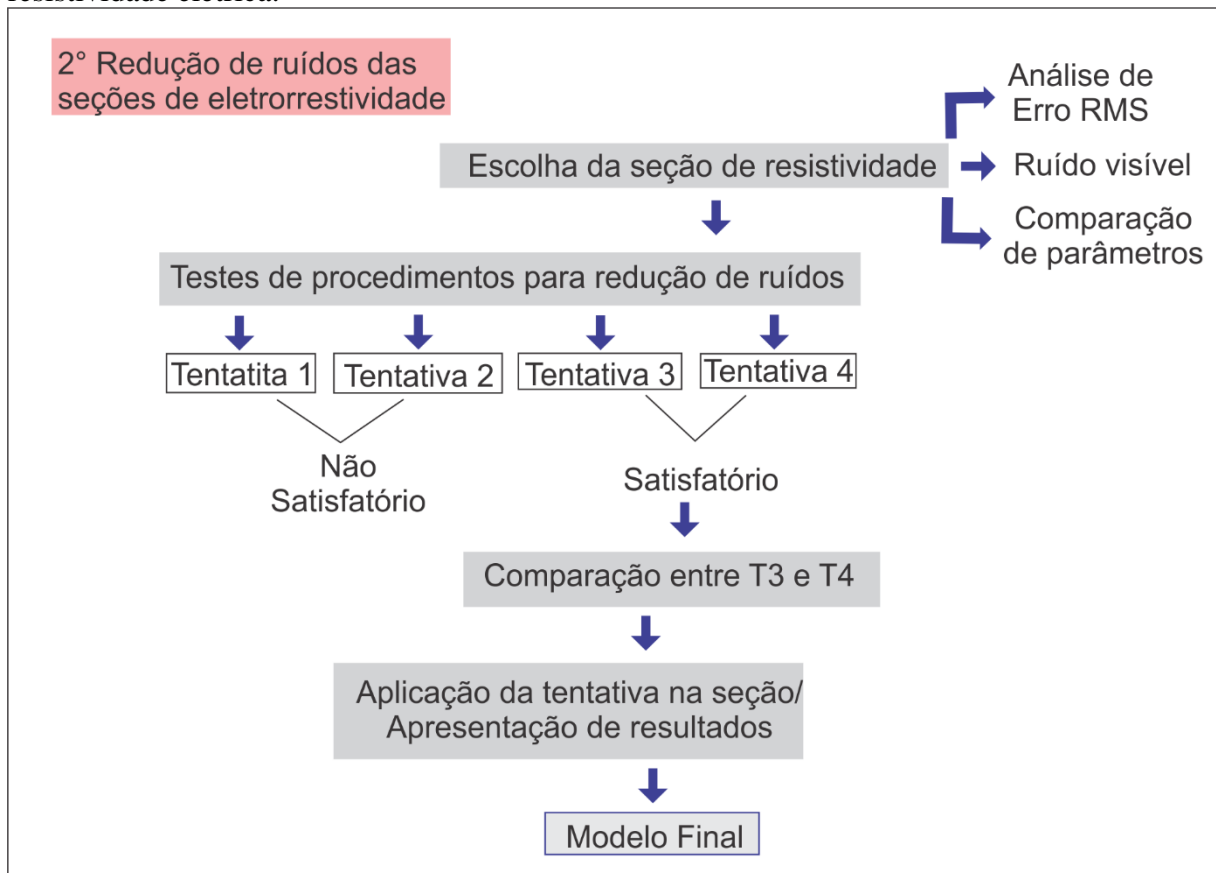
ii) Testes de procedimentos com a base de dados escolhida: Foi realizado a escolha do método de filtragem e foram executadas 4 tentativas de correção dos ruídos visíveis, dos quais dois foram insatisfatórias, ou seja, apresentaram pouca ou nenhuma mudança no resultado final e duas que apresentaram uma atenuação/suavização nos ruídos visíveis nas imagens finais das seções.

iii) Comparação das tentativas: Foram comparadas com base na análise dos ruídos nas seções geradas pós aplicação do filtro, rapidez de execução da rotina proposta e mudança em parâmetros de inversão.

iv) Apresentação dos resultados: Com a escolha do teste satisfatório, fez-se o reprocessamento de três seções de eletrorresistividade dispostas paralelamente para uma análise dos resultados finais a partir de gráficos, imagens tridimensionais de níveis de investigação em profundidade.

Todas as etapas para realização do experimento são apresentadas em fluxograma na Figura 26.

Figura 26 - Fluxo das atividades da etapa de análise e otimização de ruídos das seções de resistividade elétrica.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

6.2.1 Escolha das seções de eletroresistividade

As seções de resistividade elétrica processadas para o estudo de caso foram listadas em uma tabela com a porcentagem do erro RMS da 5ª Iteração, número de blocos e o número de pontos medidos para cada seção (Tabela 4).

Tabela 4 - Seções de resistividade com informações de número de pontos de medida, blocos e erro RMS da 5ª Iteração.

Seção	Número de pontos de medida	blocos	Erro RMS 5ª Iteração (%)
180_A	1429	948	59,38
160_A	1538	951	53,39
220_A	1455	953	51,81
140_A	1610	949	43,82
160_M	1649	959	32,59

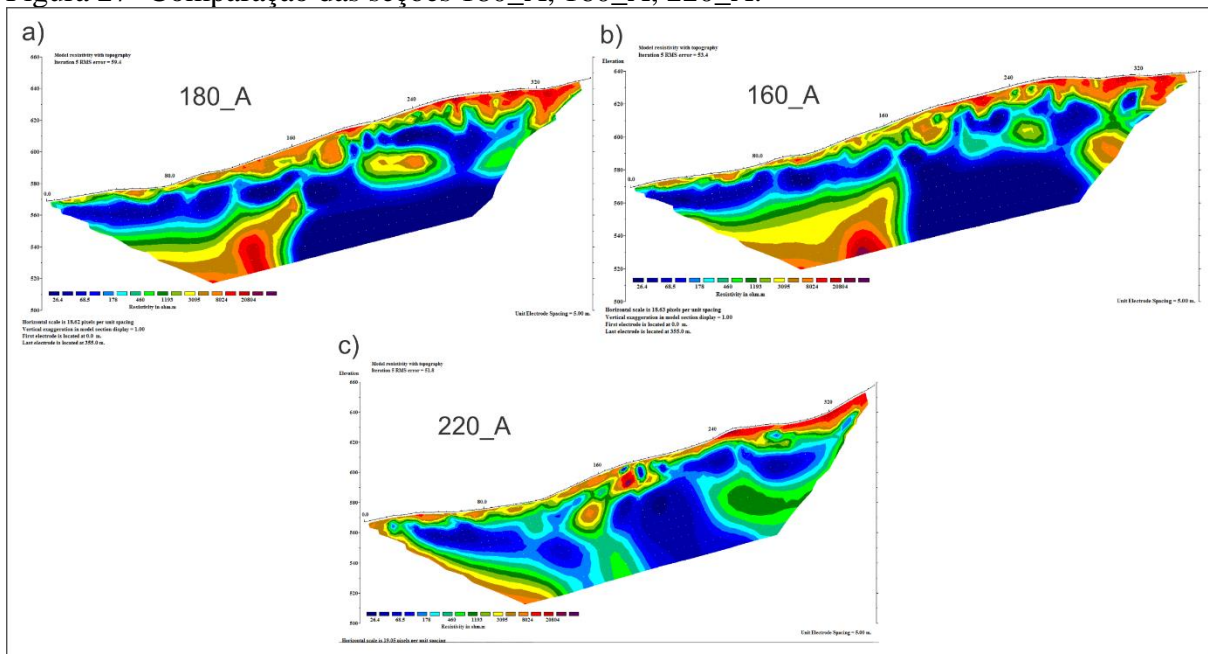
200_A	1544	955	32,05
120_A	1680	958	29,90
150_M	1570	958	29,25
210_M	1659	958	28,82
180_M	1687	959	20,76
230_M	1704	959	13,16
190_M	1654	958	12,04

Fonte: elaborado pela autora (2017).

Observa-se que as seções 180_A, 160_A, 220_A tem o maior erro RMS. Quanto maior o número de pontos de medidas e consequentemente o menor número de blocos, ocorre um acréscimo no erro RMS. Em contrapartida quanto maior o número de pontos de medidas e blocos o erro RMS diminui.

Para a escolha da seção de teste fez-se a comparação entre as seções de maior erro RMS (180_A, 160_A, 220_A) em relação ao ruído visível (figura 27).

Figura 27- Comparação das seções 180_A, 160_A, 220_A.



Fonte: elaborado pelo autor (2017).

Observa-se ruído visível por meio de pequenos dipolos presentes principalmente na porção superior das seções (figura 27). A ocorrência dos ruídos pode estar relacionada a fatores como a alta resistividade inicial do solo no momento da aquisição de dados ou da composição

do solo com materiais mais resistivos. Para realizar o experimento foi escolhido a seção 180_A devido a maior porcentagem de erro RMS e ao maior ruído visível observado.

6.2.2 Testes de procedimentos para a redução de ruídos

Inicialmente utilizou-se o banco de dados gerado a partir da inversão dos dados da seção 180_A para testar filtros disponíveis no *software* Oasis Montaj com o objetivo de reduzir os picos das curvas de resistividade elétrica responsáveis pela formação de anomalias indesejáveis nas seções. Separou-se valores de resistividade elétrica do banco de dados de valores invertidos da 5ª iteração do primeiro nível de investigação. O filtro que melhor ajustou a curva dos valores foi o não linear “*non linear filter*”, com a suavização de alguns picos de resistividade elétrica (Figura 28).

Figura 28 - Gráfico com os valores de resistividade elétrica do primeiro nível de investigação (vermelho) e resistividade elétrica com aplicação do filtro (verde).

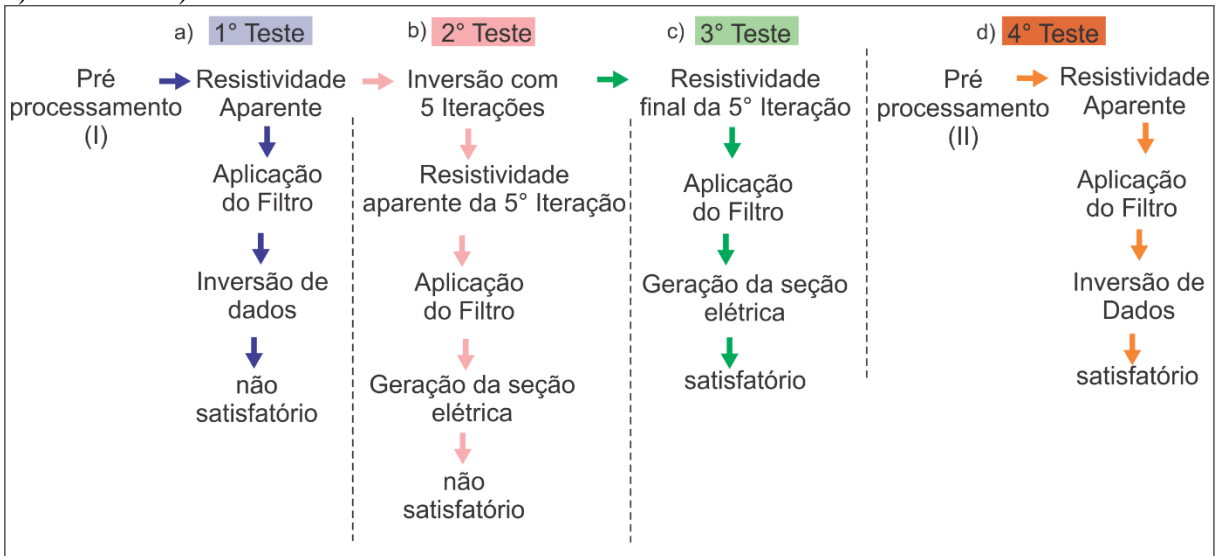


Fonte: elaborado pela autora (2017).

6.2.3 Desenvolvimento dos testes

Inicialmente realizou-se o pré processamento (I), (*software* Prosys II) com a inserção dos dados de topografia, exclusão de valores negativos de resistividade elétrica, definição de uma faixa (*range*) de valores mínimos e máximos de resistividade e controle do desvio padrão dos dados. Das 1.711 medidas de resistividade elétrica restaram 1.429. Os valores foram exportados em formato *.dat (Figura 29).

Figura 29 – Fluxograma explicativo do desenvolvimento dos testes em a) 1º teste, b) 2º teste, c) 3º teste e d) 4º teste.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Os testes 1, 2 e 3 foram desenvolvidos com o pré processamento (I). Após, o filtro não linear foi aplicado aos dados da resistividade elétrica aparente medida (1º Teste), da resistividade elétrica verdadeira calculada depois da inversão dos dados (2º Teste) (*software Res2Dinv*). Para os dois casos não foram identificadas mudanças no erro RMS e a mudança no ruído observado foi insignificante. Portanto, os resultados não foram satisfatórios (Figura 29a, 29b).

No 3º teste separou-se os valores de resistividade elétrica final invertidos da 5ª iteração para a aplicação do filtro. O arquivo de formato *.INV foi alterado e novamente inserido no Res2Dinv para a geração da seção de resistividade. O resultado desta tentativa mostrou-se satisfatório na observação do ruído visível e o erro RMS permaneceu constante, pois não foi realizado uma nova inversão, apenas modificou-se o resultado da 5ª iteração suavizando ruídos através da utilização de filtro não linear (Figura 29c).

No 4º teste aplicou-se a filtragem nos valores de resistividade elétrica antes do processo de inversão. Para isso, no pré-processamento (II) fez-se somente a exclusão de valores negativos e a inserção de topografia. O objetivo foi reduzir minimamente o número de medidas iniciais de resistividade elétrica (de 1.711 medidas ficaram 1.487).

Aplicou-se o filtro em todos os valores de resistividade elétrica aparente do arquivo formato *.dat e a execução deste procedimento foi mais rápida. Observou-se a redução da faixa (*range*) de valores de resistividade elétrica sem a necessidade de exclusão destes. Para a inversão dos dados continuaram sendo consideradas 1.487 medidas de resistividade (Figura 29d). O ruído observado foi atenuado e o erro RMS apresentou um aumento de 10 %.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados levando-se em conta a formatação do Trabalho de Conclusão de Curso (manuscrito) que foi determinada de acordo com as etapas e procedimentos adotados. Estas compreendem:

1. Resultados do estudo de caso na comparação dos arranjos, apresentação das seções de eletrorresistividade da campanha geofísica e o produto final a partir de modelos de visualização 3D de *voxels*;
2. Resultados dos testes dos ruídos visíveis, apresentados em gráficos, imagens comparativas, seções de eletrorresistividade e camadas em níveis de profundidade.

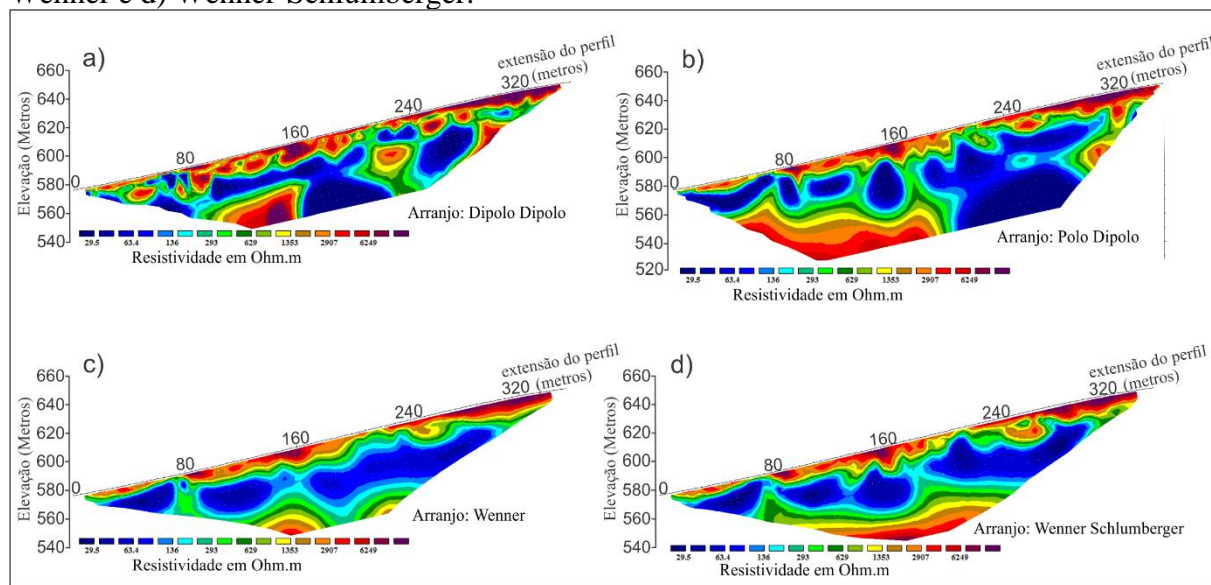
Todas as seções de eletrorresistividade geradas encontram-se nos apêndices I, II e III. São apresentadas sem edições das imagens de saída do *software* Res2Dinv e com as especificações do processamento (número de iterações, erro RMS e número de pontos medidos). As figuras (seções de eletrorresistividade e resultados) apresentadas neste capítulo foram editadas e modificadas para melhor análise e comparação dos resultados.

7.1 Estudo de caso:

7.1.1 Comparação de arranjos

Para avaliação dos resultados gerou-se seções de resistividade elétrica para cada arranjo geométrico (Figura 30). Observa-se que os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo possuem a maior cobertura lateral. Isto ocorre devido a matriz geométrica programada para os arranjos geométricos das sequências (Figura 30a e 30b). Os arranjos Wenner e Wenner-Schlumberger possuem menor cobertura lateral, porém, uma maior razão sinal/ruído resultando na diminuição de dipolos e ruídos visíveis (Figura 30c e 30d). O arranjo polo-dipolo apresenta alguns dipolos na parte superior da seção (ruídos visíveis), mas que não influenciam na identificação das maiores feições (baixos e altos resistivos) (Figura 30b).

Figura 30 – Seções de eletrorresistividade dos arranjos a) dipolo-dipolo, b) polo-dipolo, c) Wenner e d) Wenner-Schlumberger.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Na tabela 5 estão algumas especificações do processamento para cada arranjo. O número de pontos medidos está relacionado com a sequência geométrica configurada e influencia diretamente na geometria do arranjo de eletrodos. A menor geometria de arranjo é o Wenner e a maior é o polo-dipolo. Quanto maior o número de pontos de medida do arranjo determinado, melhor será o desempenho no procedimento de inversão dos dados. O arranjo polo-dipolo apresenta maior profundidade de investigação, o arranjo Wenner Schlumberger tem profundidade de investigação alta, mas perde qualidade nos últimos níveis de investigação devido a geometria da sequência. O arranjo dipolo-dipolo apresentou a maior porcentagem de erro RMS, enquanto o Wenner teve o menor.

Tabela 5 - Comparação de parâmetros dos arranjos geométricos executados no perfil teste da área de estudo.

Arranjo	Nº de pontos medidos Inicial / Final	Profund. de Investigação (metros) Inicial/Final	Erro RMS (% 5º Iteração)
Dipolo Dipolo	1537 / 1433	50 / 56,0	81,80
Polo Dipolo	1711 / 1705	70 / 75,8	34,65
Wenner	828 / 821	60 / 63,8	10,24
Wenner Schlumberger	1148 / 1140	65 / 72,4	37,54

Fonte: elaborado pela autora (2017).

A partir da comparação dos arranjos geométricos com base na análise dos parâmetros da inversão das seções de resistividade elétrica, concluiu-se que o arranjo polo dipolo é o mais satisfatório, devido a boa cobertura lateral, maior número de medidas finais e maior profundidade de investigação.

7.1.2 Seções de eletrorresistividade da campanha geofísica

As seções de eletrorresistividade da campanha geofísica apresentaram resistividade elétrica entre 26.4 e 20804 ohm.m, foram separadas em grupos e por cores (Figura 31). Para a melhor compreensão dos resultados definiu-se que resistividades elétricas entre 26.4 e 200 são baixos resistivos, de 200 a 8000 Ohm.m resistividade elétrica intermediária e de 8000 a 20804 ohm.m altos anômalos resistividade elétrica. O mapa topográfico foi gerado juntamente com as galerias subterrâneas (com 60 % de transparência na malha topográfica) e com a localização dos perfis em superfície (Figura 33a). Para uma melhor compreensão da localização dos principais pontos das galerias da mina fez-se a identificação das três faces de desenvolvimento (esferas amarelas), rampa central (traço rosa) e galeria mestre (círculo laranja) (Figura 33b).

Os perfis denominados de Área Sul (identificados com a cor azul) estão localizados em um baixo topográfico (540 a 560 metros, figura 33a) e ao sul das galerias subterrâneas. Seções de eletrorresistividade da Área Sul tem como características principais os baixos anômalos (68.5 a 178 ohm.m) nas estações entre 240 e 320 metros de perfil. Na região central das seções (aproximadamente 160 metros) observa-se altos anômalos (8024 a 20804 ohm.m). Nas estações entre 160 e 240 metros de extensão do perfil observa-se o contato entre duas regiões de dipolos que podem estar relacionadas a presença de alguma estrutura geológica como fraturas (Figura 31).

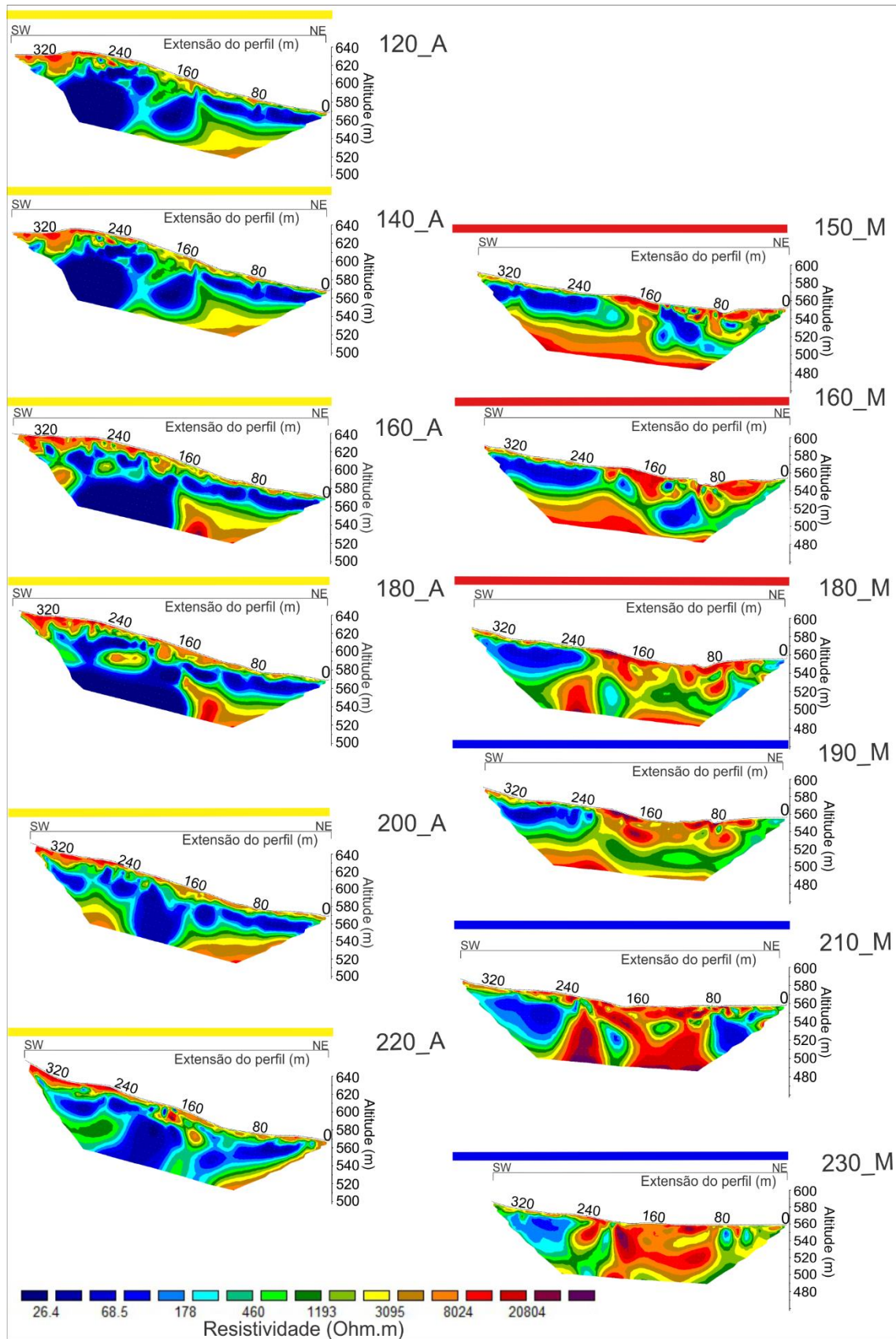
Os perfis zona de recarga (identificados em vermelho, Figura 32), estão localizados acima das galerias denominadas de Mestre. Nas estações dos perfis 150_M, 160_M e 180_M entre 240 e 320 metros observa-se baixos anômalos de resistividade elétrica (30 a 170 ohm.m) no topo e na base das seções uma área de contato, com uma resistividade de aproximadamente 15000 ohm.m variando até 460 ohm.m. A seção 160_M localiza-se acima da galeria mestre e pode-se correlacionar os dipolos entre 80 e 160 metros de extensão dos perfis às galerias em subsuperfície (Figura 31).

Nos perfis denominados de Zona de Recarga (identificados em amarelo, Figura 32), estão localizados em um alto topográfico (de 595 a 670 metros de altitude, Figura 33). Nas seções (Figura 31) observa-se entre 160 e 320 metros de extensão a maior concentração de

baixos anômalos (de 0 a 200 ohm.m). Em 160 metros de extensão observa-se um contato entre zonas de altos e baixos anômalos que podem estar associados a presença de estruturas geológicas (Figura 31).

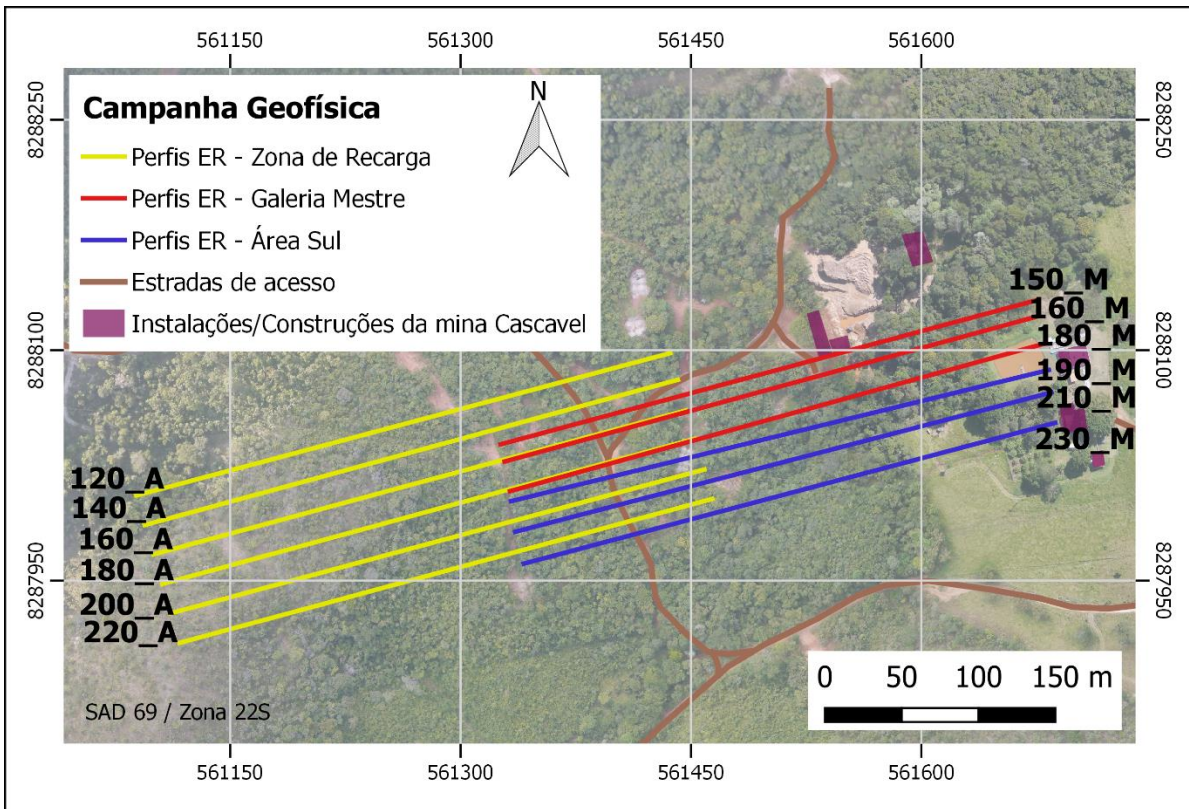
Para uma análise em detalhe dos baixos anômalos de resistividade elétrica das seções, fez-se *voxels* e separou-se um range de valores de 0 a 200 ohm.m para a composição do modelo de visualização 3D. Na Figura 34 foram dispostas imagens da visualização tridimensional dos *voxels* dos perfis com as galerias subterrâneas da mina em diferentes inclinações e declinações dos eixos x, y e z. Na Figura 34a a imagem está com 90° (graus) de inclinação e 0° de declinação, observa-se baixos anômalos de resistividade elétrica em grande volume na porção SW da área, próximo a rampa central (traço rosa) observa-se a atenuação do volume de baixos resistivos. Na Figura 34b com 10° de inclinação e 109.4° de declinação com foco na zona de recarga percebe-se que há uma grande concentração de baixos anômalos muito próximas a rampa central. Quando observado com 6° de inclinação e -40° de declinação (Figura 34c) observa-se que a zona de recarga está localizada em um alto topográfico e que a galeria Mestre está localizada próxima a baixos anômalos. A partir da análise em vários ângulos de visualização (Figura 34) das seções de resistividade elétrica conclui-se que há baixos anômalos em um alto topográfico e que as faces de desenvolvimento da mina (esferas amarelas, Figura 33b) localizadas próximo a rampa central e a galeria Mestre estão com tendência de crescimento para a zona de maior concentração dos baixos resistivos.

Figura 31- Seções de eletrorresistividade para cada perfil executado na campanha geofísica



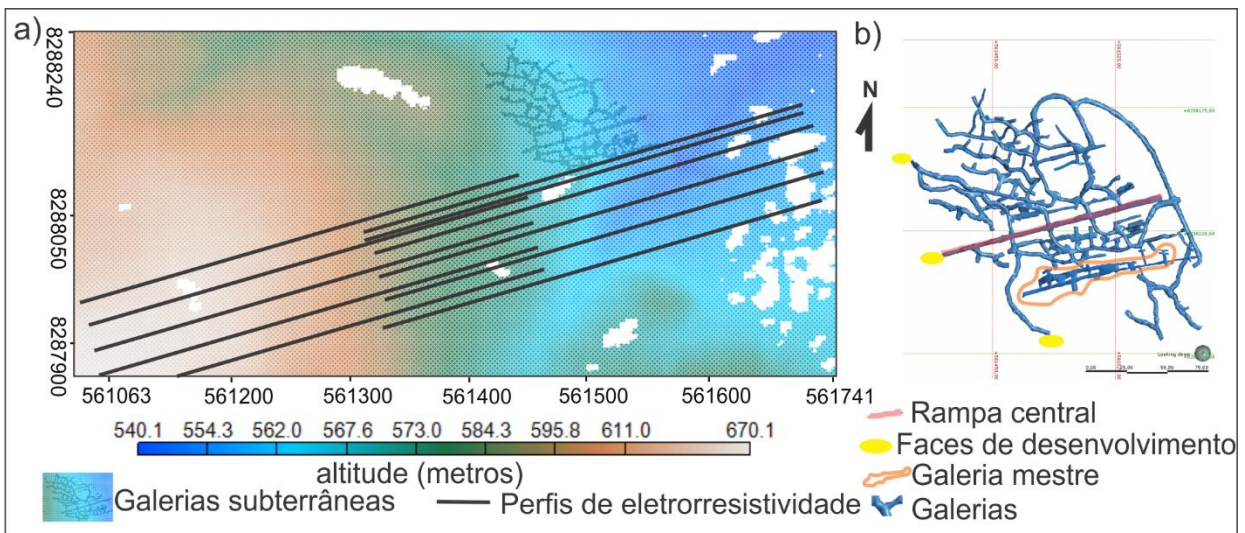
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 32 - Mapa de localização dos perfis identificados por cores e nomes



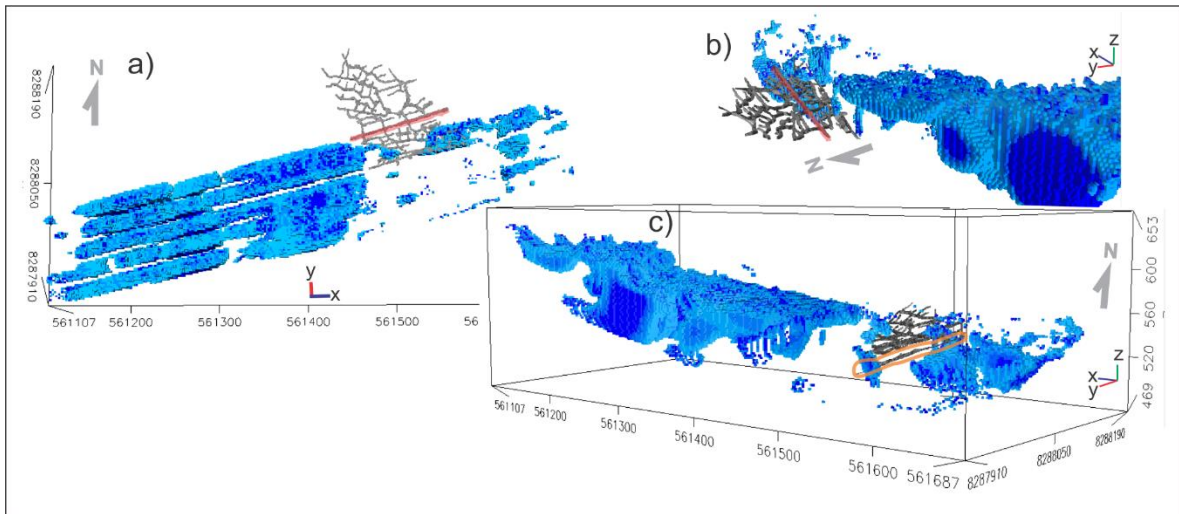
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 33 - Em a) mapa de altimetria com os perfis executados e as galerias da mina cascavel (60 % de transparência), b) Galerias subterrâneas com identificações em pontos importantes.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 34 - Em a, b, e c modelos de visualização 3D da resistividade elétrica das seções entre 0 e 200 ohm.m e galerias subterrâneas.

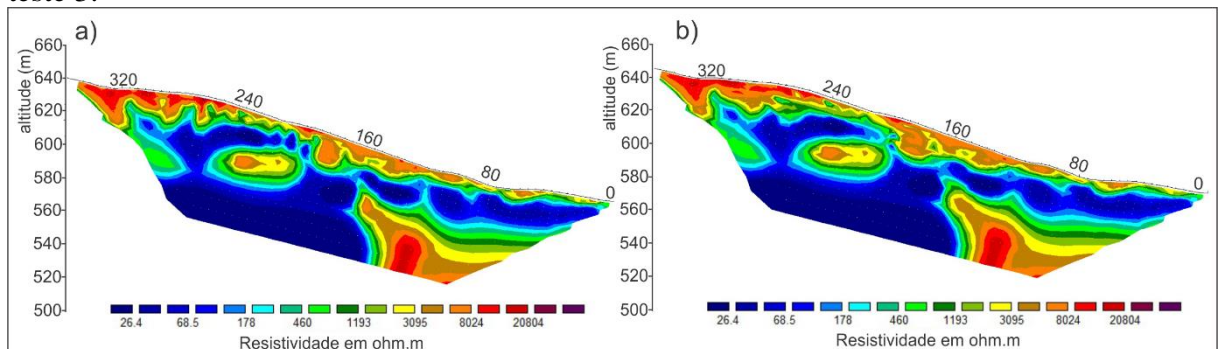


Fonte: elaborado pela autora (2017).

7.2 Análise de ruídos das seções de eletrorresistividade

Os testes 3 e 4 apresentaram resultados satisfatórios para o objetivo proposto. A diferença entre eles está no procedimento de pré-processamento e na ordem de aplicação do filtro. No teste 3 observa-se a redução de ruídos visíveis representados por pequenos dipolos, principalmente na parte superior das seções, atingindo os primeiros níveis de investigação (Figura 35).

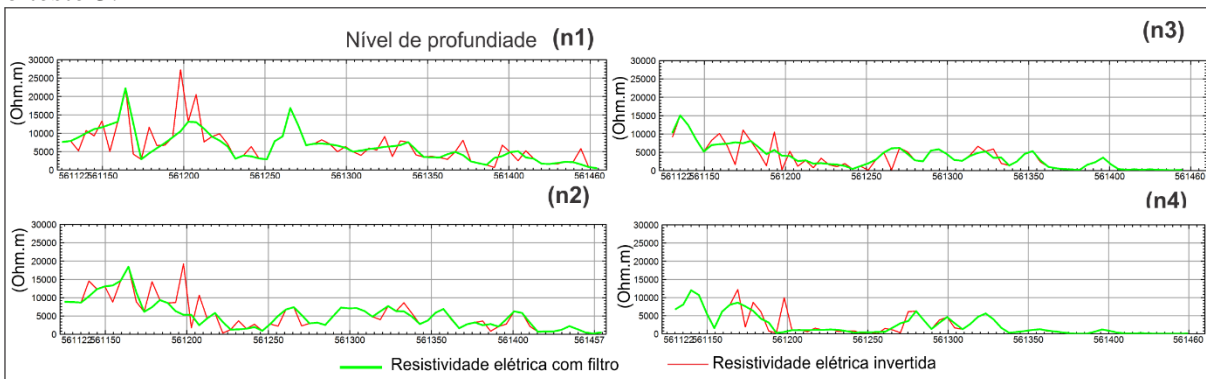
Figura 35 – Seções de eletrorresistividade da linha 180_A em a) invertida em b) filtrada com o teste 3.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Nos gráficos (Figura 36) observa-se a resistividade elétrica invertida comparada com a filtrada com o uso do teste 3 para 4 níveis de profundidade de investigação. Nas curvas é possível perceber a suavização de picos de resistividade elétrica com a aplicação da filtragem nos dados.

Figura 36 - Gráficos de resistividade elétrica dos quatro primeiros níveis de profundidade para o teste 3.

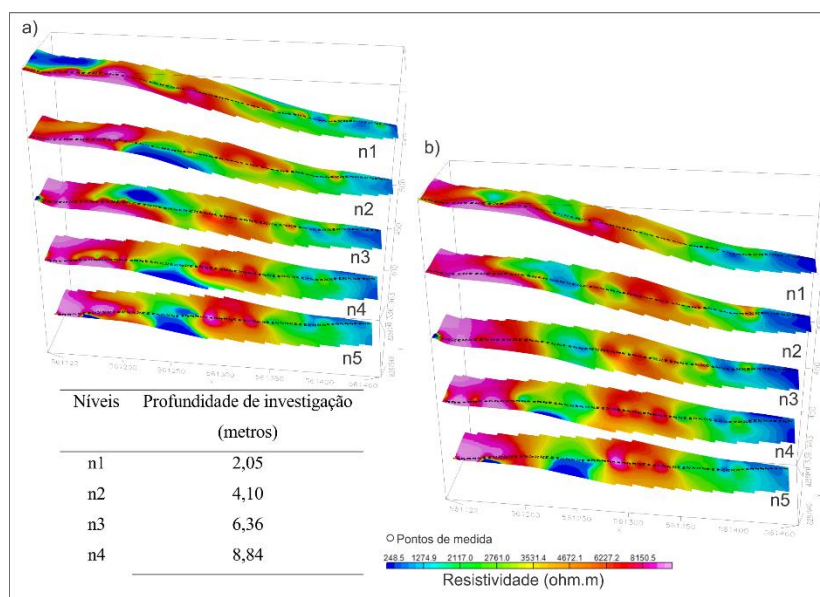


Fonte: elaborado pela autora (2017).

A partir do banco de dados de resistividade elétrica invertida e filtrada dos níveis de investigação fez-se malhas por meio do interpolador mínima curvatura para gerar modelos de visualização 3D das camadas em profundidade (Figura 37). Observa-se a atenuação dos dipolos de altos e baixos resistivos nas camadas com a aplicação do filtro, como exemplo, no nível n3 (Figura 37a) só com o dado invertido ocorre um baixo resistivo quando observado no n3 filtrado (Figura 37b) há a atenuação deste dipolo.

O teste 3 apresentou um resultado satisfatório para o ruído visível, mas a execução da rotina descrita é mais demorada, pois o filtro é aplicado para cada nível de profundidade separadamente, devido a configuração padrão do banco de dados de formato *.INV extraído do Res2Dinv e não é possível fazer aferição ao erro RMS porque o desenvolvimento do teste consiste na inversão dos valores de resistividade elétrica medidos e depois a aplicação do filtro.

Figura 37 – Modelo de visualização tridimensional em a) dos níveis de profundidade invertidos e em b) níveis de profundidade invertidos e filtrados (teste 3).



Fonte: elaborado pela autora (2017).

A partir da análise do teste 3, escolheu-se o teste 4 para a elaboração do modelo final devido a considerável correção dos ruídos visíveis, maior número de pontos medidos (não ocorre a exclusão de valores de resistividade inicial e sim a atenuação destes com a utilização do filtro), rapidez na execução da aplicação do filtro e mudança no erro RMS. O desenvolvimento do teste 4 consiste na aplicação do filtro nos dados de resistividade aparente e depois a inversão por meio do *software* res2Dinv (vide item 6.2.3). O erro RMS sofre um acréscimo de 10%, mas estudos anteriores como Loke e Barker (1996a), afirmam que o modelo cujo erro RMS é de menor porcentagem nem sempre será o melhor, recomenda-se a escolha daquele em que a variação do erro entre uma e outra iteração seja pequena. Lopes (2013) acrescenta que o erro é dependente do número de valores anômalos e magnitude dos mesmos, ou seja, um valor anômalo pode influenciar em um acréscimo no erro RMS, mesmo que o restante das medições seja de boa qualidade.

7.2.1 Modelo final do teste da análise de ruídos das seções de resistividade

Para a geração de um modelo final separou-se o banco de dados brutos e as seções de eletrorresistividade das linhas 140_A, 160_A e 180_A. A partir do teste 4 (vide item 6.2.3) foram geradas as seções 2D com a aplicação do filtro (Figuras 38b, 39b e 41b). Estas, quando comparadas com as seções invertidas anteriormente (Figuras 38a, 39a, 41a) observa-se uma

atenuação em pequenos dipolos formadores de ruído visível principalmente da porção superior das seções 2D filtradas.

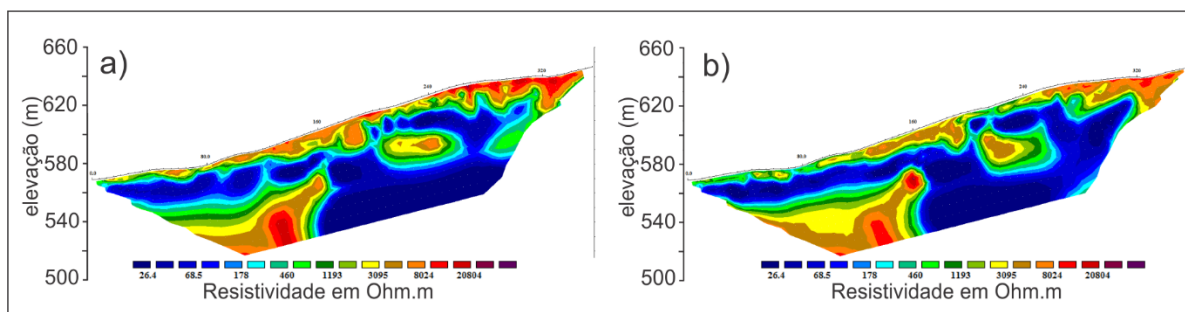
Com o banco de dados invertidos e filtrados das seções de eletrorresistividade gerou-se gráficos de comparação para três níveis de investigação em profundidade: n2 (4,10 metros), n3 (8,84 metros), n6 (14,6 metros) (Figura 40). Foram selecionados os níveis da porção superior das seções com a finalidade de ilustrar o efeito da aplicação do filtro em níveis com uma quantidade maior de números de pontos de medida.

Os valores de resistividade elétrica do banco de dados brutos/originais possuem um range de valores maiores para o teste 4, devido a não classificação prévia dos mesmos, por esse motivo nota-se a redução da eficácia na correção dos picos de resistividade por meio da filtragem, ainda assim, observa-se a suavização dos mesmos em alguns pontos, como exemplo, na (Figura 40b) a partir de 620 metros de elevação observa-se a redução dos picos nos três perfis.

Com o uso do interpolador de mínima curvatura gerou-se as camadas das seções de eletrorresistividade em subsuperfície (Figuras 42 e 43). O modelo tridimensional é composto por três seções paralelas devido ao acréscimo de pontos de medida na composição do banco de dados, conseqüentemente aumento da malha de pontos para que o interpolador se comporte de maneira menos errônea, gerando menos tendências de borda.

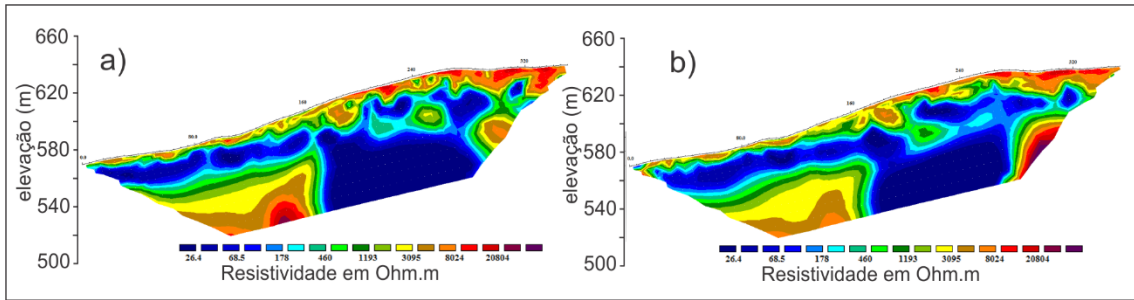
Na Figura 43 observa-se a atenuação de pequenos dipolos no nível de investigação n2, principalmente entre as coordenadas 561200 e 561106. Na região central do n4 (coordenada 561300), observa-se uma interpolação com mais preenchimento, diferente do observado na Figura 42 somente com a inversão.

Figura 38 - Seções de resistividade elétrica da linha 180_A em a) invertida, b) filtrada.



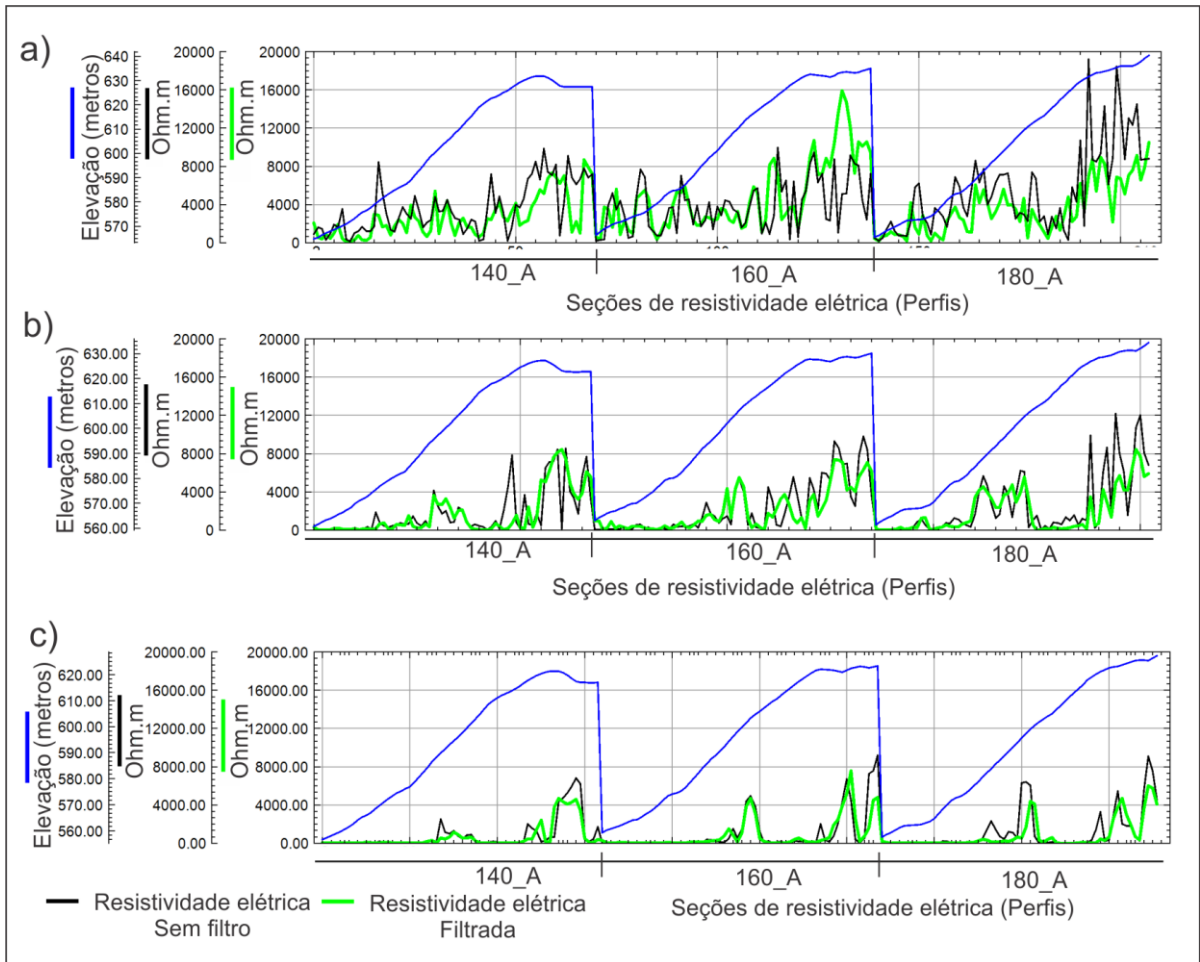
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 39 – Seções de resistividade elétrica da linha 160_A em a) invertida, b) filtrada.



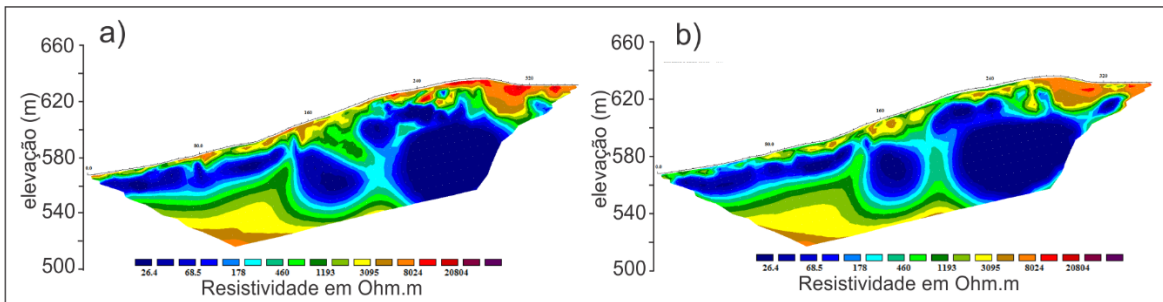
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 40 - Gráficos das resistividades elétricas invertidas e filtradas a) Seções no 2º nível de investigação, b) Seções no 4º nível de investigação e c) Seções no 6º nível de investigação.



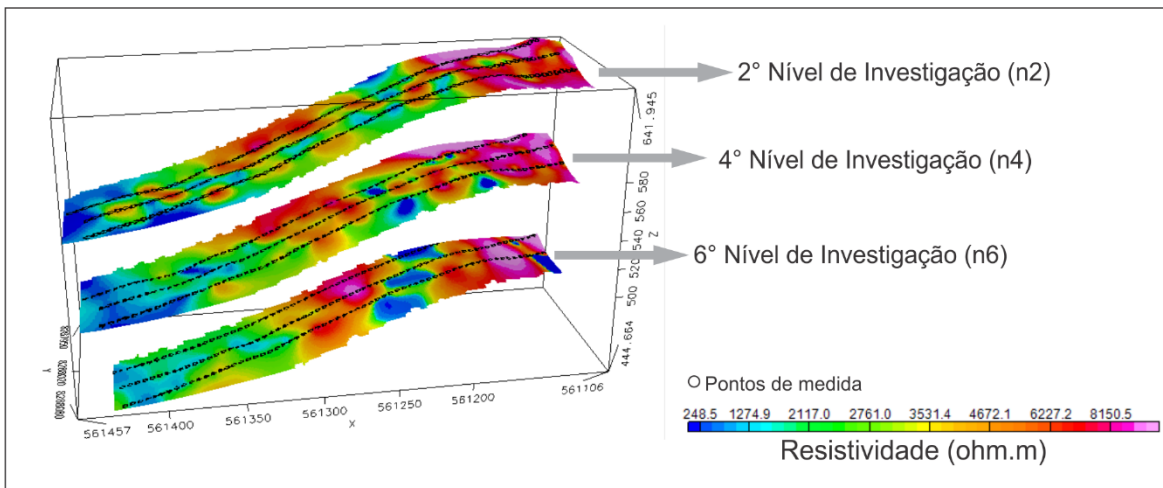
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 41 - Seções de resistividade elétrica da linha 140_A em a) invertida, b) filtrada.



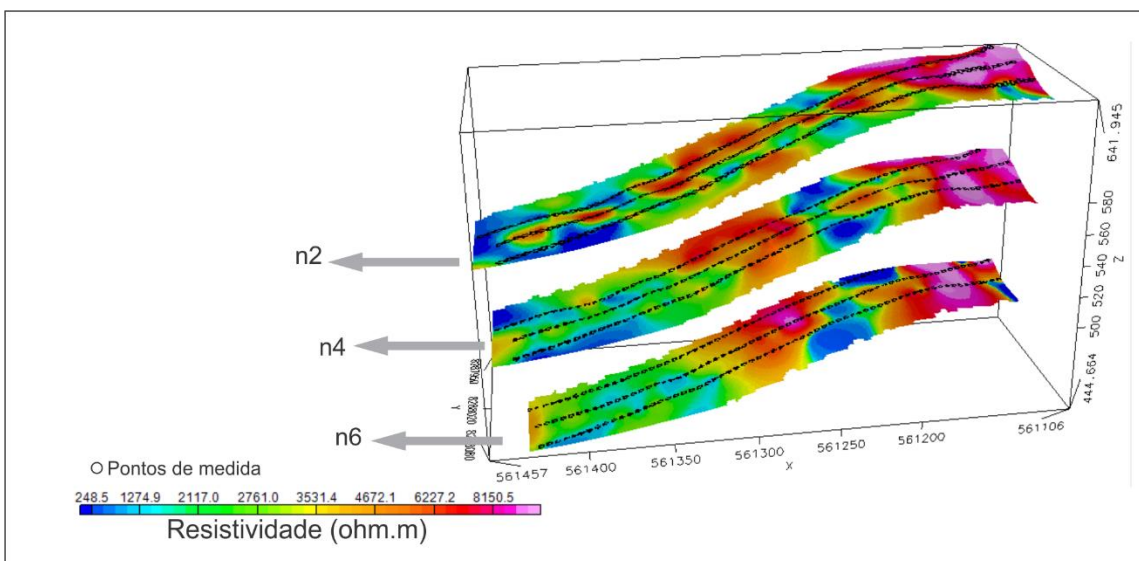
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 42 - Modelo de visualização 3D em níveis de profundidade da resistividade elétrica nas três seções com o procedimento de inversão.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 43 – Modelo de visualização em níveis de profundidade da resistividade elétricas nas três seções com o procedimento de filtragem e inversão (teste 4).



Fonte: elaborado pela autora (2017).

8 CONCLUSÕES

Os baixos resistivos identificados com o processamento e inversão de 12 seções de eletrorresistividade caracterizaram uma zona de recarga localizada em um alto topográfico próximo a faces de desenvolvimento de galerias subterrâneas de uma mina de exploração aurífera em pleno funcionamento. O uso das informações da localização da zona de recarga, bem como a profundidade de investigação serve de subsídio tanto para a problemática de infiltração de água na mina quanto para a decisão de medidas de prevenção para o aproveitamento de forma sustentável dos recursos hídricos da área estudada. Neste trabalho, sugere-se a técnica Drenagem Preventiva de Avanço (DPA), onde faz-se a extração da água por meio de poços de drenagem em regiões de maior concentração de baixos resistivos, associados ao maior volume de água em subsuperfície.

O método geofísico de eletrorresistividade com o uso da técnica de caminhamento elétrico e do arranjo geométrico polo dipolo mostrou-se eficaz para a caracterização em subsuperfície por meio de contrastes de resistividade elétrica do entorno de uma mina subterrânea.

Para a análise e otimização de ruídos das seções de resistividade elétrica o uso do filtro não linear foi satisfatório em dois testes realizados experimentalmente com bancos de dados dos pontos de medida de resistividade elétrica. O teste que foi mais conveniente e atendeu as expectativas tem como característica principal a aplicação da filtragem nos valores de resistividade aparente, conseqüentemente, a não exclusão de valores e sim a atenuação destes por meio da filtragem. Com o uso do *software* Res2Dinv fez-se a inversão dos valores filtrados e o erro RMS final teve um aumento de 10% quando comparado com seções apenas com o processo de inversão, mas estudos anteriores afirmam que a qualidade do resultado depende da variação do erro RMS entre as iterações no processo de inversão dos dados e do número de valores anômalos e magnitude nos mesmos.

Com o modelo tridimensional final das seções de resistividade conclui-se que o resultado foi eficaz para a suavização do ruído visível das seções, principalmente na porção superior das seções, reduzindo o efeito de pequenos dipolos tanto na geração de modelos 2D quanto com o uso de um interpolador na confecção de malhas em níveis de profundidade gerados separadamente.

O acréscimo da filtragem por meio do filtro não linear em processos de inversão de eletrorresistividade traz melhores resultados na qualidade visual das seções (atenuação de ruídos visíveis), mas como o objetivo do trabalho proposto é em grande escala, este experimento

não foi aplicado para todas as seções obtidas e não influencia no resultado final do estudo de caso. A geração do modelo final em uma porção da área estudada tem a finalidade de demonstrar que o uso de filtragem pode ser de grande valia em estudos com objetivos de pequena escala.

A elaboração deste trabalho visa contribuir para estudos posteriores em pesquisas de grande escala para a localização de zonas de recarga com o uso da geofísica aplicada. E também consiste em um experimento que pode ser utilizado em pesquisas de pequena escala no auxílio à obtenção de resultados com mais qualidade na etapa de processamento de dados geofísicos de eletrorresistividade.

REFERÊNCIAS

ALMANAQUE ABRIL. **Petróleo, o combustível do século XX**. Publicado em março de 2011.

ALMEIDA, F. F. M; HASUI, Y; BRITO NEVES, B.B; FUCK, R.R. Províncias Estruturais Brasileiras. In: VIII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE. **Anais...**, Paraná: SBG, p.363-391. 1977.

ALMEIDA, F. L; RIJO, L. Modelagens direta e inversa de dados mCSEM 3D. **Revista Brasileira de Geofísica**. v.29, n.2, p. 289-308. ISSN 0102-261X. 2011.

ALMEIDA, L. et al. **Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiás: Superintendência de Geologia e Mineração. 232 p. 2006.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição. Brasília. 2008.

BORTOLOZZO, A. C. **Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: Aplicações em hidrogeologia**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado. 2011.

BURGUER, W., BURGE, M.J. Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java. **Springer Science & Business Media**. ISBN 9781846289682. 2009.

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geoelétricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das águas subterrâneas**. São Paulo: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 2007.

BURGER, H. R; SHEEHAN, A. F; JONES, C. H. **Introduction to Applied Geophysics: exploring the shallow subsurface**. New York: W. W. Norton & Company, Inc, 1992. 554p.

CHRISTENSEN N. B.; DODDS K. Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods 1D inversion and resolution analysis of marine CSEM data. **Geophysics**, v.72, p. 27–38. 2007.

COGGON, J, H. A comparison of IP electrode arrays. **Geophysics**, v.38, n.4, p.737-761, 1973.

DENTITH, M; MUDGE, S. T. **Geophysics for the mineral exploration geocientist**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2014. 438p.

ELIS, R. V; BARROSO R. M. C; KIANG H. C. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do Sistema Aquífero Barreiras / Marituba em Maceió – AL. 2004. **Revista Brasileira de Geofísica**. Disponível em: < <http://www.scielo.br>> Acesso em: 10 Março. 2016.

FILHO, S. V. Estudos de águas subterrâneas com métodos elétricos na região do semi-árido de Patos – PB. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, V. 15 n. 2. 1997.

FUCK, R. A. A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins, In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 4., 1994, Brasília. **Anais ...** Brasília: SBG – Núcleo GO/DF, 1994. p. 184-187. 1994.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa**. São Paulo: Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, 2007. Programa de pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia (Tese de doutorado).

GEOSOFT, Inc. Oasis montaj How-To Guide. Publicado em: abril de 2014.

INMAN, J. R. Resistivity inversion with ridge regression. **Geophysics**. v. 40. p. 798-817. 1975.

JOST, H; CHEMALE Jr. F; FUCK, R. A; DUSSIN, R. A. Uv complex, the oldest orthogneisses of the Archean Paleoproterozoic terrane of central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 47, 201-212. 2013.

JOST, H; FUCK, R. A; DANTAS, E. L; RANCAN, C.C; REZENDE, D. B; SANTOS, E; PORTELA, J. F; MATTOS, L; CHIARINI, M. F. N; OLIVEIRA, R. C; SILVA, S. Geologia e Geocronologia do Complexo Uv, Bloco Arqueano de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, 35 (4): 559-572. 2005.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.; An Introduction to Geophysical Explorations; Tradução Oficina de Textos: **Geofísica de Exploração**; COELHO, M.C.M, 2009.

KEATING, P.; PINET, N. Use of non-linear filtering for the regional–residual separation of potential field data. **Journal of Applied Geophysics**. v.73, p. 315-322. 2011.

KELLER, G. V. e FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press, 1966. 517p.

LIMA, O. A. L. de. **Propriedades fsicas das rochas**: Bases da Geofísica Aplicada. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica. 342p. 2014.

LIMA, O. A. L; SHARMA, M. M. A grain conductivity approach to shaly sandstones. **Geophysics**, 55(10), p.1347-1356, 1990.

LOKE, M. H. **2-D and 3-D ERT surveys and data interpretation**. Geotomo Software Pty Ltd. Italy: 10th. Piedmont Regional Order of Geologists Pasi Geophysics. 2015.

LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical Guide to 2-D and 3-D surveys. 2000.

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid last-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**. 1996a.

LOPES, P. D. **Água no séc. XXI: desafios e oportunidades**. Periódico do CIEDA e do CIEJD, em parceria com GPE, RCE e o CEIS20. ISSN 1647-6336. 2009.

LOPES, O. E. **Métodos de eletrorresistividade e polarização induzida aplicados a prospecção de ouro em sedimento aluvionar no Riacho Incó, Barrocas – Bahia**. Bahia: Universidade Federal da Bahia. 2013.

MENDELSON, K. S e COHEN, M. H. Effect of grain anisotropy on the electrical properties of sedimentary rocks. **Geophysics**, 47 (2), 257-263, 1982.

MENT, A. Condições Hidrológicas do Brasil. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (coords). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2º Edição. Fortaleza: CPRM – LABHID – UFPE, 2000. p.323-340. 2000.

MINERAÇÃO CURRAL DE PEDRA. **Banco de dados cedidos pela equipe de geotecnia da mina Cascavel**. 2017.

NAUDY, H.; DREYER, T. Essai de filtrage non-linéaire appliqué aux profils aéromagnétiques. **Geophysical Prospecting**. v.16, p. 171–178. 1968.

NAZARUDDIN, D. A; AMIRUZAN, Z. S; HUSSIN, H; JAFAR, M. T. M. Integrated geological and multi-electrode resistivity surveys for groundwater investigation in Kampung Rahmat village and its vicinity, Jeli district, Kelantan, Malaysia. **Journal of Applied Geophysics**. 138 (2017) 23-32. 2017.

OLIVA, A; GASTMANS, D; ZAMPROGNO, C. F; PAULA E SILVA, F; ROMUALDO, D. B; LOBO, G. A; LIMA, W. P; ROCHA, H. R; CHANG, H. K. Utilização do método da eletrorresistividade na caracterização hidrogeológica de área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de águas subterrâneas, 2006. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23193/15304>>. Acesso em: 27 Março. 2017.

OLIVEIRA, M. A. S. **Aplicabilidade do método geofísico de eletrorresistividade na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas na região de Conceição do Coité – BA.** Salvador: Instituto de Geociências, Universidade da Federal da Bahia, 2011. Disponível em: < http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20111/murilo_oliveira_2011.pdf>. Acesso em: 27 Março. 2017.

ORELLANA, E. **Prospección Geoeletrica en corriente continua.** Editora Paraninfo 2ª edição. Madrid. 1972.

ORINOCO GOLD. **Banco de dados e mapas geológicos da porção norte do Greenstone Belt Faina, GO.** 2017.

PARKOMENKO, E. I. **Electrical Properties of Rocks.** New York: Plenum Press Inc, 1967.

PAZDIREK, O.; BLAHA, V. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. **Anais...** EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam. 1996.

RESENDE, M. G; JOST, H; OSBORNE, G. A; MOL, A. G. *Stratigraphy of the Goiás and Faina Greenstone Belts, Central Brazil: A new proposal.* **Revista Brasileira de Geociências.** 28 (1): 77-94, 1998.

RIEGER, P. H. **Electrochemistry.** New Jersey: Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, 1987.

ROBINSON, E. S; ÇORUH, C. **Basic Exploration Geophysics.** United States of America: John Wiley e Sons, Inc, 1988. 562p.

ROCHA, Q. S. M. **Inversão do traço sísmico: O método e sua aplicação em Amberjack, Golfo do México.** Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense. 2013.

RUBIO, R. F. **A gestão dos recursos hídricos e a mineração.** In: visão internacional. Agência Nacional de Águas. Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília: ANA, 2006. p. 19-49.

SEN, P. N; GOODE, P. A e SIBBIT, A. Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. **Jornal of applied Physics**, 63(10), p.4832-4840, 1988.

SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação. SIG – **Banco de dados do Estado de Goiás**. Disponível em: <<http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/171319>>. Acesso em: 20 Março. 2017.

TARANTOLA, A.; VALETTE, B. Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion. **Reviews of Geophysics and Space Physics**. v.20, n.2., p. 219–232. 1982.

TELFORD, W. M; GELDART, L. P; SHERIFF, R. E; KEYS, D. A. **Applied Geophysics**. 1ª Edição. New York: Cambridge University Press, 1976. 860p.

TELFORD, W. M; GELDART, L. P; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2ª Edição. New York: Editora Cambridge, 1990.

ZHDANOV M. S.; YOSHIOKA, K. **Tree-dimensional iterative inversion of the marine controlled-source electromagnetic data**. In: SEG/Houston 2005 Annual Meeting, p. 526–529. 2005.

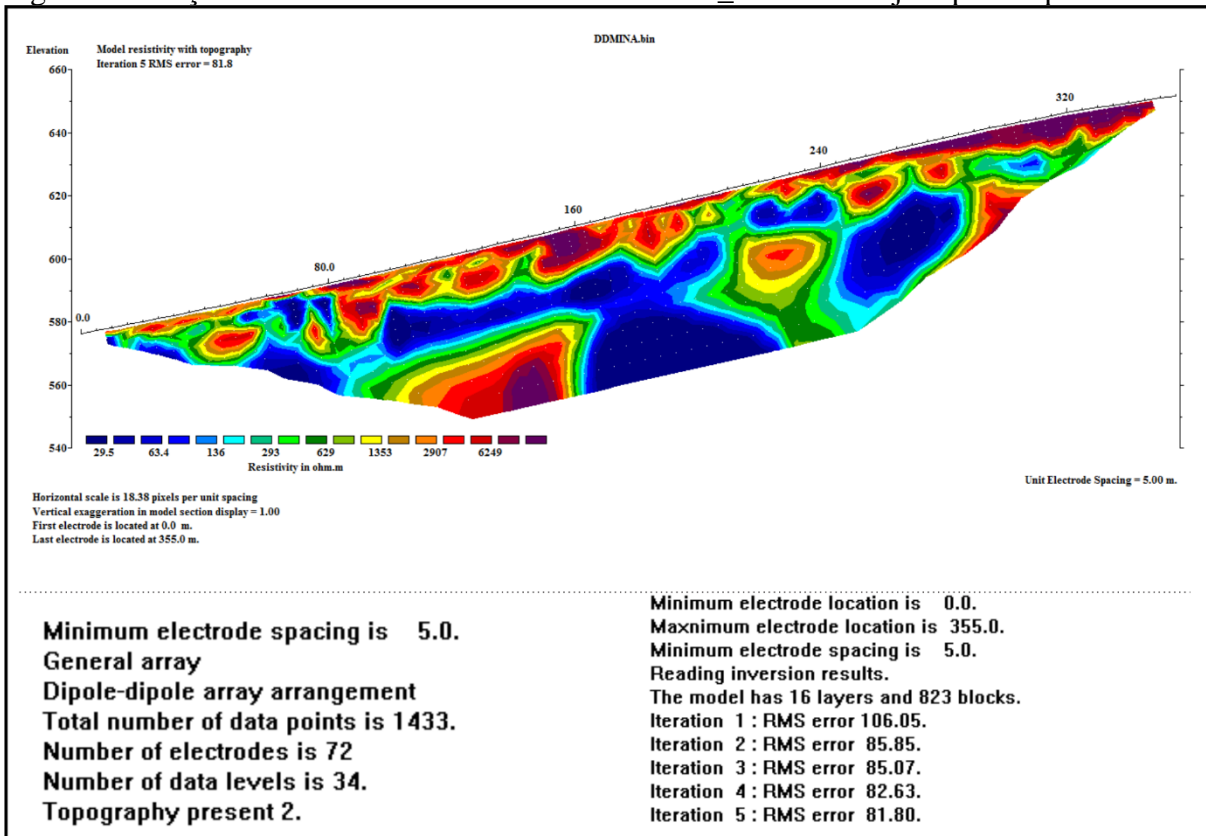
YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A. **Física III: eletromagnetismo** – 12ª Edição de Sears and Zemansky's University physics. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 2009. 423p.

WARD, S, H. Resistivity and induced polarization methods. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG). V.1: **Review and Tutorial**. 147-189p. 1990.

APÊNDICE I

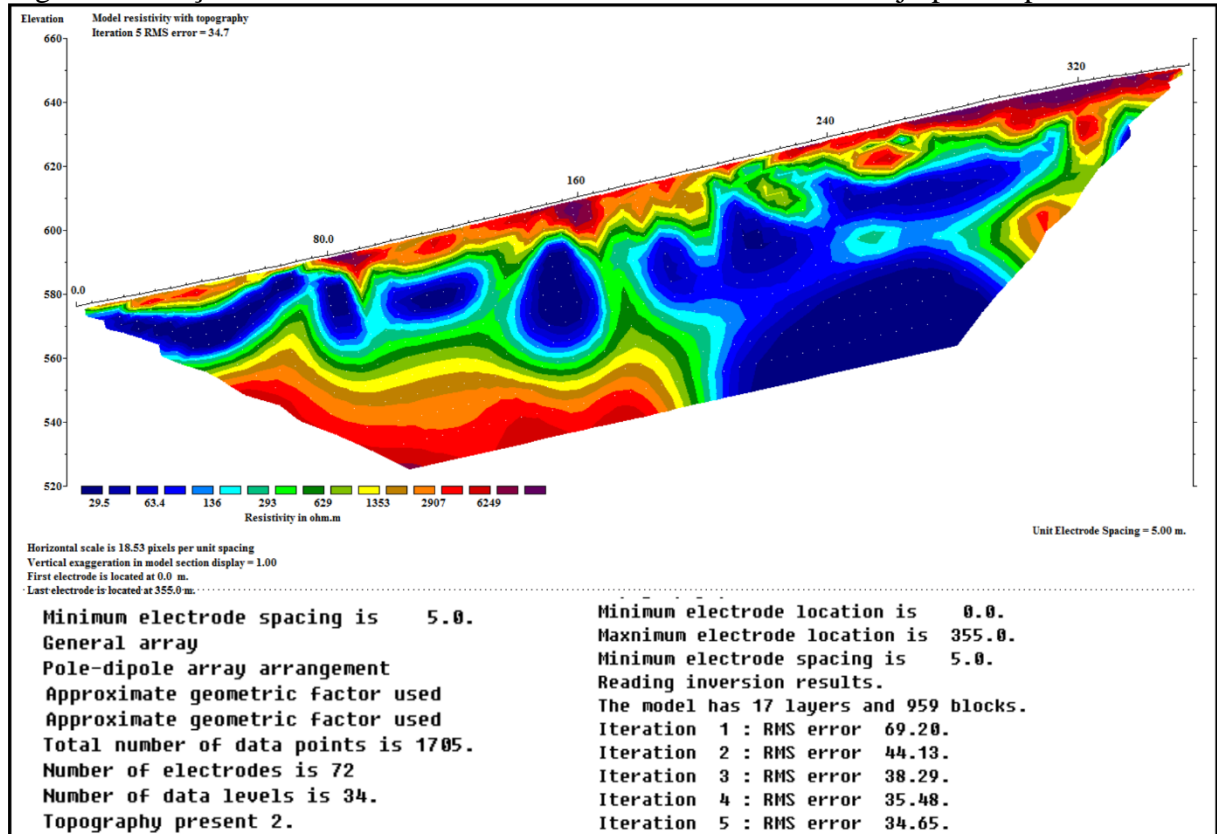
Seções de eletrorresistividade da linha teste (denominada de 120_A) do estudo de caso. Arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo, Wenner e Wenner-Schlumberger (*software Res2Dinv*).

Figura 44 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo dipolo-dipolo.



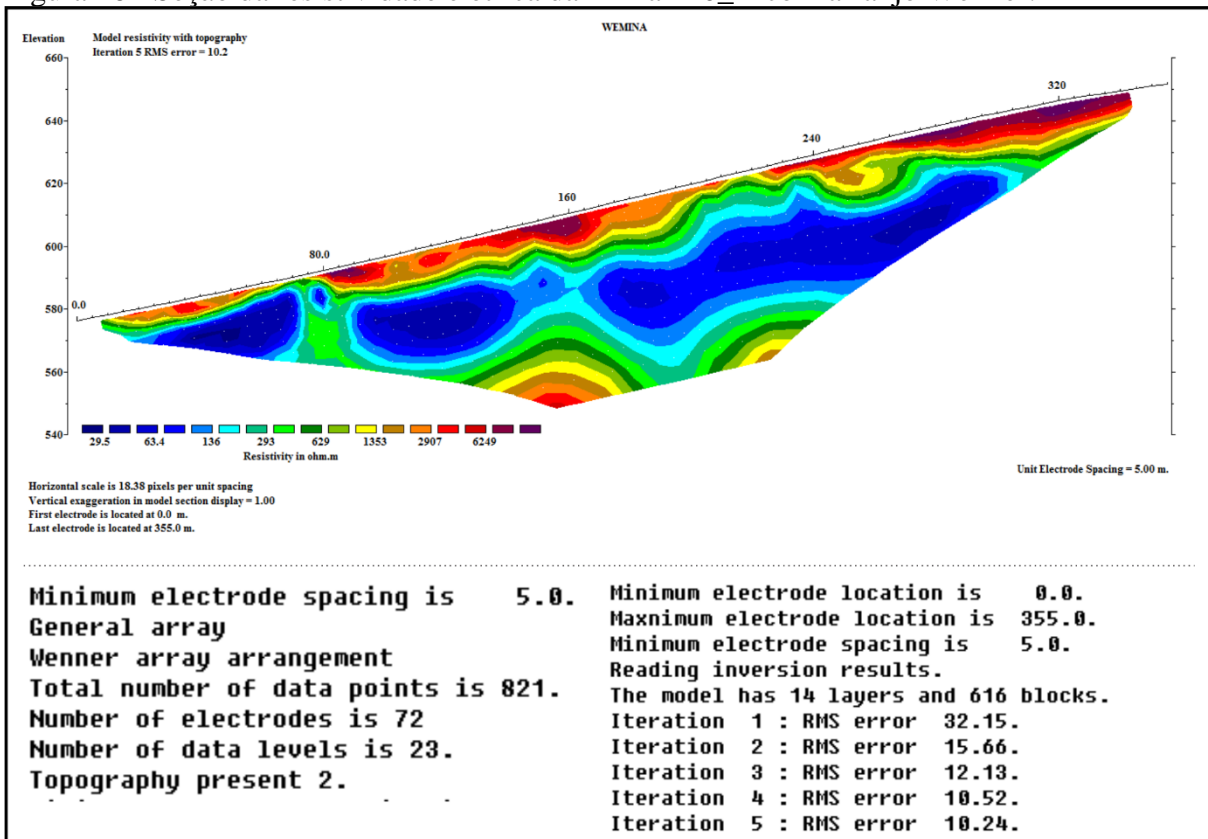
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 45 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo polo-dipolo.



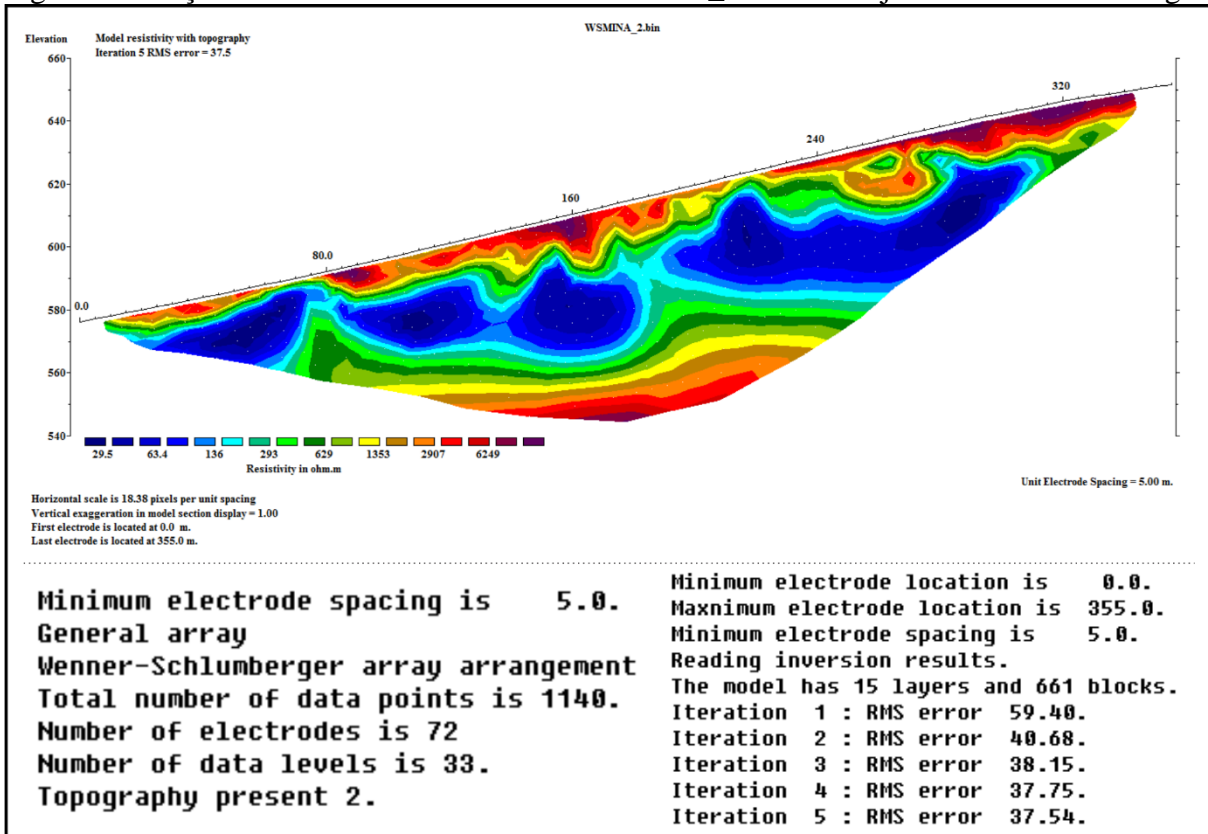
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 46 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo Wenner.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 47 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A com arranjo Wenner-Schlumberger.

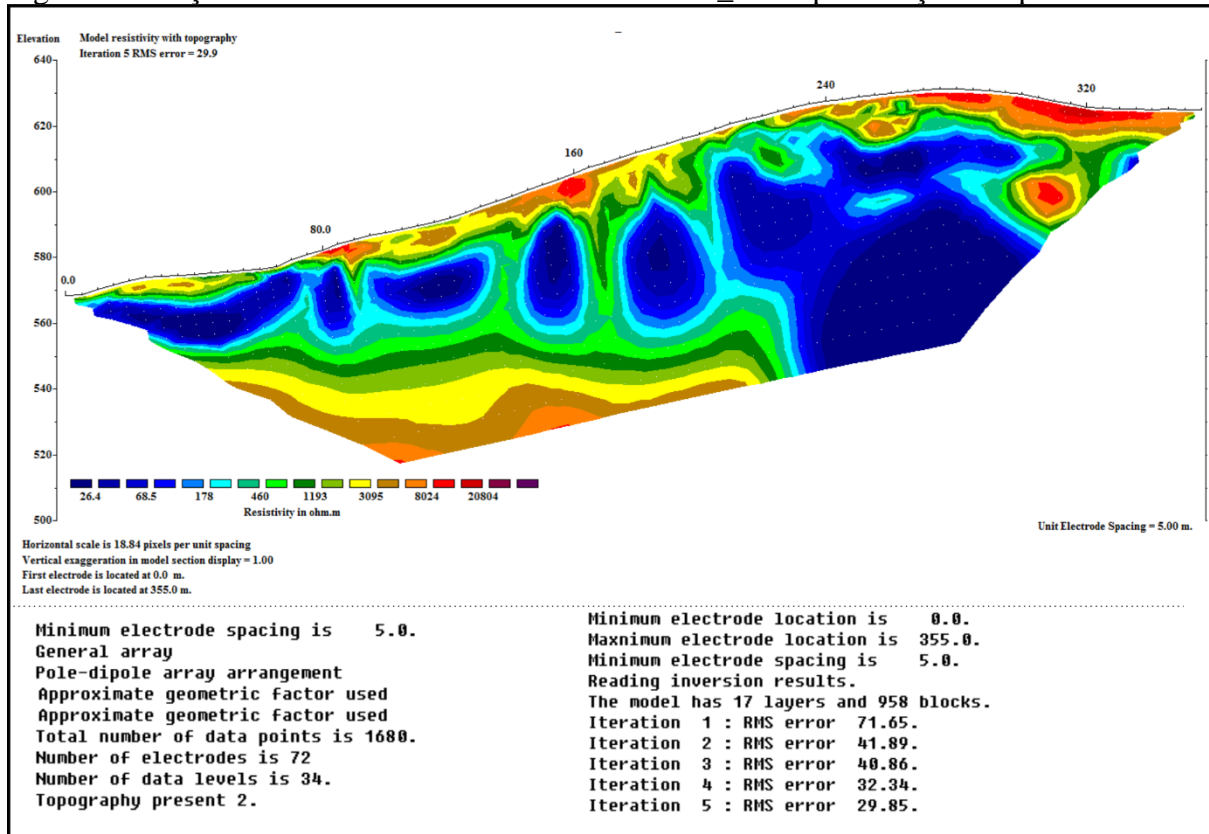


Fonte: elaborado pela autora (2017).

APÊNDICE II

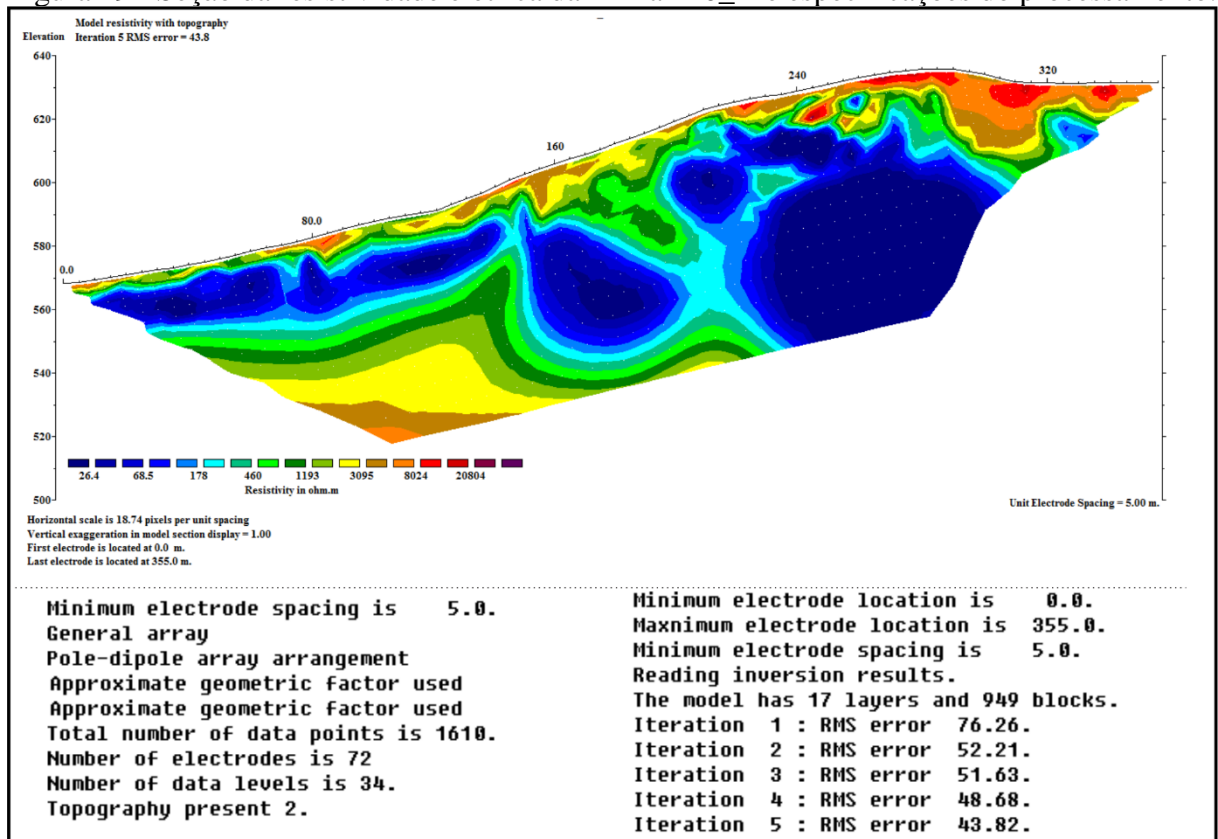
Seções de eletrorresistividade de 12 perfis realizados na campanha geofísica gerados a partir do *software* Res2Dinv.

Figura 48 - Seção da resistividade elétrica da Linha 120_A e especificações do processamento.



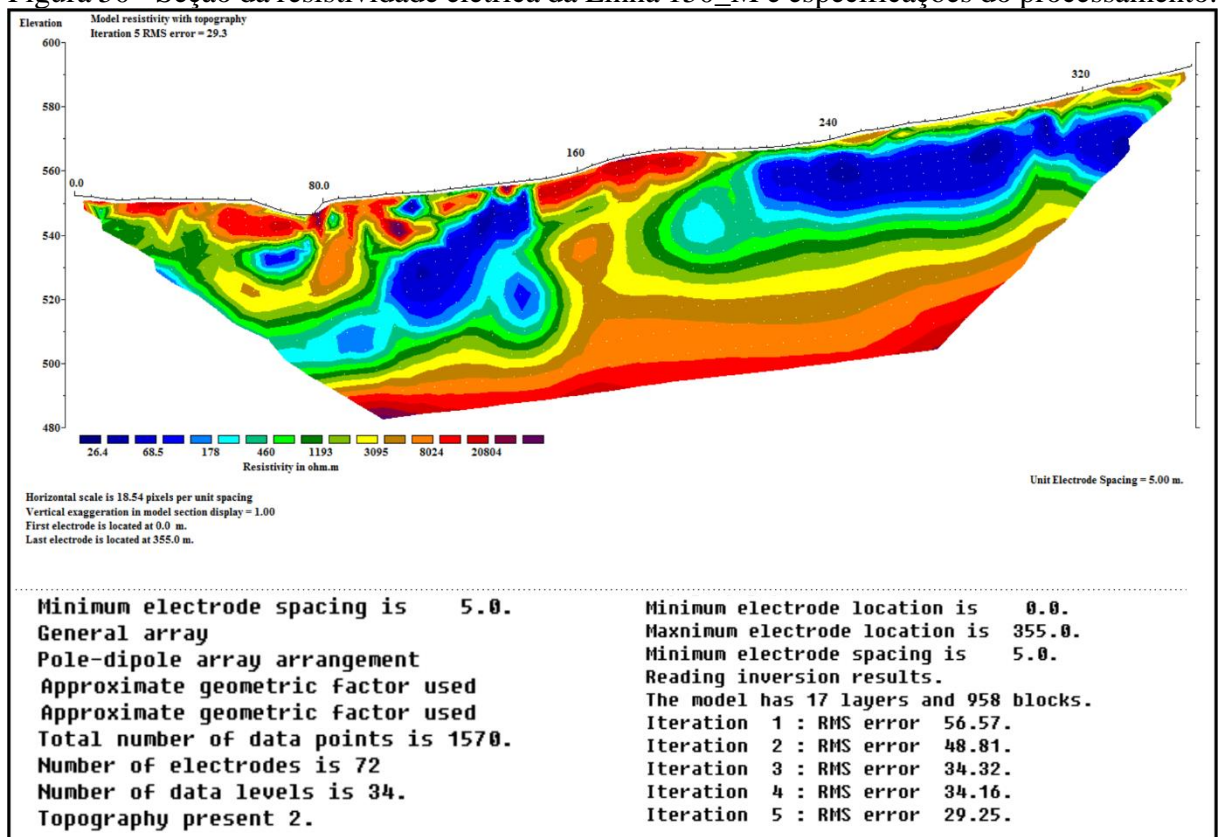
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 49 - Seção da resistividade elétrica da Linha 140_A e especificações do processamento.



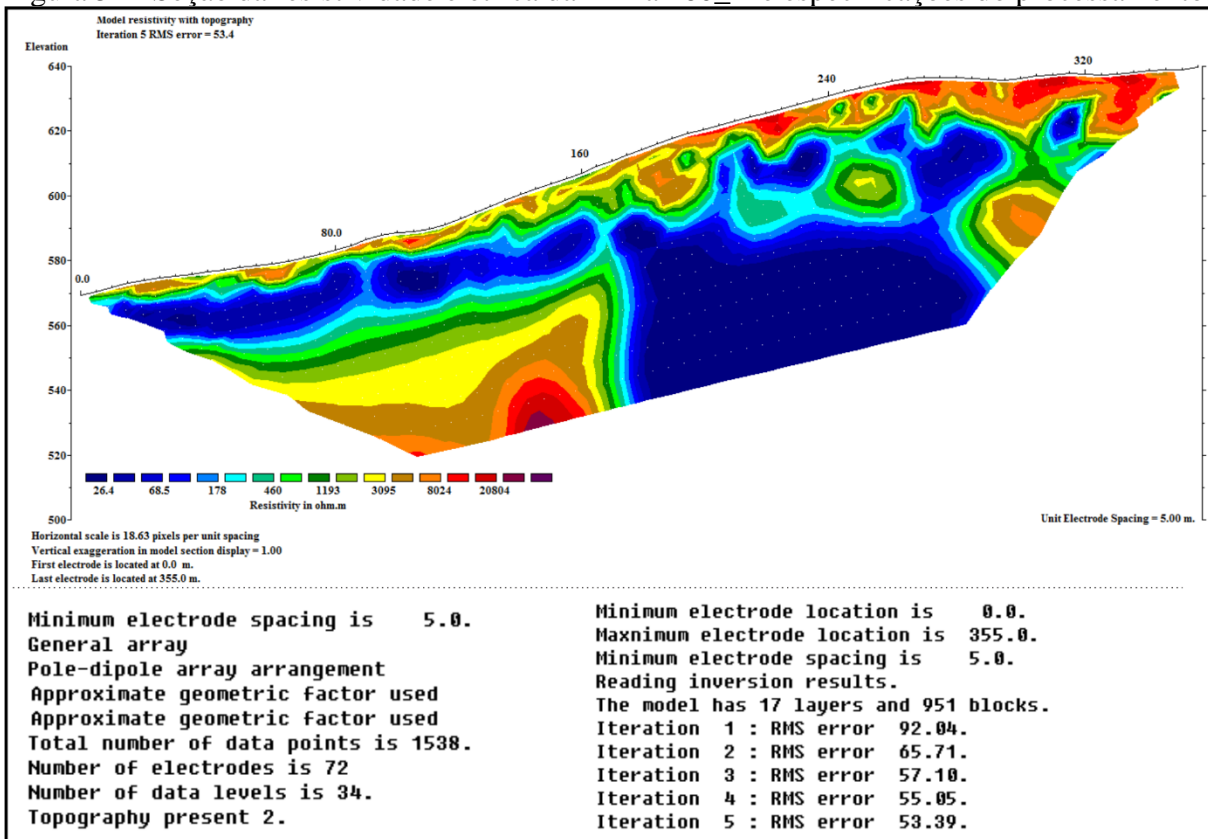
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 50 - Seção da resistividade elétrica da Linha 150_M e especificações do processamento.



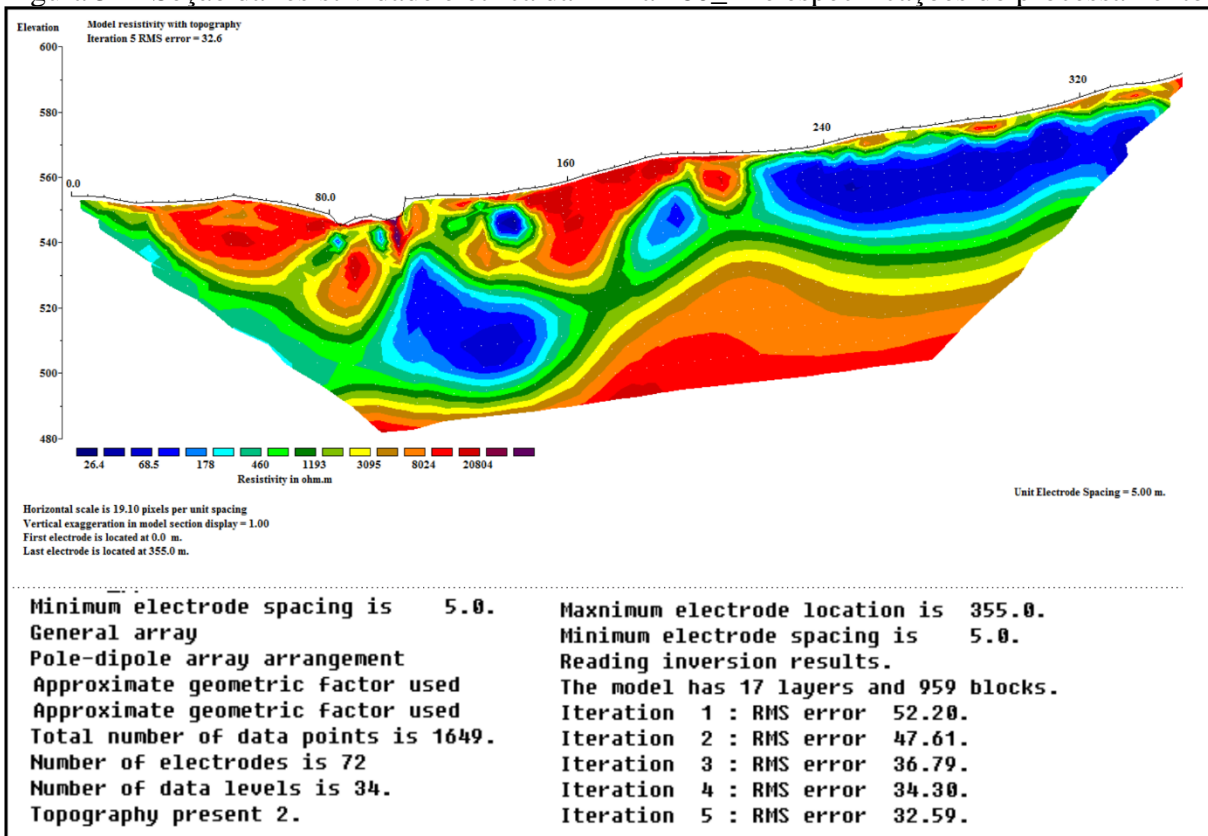
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 51 - Seção da resistividade elétrica da Linha 160_A e especificações do processamento.



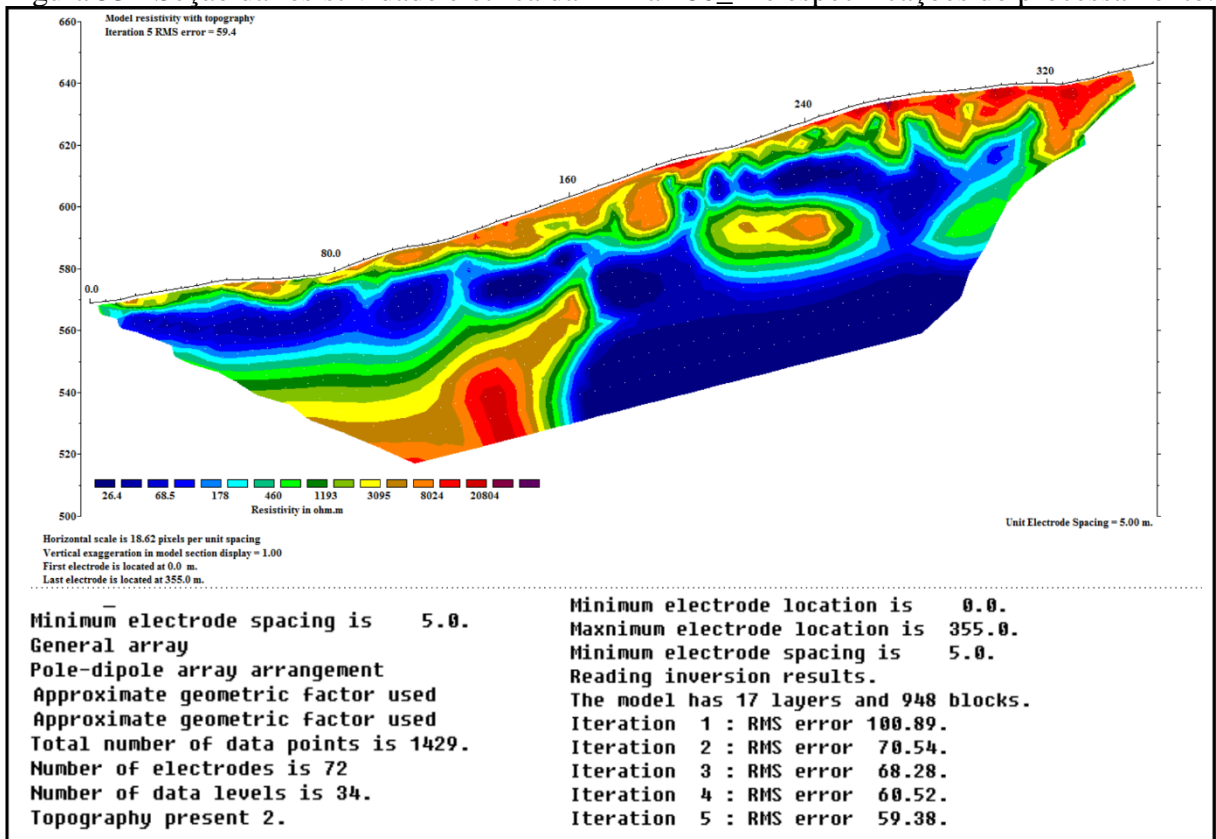
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 52 - Seção da resistividade elétrica da Linha 160_M e especificações do processamento.



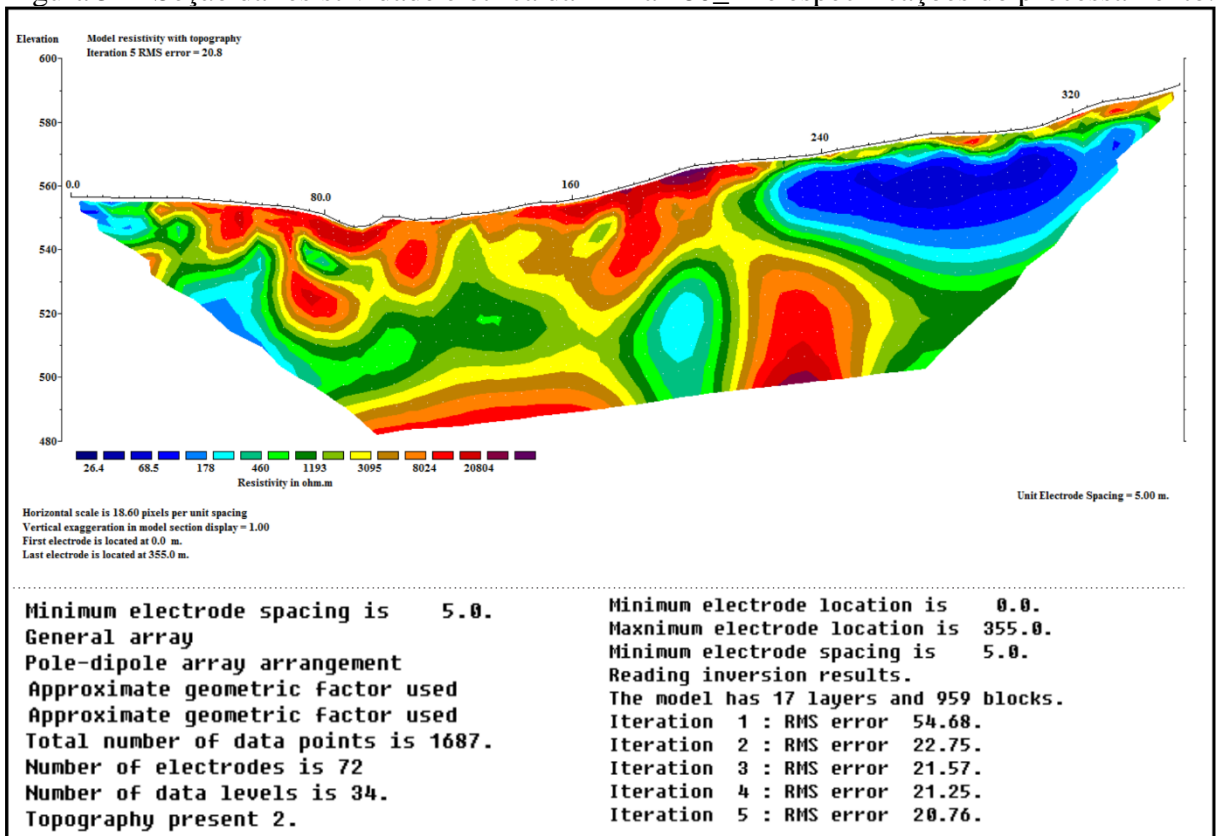
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 53 - Seção da resistividade elétrica da Linha 180_A e especificações do processamento.



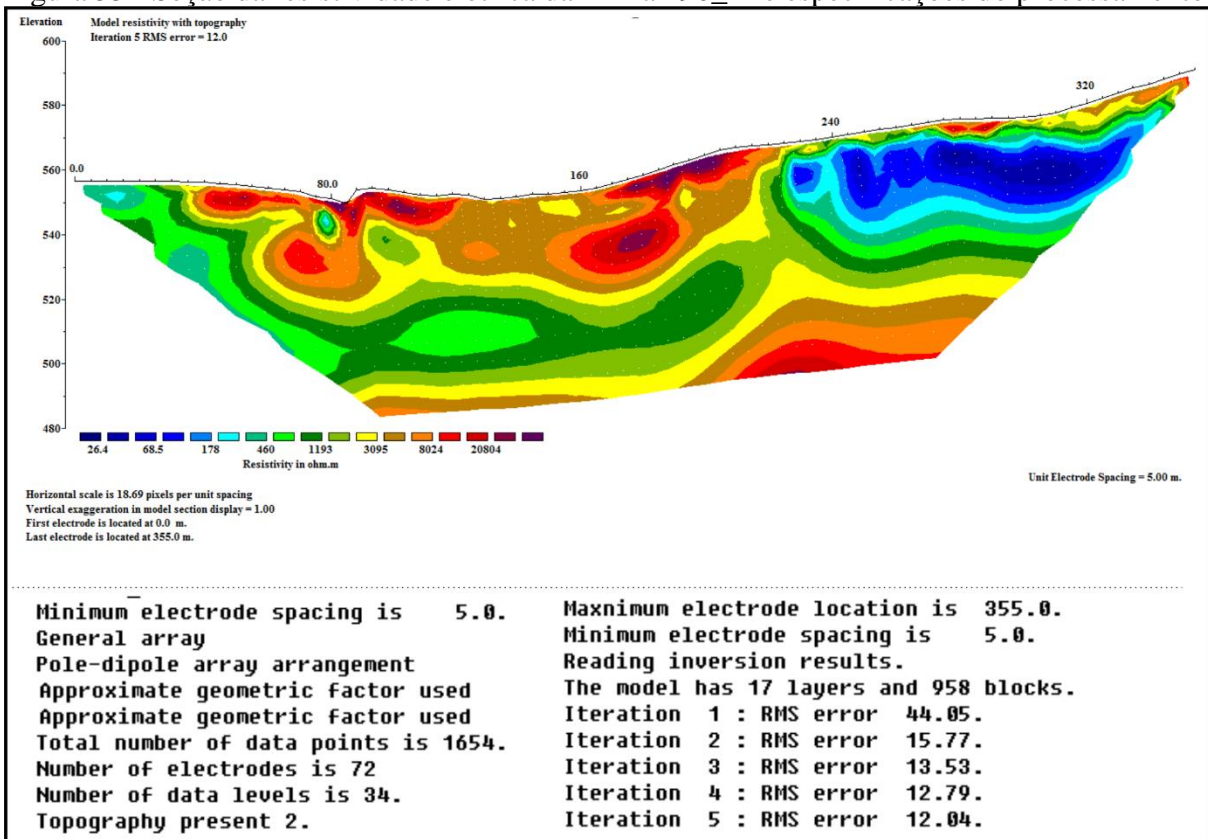
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 54 - Seção da resistividade elétrica da Linha 180_M e especificações do processamento.



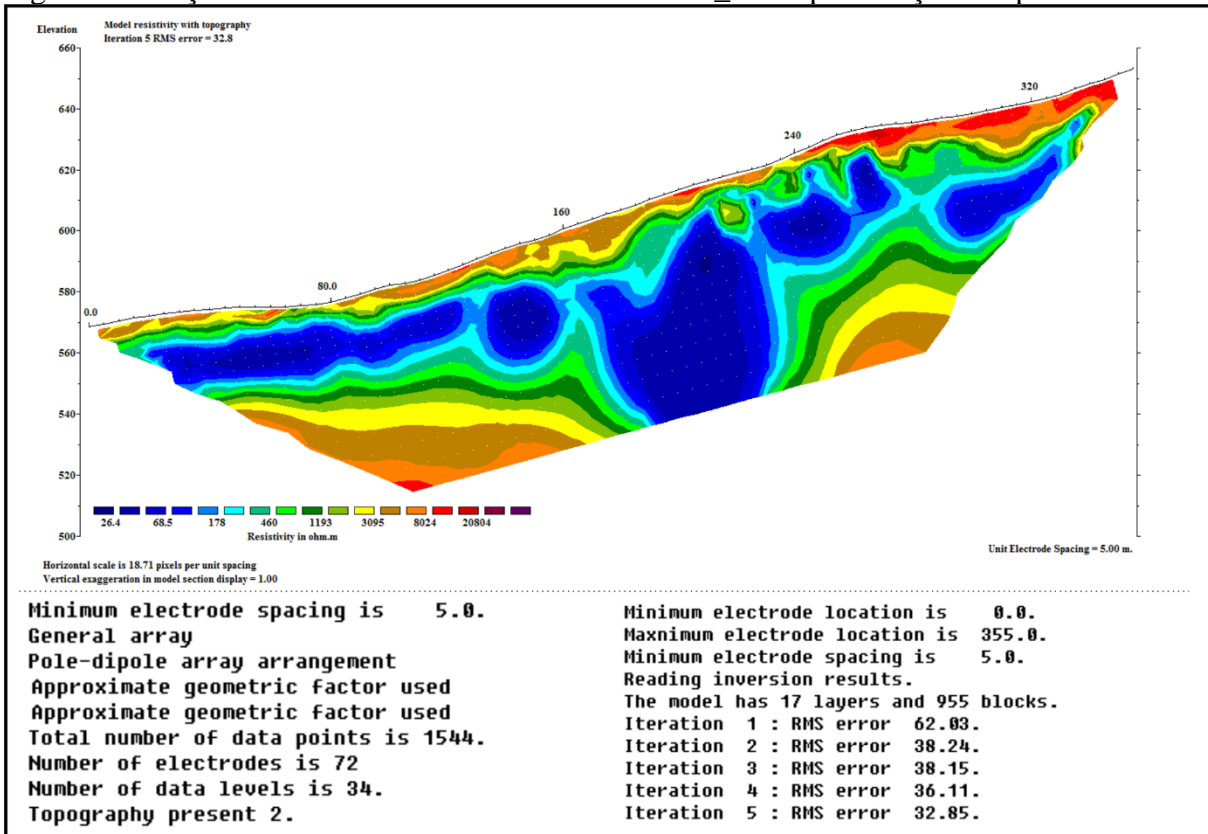
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 55 - Seção da resistividade elétrica da Linha 190_M e especificações do processamento.



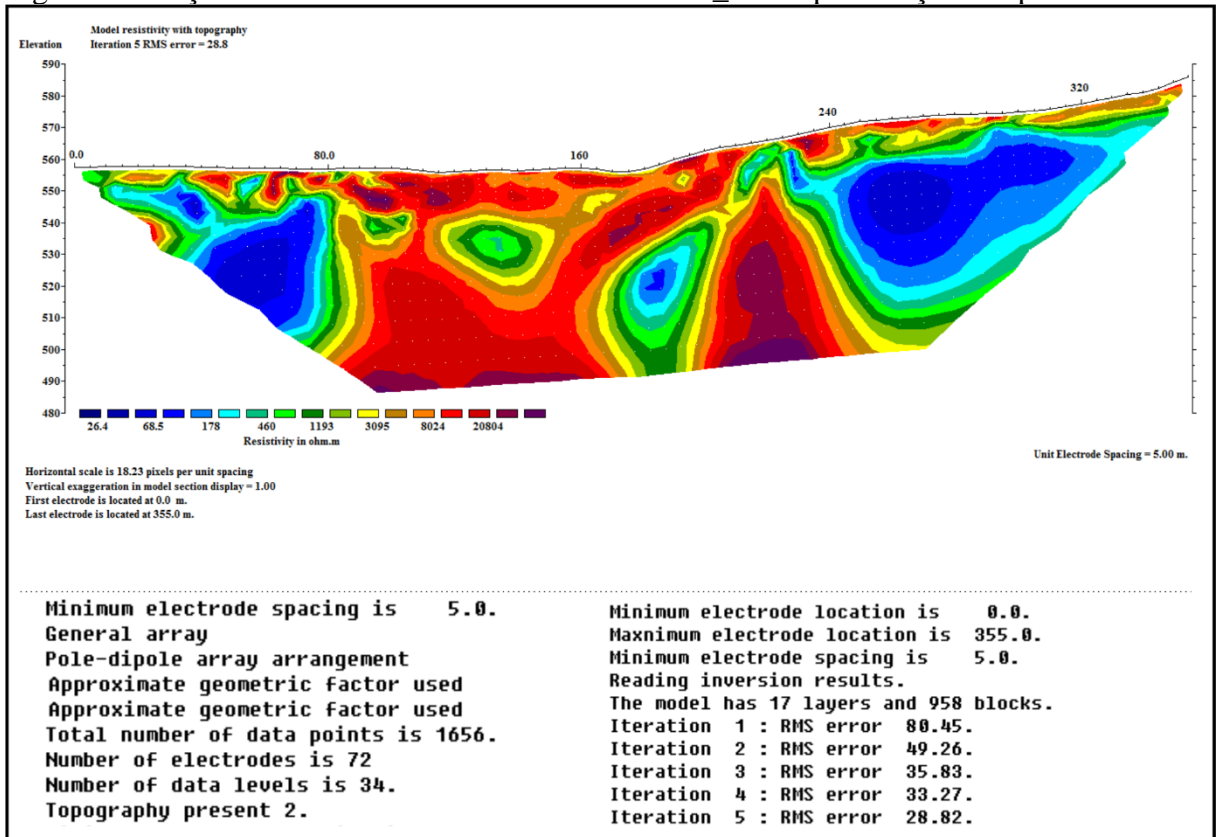
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 56 - Seção da resistividade elétrica da Linha 200_A e especificações do processamento.



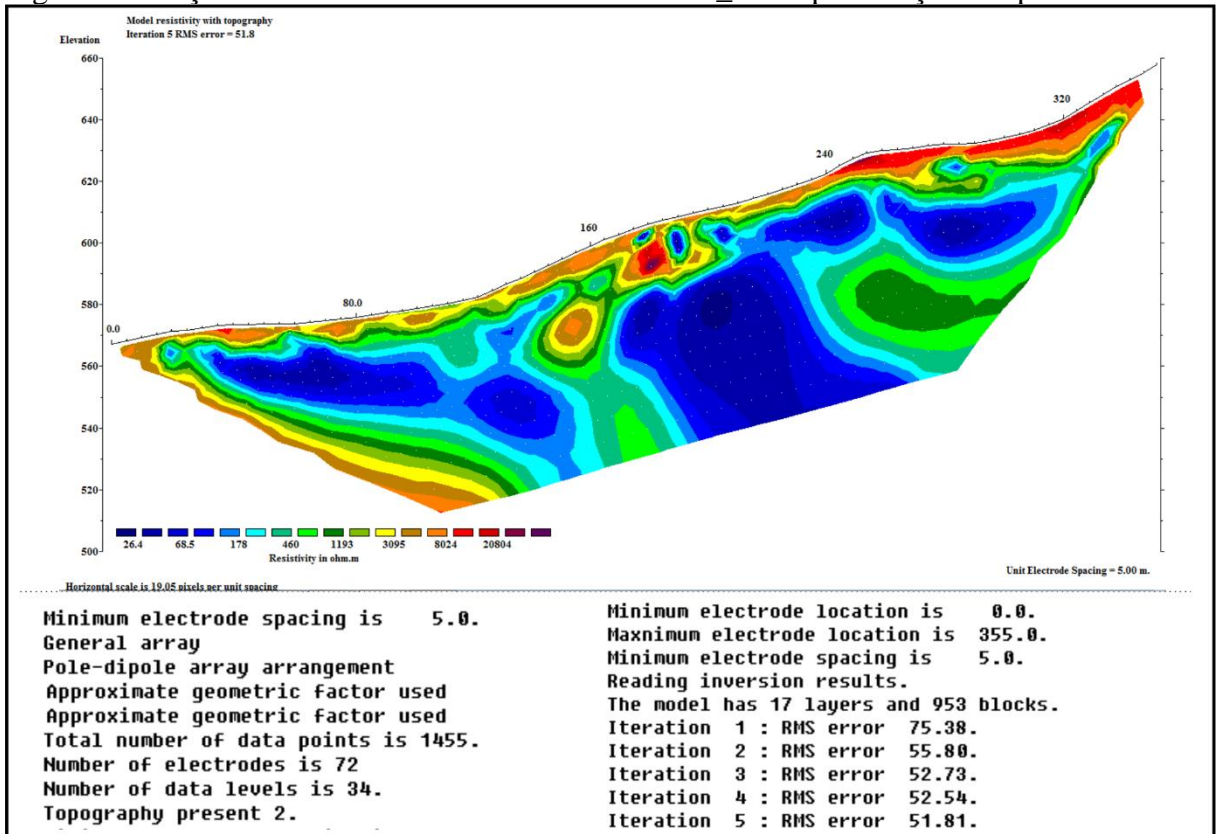
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 57 - Seção da resistividade elétrica da Linha 210_M e especificações do processamento.



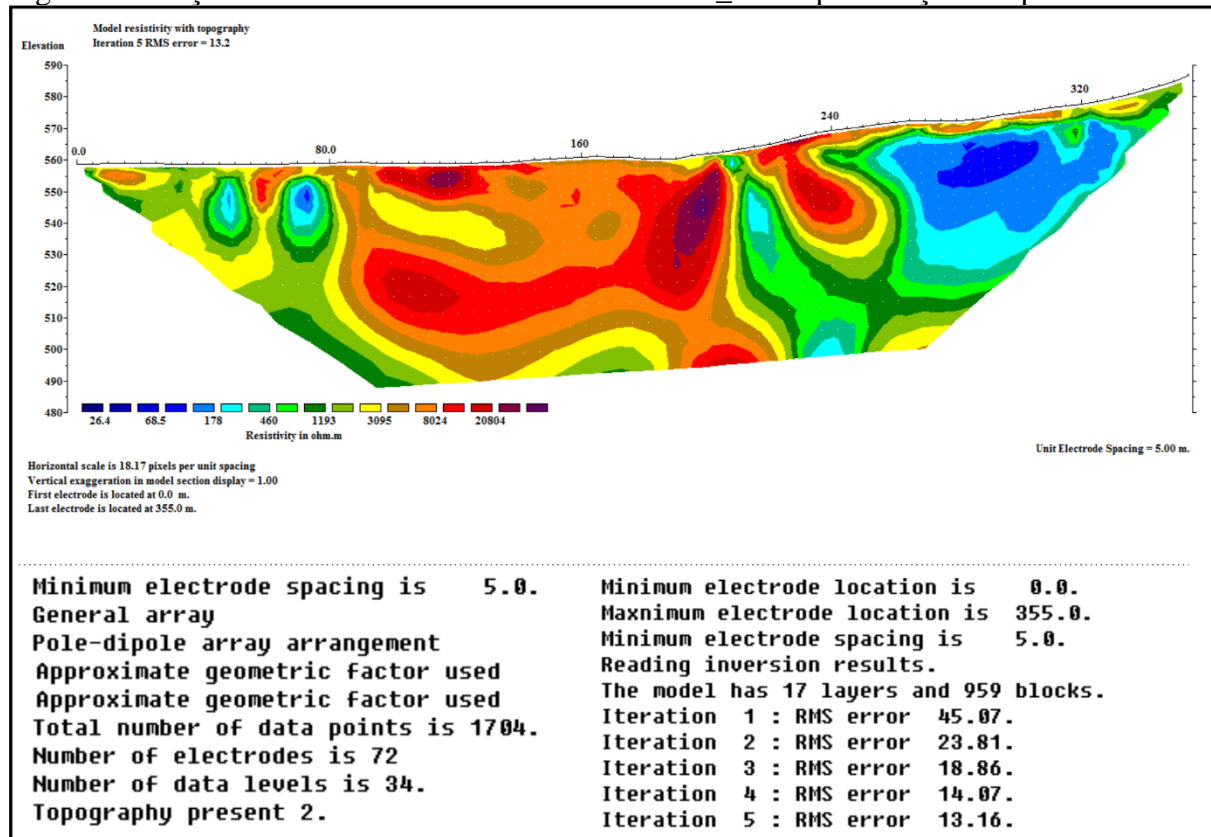
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 58 - Seção da resistividade elétrica da Linha 220_A e especificações do processamento.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 59 - Seção da resistividade elétrica da Linha 230_M e especificações do processamento.

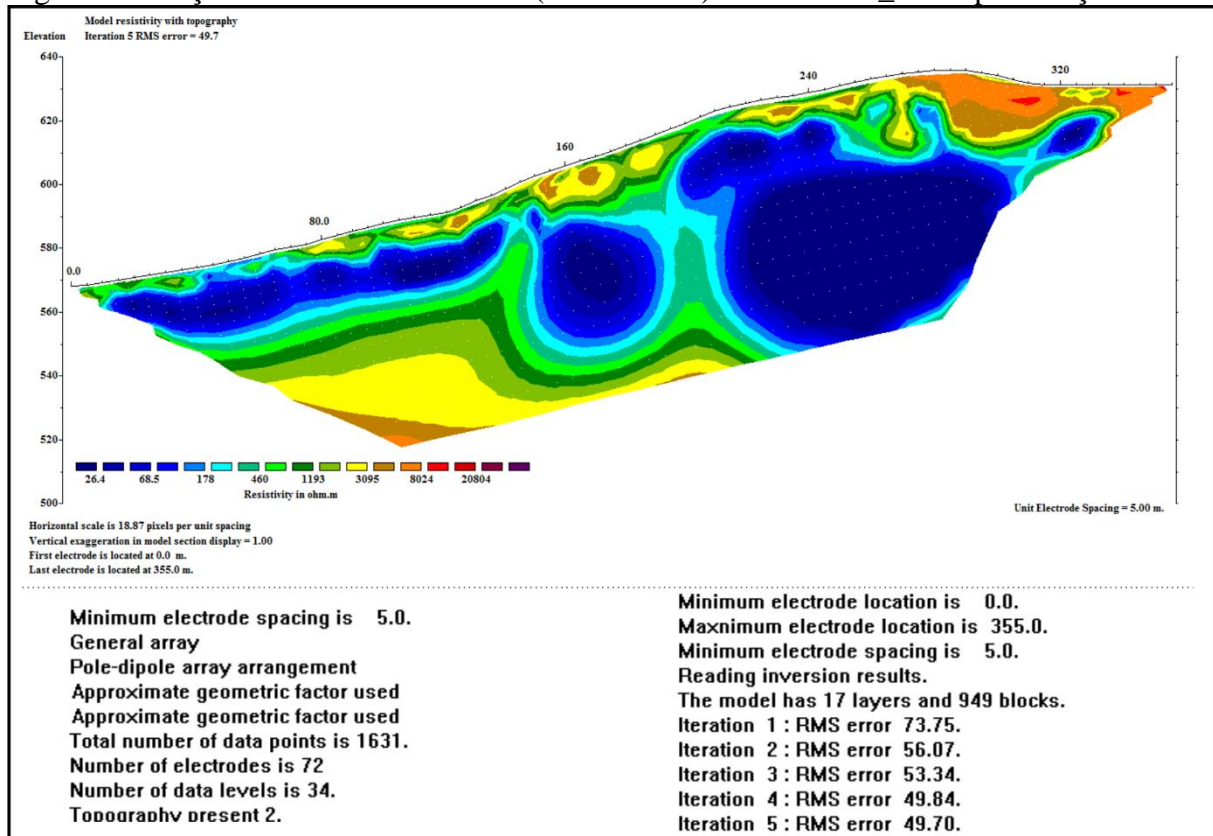


Fonte: elaborado pela autora (2017).

APÊNDICE III

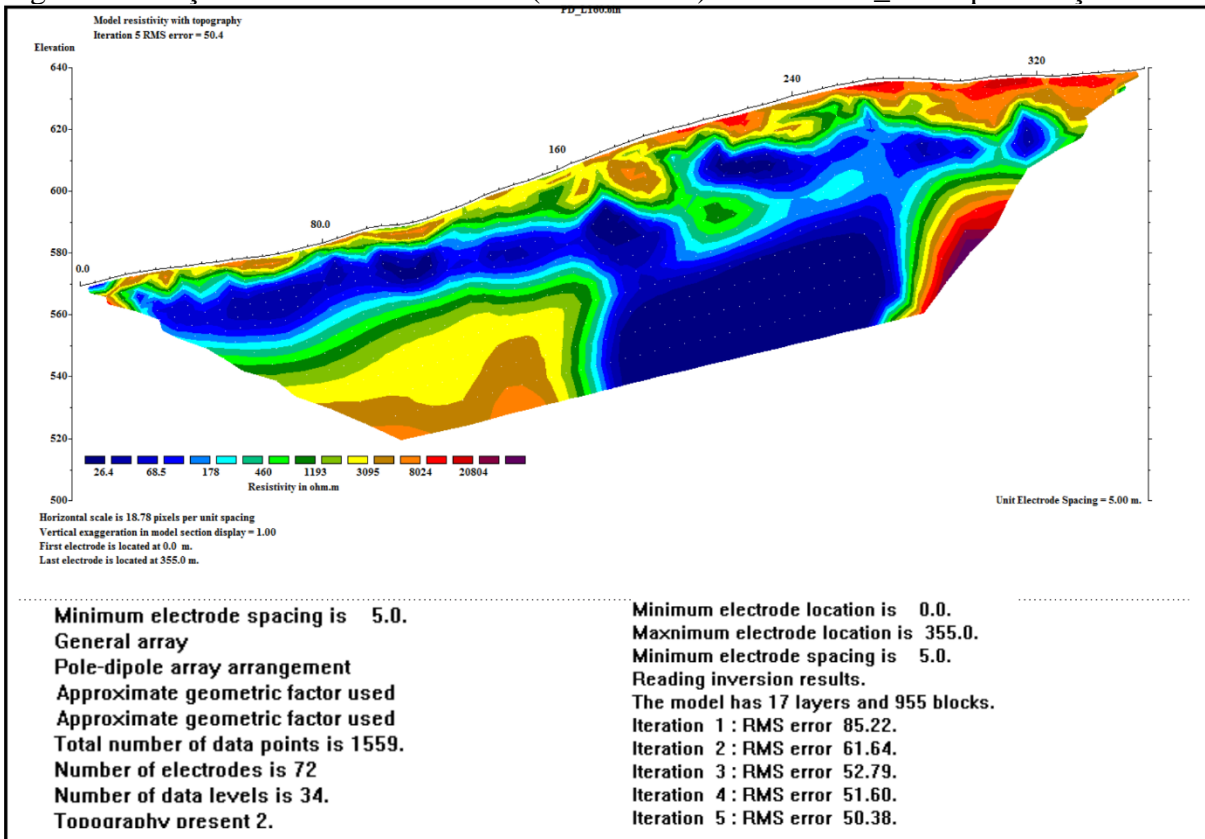
Seções de eletroresistividade do processamento das linhas 180_A, 160_A e 140_A com o uso da filtragem (Res2Dinv).

Figura 60 - Seção de eletroresistividade (uso do filtro) da linha 140_A e especificações.



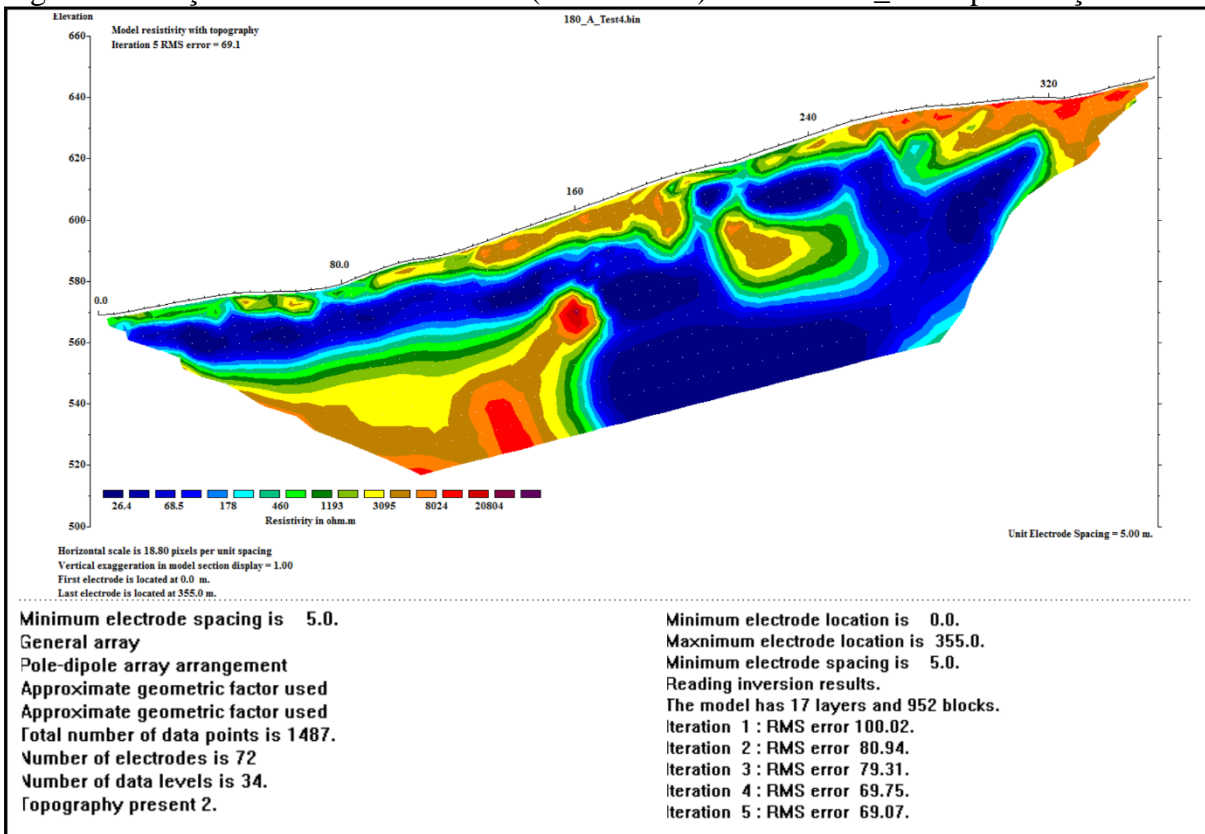
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 61 - Seção de eletroresistividade (uso do filtro) da linha 160_A e especificações.



Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 62 - Seção de eletroresistividade (uso do filtro) da linha 180_A e especificações.



Fonte: elaborado pela autora (2017).