



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE ELETRORRESISTIVA DE MATERIAIS LATERÍTICOS NO  
CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO, OURO PRETO - MG**

**Gabriel Galdino de Magalhães**

**MONOGRAFIA nº 386**

Ouro Preto, Fevereiro de 2021



**ANÁLISE ELETRORRESISTIVA DE MATERIAIS  
LATERÍTICOS NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO, OURO  
PRETO - MG**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Me. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 386**

## **ANÁLISE ELETRORRESISTIVA DE MATERIAIS LATERÍTICOS NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO, OURO PRETO - MG**

**Gabriel Galdino de Magalhães**

*Orientadora*

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Sílvia Carvalho Barbosa**

*Co-Orientador*

**Luis Artur Souza Oliveira**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/1.

**OURO PRETO**

**2021**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Gabriel Galdino de Magalhães

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M188a Magalhães, Gabriel Galdino de.  
Análise eletrorresistiva de materiais lateríticos no Campus Morro do  
Cruzeiro, Ouro Preto - MG. [manuscrito] / Gabriel Galdino de Magalhães. -  
2021.  
72 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.  
  
Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.  
Coorientador: Luis Artur Souza Oliveira.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .  
  
1. Geofísica. 2. Laterita. 3. Resistividade elétrica. I. Barbosa, Maria  
Sílvia Carvalho . II. Oliveira, Luis Artur Souza . III. Universidade Federal de  
Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.8

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>



## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

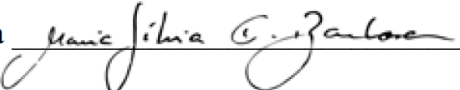
**TÍTULO: ANÁLISE ELETRORRESISTIVA DE MATERIAIS LATERÍTICOS  
NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO, OURO PRETO - MG**

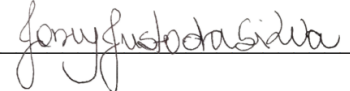
**AUTOR:** Gabriel Galdino de Magalhaes


**ORIENTADORA:** Maria Sílvia Carvalho Barbosa

**Aprovado em:** 22/01/2021

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Sílvia Carvalho Barbosa  DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Joney Justo da Silva  DEGEO/UFOP

Dr. Luciano Mozer de Assis  Vale S. A.

**Ouro Preto, 22/01/2021**



## Agradecimentos

---

Agradeço aos meus orientadores, Maria e Luis, pela paciência e pela constante motivação. Vocês são pessoas muito queridas! Peço desculpas pela forma como conduzi a pesquisa; diante das restrições do momento dediquei até onde foi praticável.

Sou grato à minha mãe, Valéria e minha irmã, Larissa, por me incentivarem sempre no caminho da ciência e me darem todo o suporte possível. Ao Juan pelas diversas discussões e apoio durante um período estratégico da graduação.

Um reconhecimento especial aos meus amigos “*separacionistas*” que fiz ao longo do curso Ariela, Brenda, Pâmela, Lunardi e Pedro, certamente minha maior conquista durante a graduação. Aos meus amigos Jefferson e Thainá pela parceria incondicional dos últimos anos e às minhas mentoras da geotecnia/geofísica, Amanda e Camilla!

Agradeço ao PET Engenharia Geológica pelas primeiras oportunidades de pesquisa e à Sociedade de Geofísica Aplicada pela experiência com essa ciência que amo tanto. Os projetos que desenvolvemos junto à comunidade de Ouro Preto certamente fizeram valer cada esforço empenhado.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS .....	4
1.5.1 Revisão bibliográfica .....	4
1.5.2 Campanhas de campo.....	5
1.5.3 Processamento dos dados geofísicos.....	5
1.5.4 Integração geológico-geofísica .....	5
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....</b>	<b>7</b>
2.1 CONTEXTO REGIONAL .....	7
2.2 LITOESTRATIGRAFIA.....	8
2.2.1 Embasamento e Supergrupo Rio das Velhas .....	9
2.2.2 Supergrupo Minas .....	10
2.2.3 Cobertura cenozoica.....	11
<b>3 LATERITAS.....</b>	<b>13</b>
3.1 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	13
3.2 INTEMPERISMO .....	14
3.3 HISTÓRICO SOBRE LATERITAS .....	15
3.3.1 Modelos por acumulação relativa .....	16
3.3.2 Modelos por acumulação absoluta.....	17
<b>4 GEOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>19</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	19
4.1.1 Fácies das lateritas aluminosas .....	20
4.1.2 Fácies das lateritas ferruginosas.....	21
<b>5 ELETORRESISTIVIDADE .....</b>	<b>25</b>
5.1 ASPECTOS GERAIS.....	26

5.1.1	Lei de Ohm e definição da resistividade .....	27
5.1.2	Técnica e Arranjo .....	29
5.2	INVERSÃO DE DADOS .....	34
5.2.1	Inversão Smoothness-Constrained .....	36
5.3	CONTROLE DE QUALIDADE .....	37
6	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS .....	39
6.1	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	39
6.2	LEVANTAMENTO ELETRORRESISTIVO .....	40
6.3	Análise exploratória de dados .....	42
6.3.1	Estatística descritiva .....	43
6.4	Inversão de dados.....	47
6.4.1	Escolha de parâmetros .....	48
6.4.2	Seções invertidas .....	52
6.5	Modelagem espacial dos dados.....	53
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	61
8	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> Localização da área de estudo.....	2
<b>Figura 2.1</b> – Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao Cráton do São Francisco. .	7
<b>Figura 2.2</b> - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. ....	8
<b>Figura 2.3</b> – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. ....	9
<b>Figura 4.1</b> – Modelo de disposição das fácies estruturais .....	20
<b>Figura 4.2</b> – Fácies maciça em laterita aluminosa. A: imagem de afloramento do ponto P3. B: imagem de amostra do local indicado em A.....	20
<b>Figura 4.3</b> – Exemplo característico da fácies canga e fragmentada na região de estudo.....	21
<b>Figura 4.4</b> –Mapa geológico modificado .....	23
<b>Figura 5.1</b> - Modelo esquemático do elemento infinitesimal de um fio condutor. ....	27
<b>Figura 5.2</b> – A. Três formas possíveis de disposição dos eletrodos de corrente e potencial; B. Forma teórica, bidimensional, de irradiação da corrente elétrica emitida.....	29
<b>Figura 5.3</b> – Seções sintéticas de eletrorresistividade. ....	31
<b>Figura 5.4</b> - Disposição esquemática dos eletrodos em arranjo do tipo dipolo-dipolo .....	32
<b>Figura 5.5</b> – Ilustração esquemática e simplificada da rotina de inversão comumente adotada pelos <i>softwares</i> de inversão. ....	36
<b>Figura 6.1</b> – A) Resistivímetro X5XTAL .....	39
<b>Figura 6.2</b> – A) <i>Multipoint</i> . ....	40
<b>Figura 6.3</b> – A) Cabo manga; B) Conectores. ....	40
<b>Figura 6.4</b> – Eletrodos de alumínio. ....	40
<b>Figura 6.5</b> – Alocação espacial das linhas levantamento geofísico .....	41
<b>Figura 6.6</b> – A) Medição da área com auxílio de trena para estaqueamento das posições dos eletrodos. B) Instalação dos eletrodos nos pontos demarcados com auxílio de marreta.....	42
<b>Figura 6.7</b> – Histograma com distribuição das resistividades para todo o banco de dados. ...	44
<b>Figura 6.8</b> – Gráfico <i>boxplot</i> para cada linha de levantamento geofísico. ....	45

<b>Figura 6.9</b> – Gráfico relacionando intensidade da resistividade elétrica medida com a profundidade de investigação.....	45
<b>Figura 6.10</b> – Integração 3D dos pontos amostrados no levantamento por eletrorresistividade. A imagem B pondera o tamanho do ponto pela intensidade da resistividade.....	46
<b>Figura 6.11</b> – Modelo de distribuição de blocos para inversão dos dados. ....	48
<b>Figura 6.12</b> – Seção invertida com valores baixos de <i>damping factor</i> – Linha 01.....	49
<b>Figura 6.13</b> – Seção invertida com valores altos de <i>damping factor</i> – Linha 01.....	49
<b>Figura 6.14</b> – Seção invertida por mínimos quadrados, 4 iterações – Linha 01.....	51
<b>Figura 6.15</b> – Seção invertida por método de inversão robusta, 4 iterações – Linha 01. ....	51
<b>Figura 6.16</b> – Linha 01 invertida.....	52
<b>Figura 6.17</b> – Linha 02 invertida.....	52
<b>Figura 6.18</b> – Linha 03 invertida.....	53
<b>Figura 6.19</b> – Linha 04 invertida.....	53
<b>Figura 6.20</b> – Pontos de resistividade plotados em ambiente 3D .....	54
<b>Figura 6.21</b> – Caixa definindo limites do modelo de interpolação dos dados. ....	54
<b>Figura 6.22</b> – Semi-variograma aplicado para os interpoladores. ....	55
<b>Figura 6.23</b> – Plano de referência para definição do <i>trend</i> de busca para norte .....	56
<b>Figura 6.24</b> – Interpolador de busca sem tendência.....	56
<b>Figura 6.25</b> – Interpolador de busca com tendência. ....	56
<b>Figura 6.26</b> – Cortes paralelos às linhas de levantamento. ....	57
<b>Figura 6.27</b> – Interpolação de resistividades pelo Oasis Montaj (Voxel).....	57
<b>Figura 6.28</b> – Agrupamento de níveis de resistividade.....	58
<b>Figura 6.29</b> – Zonas de baixa resistividade, até 100 Ohm.m.....	58
<b>Figura 6.30</b> – Primeira classe de zonas de resistividade intermediária.....	59
<b>Figura 6.31</b> – Segunda classe de zonas de resistividade intermediária.....	59
<b>Figura 6.32</b> – Zonas de alta resistividade.....	60



<b>Figura 7.1</b> – Integração do modelo geofísico com alocação dos pontos .....	61
<b>Figura 7.2</b> – Disposição espacial e em relação à geologia do modelo geofísico.....	62
<b>Figura 7.3</b> – Disposição espacial de baixas resistividades em relação ao contato geológico da literatura.....	63
<b>Figura 7.4</b> – Disposição espacial de altas resistividades em relação ao contato geológico da literatura.....	63
<b>Figura 7.5</b> – Disposição espacial de resistividades intermediárias em relação ao contato geológico da literatura. ....	64



## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 3.1</b> - Tabela relacionando as diferentes terminologias aplicadas para lateritas nas referências.....	16
<b>Tabela 5.1</b> - Sumário dos parâmetros de levantamento adotados.....	25
<b>Tabela 6.1</b> – Sumário de parâmetros de levantamento adotados.....	41
<b>Tabela 6.2</b> – Coordenadas dos limites das linhas realizadas .....	42
<b>Tabela 6.3</b> – Sumário de parâmetros, estatística descritiva, da amostra. ....	43
<b>Tabela 6.4</b> – Sumário de parâmetros para medidas de forma da amostra. ....	44
<b>Tabela 6.5</b> – Sumário de parâmetros por nível de investigação. ....	46
<b>Tabela 6.6</b> – Sumário de erros RMS por seção. ....	53



## Resumo

---

O interesse científico pelas lateritas remonta mais de 200 anos de registros na literatura, ainda que de forma incipiente. Em contrapartida, no Brasil a discussão ganhou grande atenção nas últimas décadas, essencialmente por conta da relação entre esses materiais e sua importância para a recarga de aquíferos do Quadrilátero Ferrífero, e num contexto geral do país, pelo interesse em cavidades em rochas ferruginosas. Mesmo diante dos avanços, ainda existem lacunas em relação aos processos hidrodinâmicos nesses materiais. Portanto, nesta pesquisa a geofísica se aplica como uma ciência complementar, com recursos para investigação não invasiva e espacial. O Morro do Cruzeiro, Ouro Preto (MG) que se destaca pela grande variedade de fácies lateríticas espacialmente justapostas, é assim um laboratório natural para desenvolvimento de uma análise e caracterização geofísica. Para o presente trabalho foram realizadas quatro seções pelo método da eletrorresistividade, desenvolveu-se a análise de dados, inversão e interpolação tridimensional. Posteriormente os dados foram integrados em um modelo geológico conceitual e simplificado, e, as variações de resistividade foram correlacionadas às fácies de lateritas mapeadas para a área de interesse. As conclusões levantadas destacam, especificamente para o contexto estudado, uma variação de propriedade física, resistividade elétrica, significativa entre os materiais aluminosos, de baixos valores, e ferruginosos, de altos valores.

**Palavras chave:** lateritas, eletrorresistividade, modelagem, geofísica.



### 1.1 APRESENTAÇÃO

Na porção centro-sul do estado de Minas Gerais está localizado o Quadrilátero Ferrífero, região historicamente explorada em função dos diversos recursos minerais disponíveis, entre eles o minério de ferro, ouro, manganês, além de bauxita e minerais gemológicos. Outro elemento geológico de destaque são as couraças aluminosas e ferruginosas que ocorrem como produto de alteração de diversos litotipos (Augustin *et al.* 2013).

Diante desse cenário, cabe salientar uma diversa gama de cenários onde a presença de materiais lateríticos tem significativa relevância. Na área da exploração mineral, Varajão (1988) indica no passado a ocorrência de 24 jazidas de bauxita no Quadrilátero Ferrífero; no âmbito da hidrogeologia tem-se discussões na literatura acerca do capeamento de importantes aquíferos (Mourão 2007, Beato *et al.* 2005, Coelho 2018) e eventualmente de sua contribuição para recarga dos mesmos. Ainda cabe destaque ao entendimento do comportamento hídrico nesses materiais para fins, tanto de caráter ambiental (Takahasi & Meirelles 2014), quanto em relação à espeleologia – no que tange à gênese (Simmons 1963, Calux 2013, Calux *et al.* 2019) e geotecnia de cavidades (Brandi 2018).

Complementar à ampla implicação do conhecimento acerca de lateritas para diversos contextos, enfatiza-se a complexidade genética e evolutiva desses materiais. Em um cenário mais amplo da literatura, Augustin *et al.* (2013) apresenta diferentes processos possíveis para o desenvolvimento de perfis lateríticos; Varajão (1988), por sua vez, indica no contexto do Quadrilátero Ferrífero associação geológica com dois contextos em particular, no primeiro tem-se a laterização de materiais transportados e a segunda de materiais que passaram por esse processo *in situ*.

Mesmo diante gama de implicações, ainda existem limitações para a compreensão em detalhe dos processos de transporte e infiltração da água, da distinção dos diferentes tipos de lateritas, das respostas física de suas variações composicionais e bem como dos ganhos e defasagens dos métodos comumente aplicados para investigação.

Perante o exposto, a presente pesquisa propõe aplicar o método da eletrorresistividade para análise de materiais lateríticos disponíveis no campus Morro do Cruzeiro, cidade de Ouro Preto (Minas Gerais). O local de estudo foi escolhido pela diversidade de tipos geológicos de lateritas, além da disponibilidade de estudos anteriores. Nesse sentido, cabe destacar que, ainda que diante de possibilidades de gêneses muito específicas dos materiais, espera-se contribuir com a metodologia para

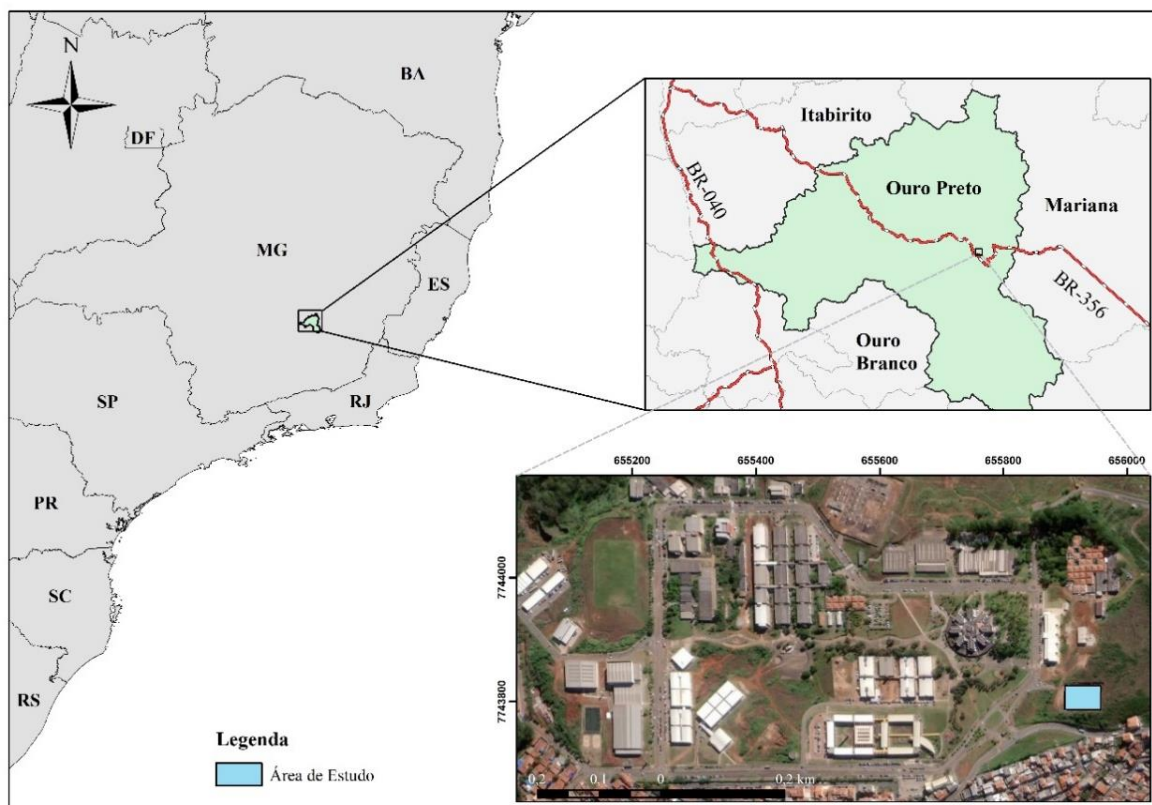
aplicação da ferramenta em diversos contextos geológicos, como os associados à Formação Cauê, que hospeda o minério de ferro explorado no Quadrilátero Ferrífero.

Apresenta-se um modelo base construído a partir dos levantamentos conduzidos, avaliando-se a possibilidade de extrapolação dos resultados obtidos e da metodologia aplicada para outros contextos semelhantes. Os dados levantados ainda têm por finalidade subsidiar estudos comparativos em abordagens de cunho científico semelhantes ou correlatos.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

O local de interesse do estudo compreende uma área de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, parte do campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, localizada na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais (Figura 1.1).

A cidade de Ouro Preto encontra-se a aproximadamente 80 km da capital do estado, Belo Horizonte. Partindo da cidade de Belo Horizonte, o principal acesso à área de estudo se dá por meio da BR-356, também referida como Rodovia dos Inconfidentes. Dentro do território da cidade de Ouro Preto a área de estudo encontra-se mais especificamente no bairro Bauxita, região do Morro do Cruzeiro (Figura 1.1).



**Figura 1.1** Localização da área de estudo (Fonte: *shapefile* de rodovias do DNIT, [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br); limites territoriais do Brasil do IBGE, <https://mapas.ibge.gov.br>; imagem aérea *Basemap* ESRI, acessos em 11/04/2020).



### 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo da pesquisa consiste em desenvolver uma análise indireta de materiais lateríticos do Morro do Cruzeiro (Ouro Preto – MG) por meio das respectivas distribuições de propriedades físicas (elétricas).

Os objetivos secundários são de ordem metodológica e teórica. Primeiramente, o avanço na avaliação do uso da metodologia proposta, desde a aplicação propriamente dita da eletrorresistividade até aspectos específicos do controle de qualidade no processamento de dados, e aplicabilidade de ferramentas de modelagem geológica. Outro ponto consiste em verificar se as variações de respostas de resistividade elétrica, podem ser correlacionadas a variações composicionais (respostas para materiais aluminosos e ferruginosos) e/ou estruturais do material geológico investigado (canga maciça, estruturada, entre outros).

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Métodos elétricos em geofísica, de forma geral, possuem grande aplicabilidade para estudos de contextos onde parâmetros hídricos são relevantes (Moreira *et al.* 2016, Castello *et al.* 2011, Braga 2016, Morais & Bacellar 2010). Os processos de gênese das lateritas estão em muitos casos relacionados à ação da água, devida à variação de nível freático por capilaridade ou mesmo pela ação de águas meteóricas (Augustin *et al.* 2012), o que ressalta o interesse de associação da metodologia ao contexto.

Para além do interesse acadêmico, a abordagem aplicada do conteúdo aborda questões como os diversos contextos da hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero, onde existe uma correlação espacial (e eventualmente genética) entre os materiais lateríticos e a Formação Cauê – principal aquífero da região (Mourão 2007, IBRAM 2004 apud Souza 2018) e utilizado para abastecimento de áreas densamente ocupadas.

No que se refere ao lócus do estudo, o Morro do Cruzeiro, destaca-se a atividade pretérita de exploração do minério de bauxita, dispondo também de estudos anteriores de caracterização dos materiais lateríticos. A área ainda possui como aspecto geológico favorável ao estudo a presença de diferentes tipos de lateritas (aluminosas e ferruginosas), além de variações estruturais ao longo dos perfis disponíveis na área. Sendo assim, pode-se destacar um interesse de cunho acadêmico no aprofundamento dos estudos da área.

Além do suporte no entendimento de materiais hidrodinamicamente heterogêneos e complexos, a eletrorresistividade apresenta-se como uma possível ferramenta de suporte à compreensão dos processos de infiltração para formação da grande quantidade de cavidades que se desenvolvem em canga (p.e. Rosière 2000). As cavidades, de forma geral, além de serem tratadas como patrimônio paisagístico

e natural, são condições geomorfológicas fundamentais ao desenvolvimento de ecossistemas (Takahasi & Meirelles 2014, Lemes 2018).

Em relação à aplicabilidade de levantamentos geofísicos em materiais lateríticos, cabe destaque a estudos já desenvolvidos que buscaram entender a transmissão e armazenamento de água em cangas, aplicando inclusive o recurso da eletorresistividade (Souza 2018). Outros trabalhos extrapolam os limites do Quadrilátero Ferrífero, mas também focados na aplicação de geofísica para o estudo de materiais lateríticos (Prodocimi 2019).

Com base no supracitado, ressalta-se a importância compreensão e análise dos materiais lateríticos em seus diversos cenários associados à disciplina de meio ambiente. É nesse mesmo contexto que a exaustão de conhecimento das ferramentas e recursos de investigação tende a promover melhorias no entendimento e consequente gestão das implicações. A eletorresistividade, por sua vez, constitui recurso não invasivo, passível de visualização tridimensional e capaz de orientar investigações diretas mais precisas e com maior exatidão.

## **1.5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os tópicos a seguir descrevem os instrumentos metodológicos e materiais utilizados na pesquisa trabalho de conclusão de curso.

### **1.5.1 Revisão bibliográfica**

A primeira etapa da pesquisa foi baseada na exaustão temática da literatura através da análise documental em periódicos, livros e manuais. Entre temáticas que serviram como fonte da revisão, destaca-se o processo de formação geológica das cangas e sua implicação ambiental, onde se recorreu como principal referência à revisão de Augustin *et al.* (2013). No que tange à geofísica, foram levantadas referências acerca das bases teóricas do método, como Orellana (1982), Kilty (1984), Telford *et al.* (1990), Kearey *et al.* (2009) e Bortolozo (2016); de aplicações do método e trabalhos de referência, como (Braga 2016); e para o processamento de dados em trabalhos como Sasaki (1992), Loke *et al.* (2002), Locke (2004), Hellman *et al.* (2016) e Gonçalves (2019). Ainda foi realizada a revisão dos recursos disponíveis dos *softwares* utilizados, entre eles RES2DINV 3.53 (Geotomo *Software*), Oasis Montaj 9.8 (Seequent), Leapfrog Geo 5.0 (Seequent), Python 3 (*Python Software Foundation*) e ArcGIS 10.5 (ESRI).

### **1.5.2 Campanhas de campo**

Foram feitas campanhas de campo para reconhecimento preliminar da área de estudo e análise macroscópica dos materiais. Na ocasião também se optou por definir áreas alvo com base na viabilidade de desenvolvimento dos levantamentos, atendendo a condições de topografia plana e espaço para desenvolvimento de uma malha regular. A segunda campanha consistiu no levantamento eletrorresistivo por caminamento elétrico.

### **1.5.3 Processamento dos dados geofísicos**

Após os levantamentos geofísicos procedeu-se com a análise estatística e considerações sobre filtragem de dados usando bibliotecas da linguagem de programação Python. Posteriormente a inversão e produção dos perfis de resistividade foi realizada utilizando o *software* RES2DINV. Ainda foram conduzidas interpolações e modelagem, respectivamente pelo Oasis Montaj 9.8 e Leapfrog Geo 5.0. O tópico "Eletrorresistividade" apresenta detalhadamente as técnicas citadas.

### **1.5.4 Integração geológico-geofísica**

A última fase da pesquisa integrou as informações levantadas durante o presente trabalho com outros conjuntos de informações disponíveis na literatura, essencialmente Assis (2018). Nessa fase recorreu-se a ferramentas de modelagem geológica para correlação das informações sobre a geologia com os dados geofísicos coletados e processados.



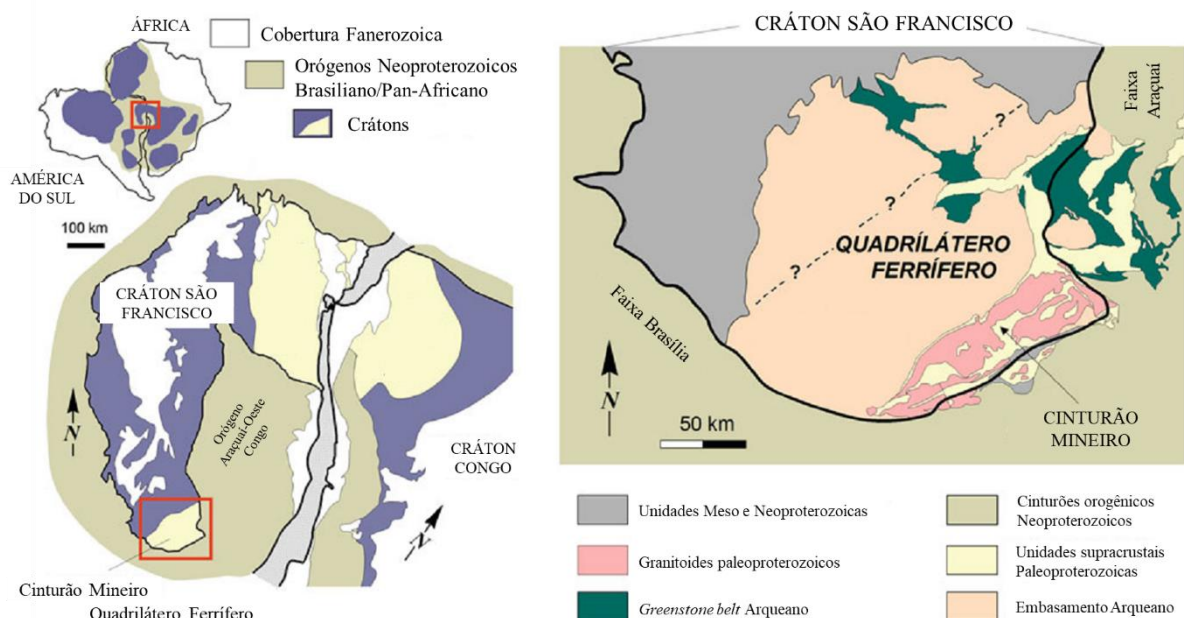
## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 2.1 CONTEXTO REGIONAL

No que tange ao contexto geológico regional, a região de estudo encontra-se inserida no Quadrilátero Ferrífero, mais especificamente em sua porção sudeste. O Quadrilátero Ferrífero é conhecido por conta dos grandes depósitos minerais associados, sendo ainda marcado por uma disposição geológica complexa, onde atuaram diferentes ciclos de deformação (Endo 1997).

Por conta da variedade de aspectos geológicos particulares e diversos tipos de recursos explorados ou presentes na área, o Quadrilátero Ferrífero consiste em uma área fortemente investigada em termos da geologia. Destaca-se desde as campanhas de mapeamento sistemático da área nos trabalhos de Dorr *et al.* em 1969, até publicações recentes (Endo *et al.* 2020) com o compilado de conhecimentos e pesquisas contemplando os avanços depois de 50 anos.

A Figura 2.1 ilustra o contexto macro da área de estudo do trabalho perante as delimitações do Quadrilátero Ferrífero e do Cráton do São Francisco, segundo o que é proposto por Heilbron *et al.* (2016).



**Figura 2.1** – Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao Cráton do São Francisco (adaptado de Heilbron *et al.* 2016).

## 2.2 LITOESTRATIGRAFIA

A geologia regional será abordada forma geral, passando pelas principais unidades associadas aos protominérios das lateritas, com destaque ainda para a Formação (Fm.) Cauê dada sua relevância no contexto estudado. A principal referência para caracterização da litoestratigrafia da área é Endo *et al.* (2020). A Figura 2.2, resume a estratigrafia e destaca a Fm. Cauê.

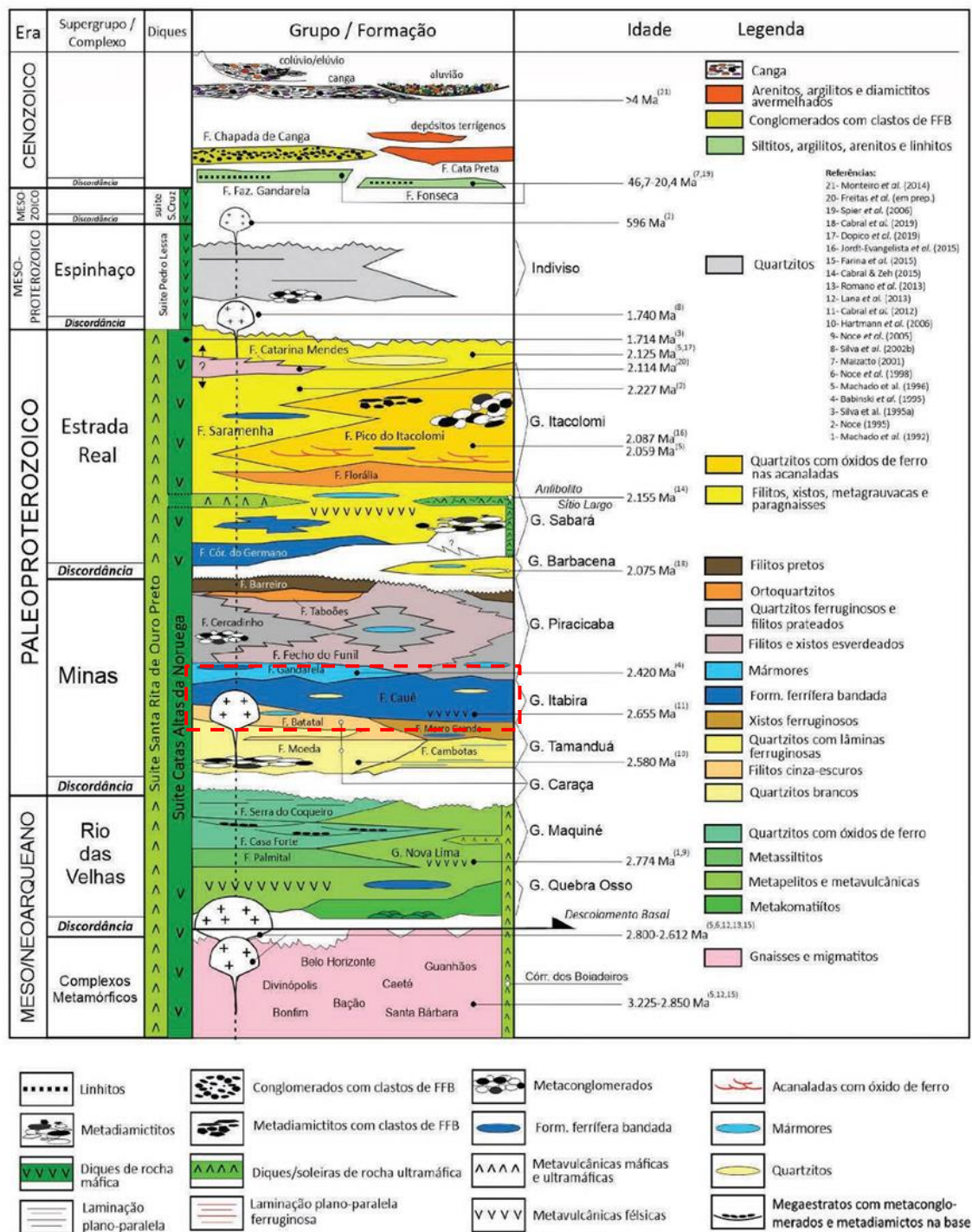
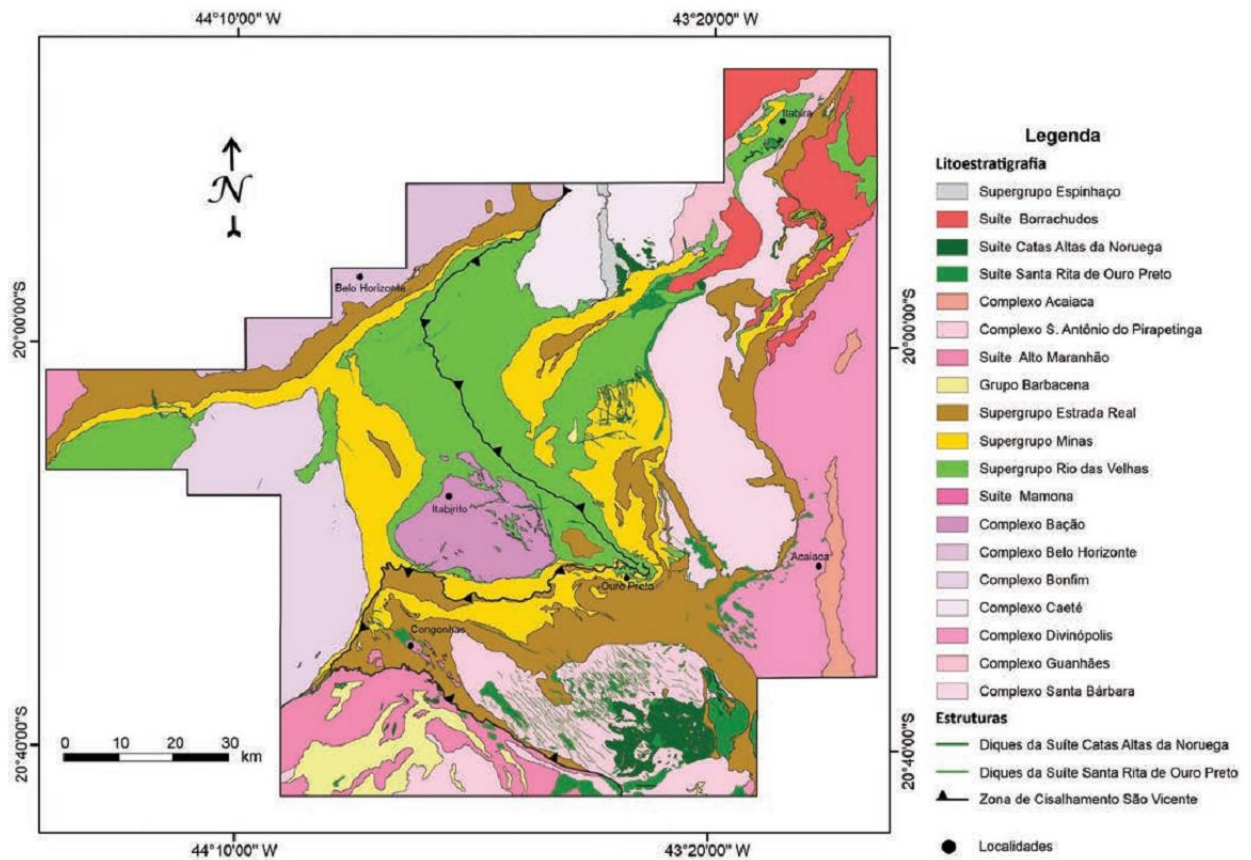


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, retirada de Endo *et al.* (2020).

A disposição espacial das principais unidades ainda pode ser verificada no mapa da Figura 2.3.



**Figura 2.3** – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2020).

### 2.2.1 Embasamento e Supergrupo Rio das Velhas

Na base da coluna estratigráfica está o embasamento cristalino, composto essencialmente por gnaisses e migmatitos do tipo TTG (de protólitos tonalito-trondhjemito-granodiorito). Esses complexos metamórficos encontram-se dispostos na forma de domos (e.g. Bação, Bonfim, Caeté e Belo Horizonte) (Alkmim & Marshak 1998).

Na sequência está o Supergrupo Rio das Velhas, composto por um conjunto de rochas metavulcanossedimentares, e subdividido nos Grupos Nova Lima e Maquiné. Essa unidade além de apresentar associações de rochas máficas e ultramáficas, é marcada por associação de fácies sedimentares clásticas e químicas (Baltazar *et al.* 2007).

Com base no compilado de estudos da área, especialmente os associados à geocronologia, é possível definir quatro eventos tectônico-magmáticos durante o Arqueano (Endo *et al.* 2020). Esses eventos são, do mais recente ao mais antigo, Santa Bárbara, Rio das Velhas I, Rio das Velhas II e Mamona.



## **2.2.2 Supergrupo Minas**

O Supergrupo Minas consiste em uma sequência essencialmente metassedimentar associada à ocorrência de um Ciclo de Wilson entre aproximadamente 2.5 e 2.0 Ga (Alkmim & Marshak 1998). De forma geral são rochas metamorfisadas em baixo grau, variando entre fácies xisto-verde inferior a fácies anfíbolito inferior (Alkmim & Martins-Neto 2012).

O Supergrupo Minas se distribui segundo uma descontinuidade em relação ao Supergrupo Rio das Velhas (Dorr *et al.* 1969), e é subdividido nas seguintes unidades estratigráficas:

### **2.2.2.1 Grupos Caraça e Tamanduá:**

As unidades de base do Supergrupo Minas são compostas essencialmente por conglomerados aluviais e arenitos, representados pelos Grupos Tamanduá e Caraça, respectivamente. Em termos da geodinâmica associada são interpretados como reflexo do processo de abertura da bacia Minas (Alkmim & Marshak 1998).

O Grupo Caraça por sua vez é disposto estratigraficamente acima das rochas vulcano-sedimentares que definem do Supergrupo Rio das Velhas, sendo que o contato ocorre segundo uma discordância. O Grupo Caraça ainda foi subdividido classicamente nas unidades, a Formação Moeda e a Batatal, sendo a segunda mais jovem (Endo 1997).

Com relação aos aspectos litológicos, a Formação Moeda é composta primordialmente por arenitos ricos em quartzo, os quais ocorrem ainda associados a conglomerados. Esses materiais de ambiente essencialmente aluviais gradam lateralmente para depósitos marinho, representados por dolomitos, *cherts* e pelitos (Heilbron *et al.* 2016).

O Grupo Tamanduá é definido pelo conjunto da Formação Cambotas, na porção inferior, e Formação Morro Grande, superior (Endo *et al.* 2020).

### **2.2.2.2 Grupo Itabira:**

Dorr *et al.* (1969) definem a separação entre os Grupos Caraça e Itabira pela variação de uma sedimentação essencialmente clástica para os primeiros depósitos de sedimentação química. Além disso, o estudo ressalta as Formações Cauê (inferior) e Gandarela (superior) como subdivisões desse Grupo. Endo (1997) ainda descreve o contato entre a Formação Cauê e Formação Batatal como gradual, variando de centímetros a metros.

As rochas da Formação Cauê consistem em formações ferríferas bandadas, metamorfisadas como Itabiritos. Esse material define bem um depósito do tipo Lago Superior (Heilbron *et al.* 2016). Destaca-se a Formação Cauê como o principal depósito de ferro explorado no contexto do Quadrilátero Ferrífero, estando o minério de alto teor condicionado pela concentração supergênica (Rosière 2000).



Enquanto Formação Cauê é constituída de fases de itabiritos com outros minerais como dolomita e anfibólitos, a Formação Gandarela possui como rochas características dolomitos ferruginosos, margas, filitos dolomíticos e filitos (Endo 1997).

Dorr *et al.* (1969) descrevem os itabiritos dolomíticos como mais presentes próximos ao topo da seção, em transição para a Formação Gandarela. O intemperismo dessas rochas, segundo o mesmo autor, resulta em material mais hidratado e de cor ocre argiloso. Nesse trabalho, Dorr *et al.* (*op. cit.*) ainda informam que as espessuras da unidade são muito variáveis, ficando na maioria das vezes entre 200 e 400 m, mas chegando até 1000 m em áreas de maior taxa de deformação.

### **2.2.2.3 Grupo Piracicaba:**

O Grupo Piracicaba é separado da Formação Gandarela pela presença de uma descontinuidade erosiva. Os protólitos sedimentares das rochas que compõe o Grupo Piracicaba são interpretados como sedimentos deltáicos superpostos por pelitos, arenitos e folhelhos marinhos (Dorr *et al.* 1957 *apud* Heilbron *et al.* 2016).

Essa unidade da estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero é subdividida entre as seguintes Formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro, respectivamente da mais velha para a unidade mais jovem (Endo *et al.* 2020).

A Formação Cercadinho é composta por rochas como quartzitos, dolomitos e filitos prateados; a Formação Fecho do Funil é marcada pela presença de filitos, filitos dolimíticos e dolomitos impuros; a Formação Taboões é constituída essencialmente por quartzitos finos e equigranulares. Já a Formação Barreiro é integrada principalmente por filitos e filitos carbonosos (Endo 1997).

### **2.2.3 Cobertura cenozoica**

Os registros geológicos mais recentes descritos para o Quadrilátero Ferrífero consistem em depósitos cenozoicos, representados por aluviões, colúvios, canga, argila e arenito. Alguns desses materiais ainda podem apresentar valor econômico associado, como é o caso da bauxita, laterita aluminosa (Varajão 1988).

Endo *et al.* (2020) caracterizam as unidades cenozoicas entre cangas, alúvios e elúvio/colúvio. No que tange mais especificamente às chamadas cangas, destaca a divisão em quatro tipos: detrítica, estruturada, química e rica.

No presente trabalho foram adotadas outras referências com agrupamentos similares, e cabe destacar a riqueza geológica da área de estudo, que contempla parte significativa dos tipos de cangas em uma pequena extensão espacial (Morro do Cruzeiro). Optou-se por adotar a caracterização do material de acordo com Varajão (1988) e corroborada por Assis (2018) que entendem os protólitos das cangas como filitos dolomíticos das Formações Gandarela e Feixo do Funil.



## CAPÍTULO 3

### LATERITAS

---

Neste capítulo, são apresentados os principais elementos associados à gênese das lateritas, as condições ambientais e fisiográficas que favorecem a formação desses materiais geológicos e um breve histórico do conhecimento já adquirido na temática.

#### 3.1 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A compreensão das lateritas perpassa diversos conceitos, desde questões ligadas à geomorfologia da região e condições climáticas até outros elementos como a disponibilidade de água e o tipo de intemperismo vigente. Assim, antes de se observar estritamente as lateritas e a construção desse conceito é fundamental que se tenha uma abordagem geral dos aspectos fisiográficos da região.

Compreender a evolução da paisagem no Quadrilátero Ferrífero tem sido motivo de discussão desde os trabalhos de Hader & Chamberlin (1915 *apud* Varajão *et al.* 2009). Nesse trabalho os autores atribuem a presença de rochas como os quartzitos e itabiritos no topo de serras como um resultado da ação de processos de denudação diferencial. Os autores ainda salientam a presença do Rio das Velhas como nível de base regional.

Posteriormente, os estudos de King (1956) possibilitam a evolução na compreensão dos fenômenos ao definir superfícies de aplainamento, nas quais o relevo seria rebaixado a partir de ciclos. Apesar dessa proposta conceitual diferente, o autor ainda se baseia no conceito de erosão diferencial, sem abordar e detalhes o aspecto quantitativo.

Por outro lado, estudos mais recentes, como o de Varajão *et al.* (2009) utilizam de métodos químicos como a análise de amostras de quartzo ( $^{10}\text{Be}$ ) para estimar as taxas de erosão na região do Quadrilátero Ferrífero. Dentre as conclusões do trabalho, estima-se uma taxa de erosão média de 7 metros por milhão de anos, além de constatar evidências de um movimento de soerguimento epirogenético associado.

No que tange ao clima, a região do Quadrilátero Ferrífero é genericamente classificada como do tipo subtropical de altitude (CWb), pela classificação de Köppen (Köppen 1900; Dubreuil *et al.* 2017). Essa unidade climática é marcada por inverno seco e verão ameno. Contudo, variações locais podem ser observadas, Lana (2010), por exemplo, descreve alternâncias entre os climas CWa e CWb ao longo das bacias dos rios das Velhas e Jequitaiá.

As temperaturas médias anuais se mantêm por volta dos 20°C com precipitação média variando entre 1300 mm e 2100 mm, sendo os valores mais elevados registrados na porção sudeste que

compreende a cidade de Ouro Preto (Herz 1978 *apud* Silva 2007). Segundo Silva (2007) a vegetação predominante é do tipo Floresta Estacional Semidecidual com áreas de transição da Floresta para o Cerrado. Lana (2010) e Bacellar (2000) salientam a relação direta entre a vegetação e o substrato geológico.

### 3.2 INTEMPERISMO

O intemperismo consiste em um conjunto de processos que promovem a degradação das rochas. Esses processos podem variar de natureza física, química ou biológica, e os produtos do fenômeno podem ser removidos mecanicamente ou em solução (Suguio 1980). O intemperismo atua sobre a superfície terrestre e promove a denudação, que consiste no rebaixamento progressivo das superfícies emersas (Sgarbi 2012), ou no conjunto formado pela erosão e intemperismo.

De forma geral, o intemperismo será dividido entre a desagregação mecânica e alteração química das rochas, tendo como um dos produtos a formação dos solos (Selley 2000). De forma geral, autores como Sgarbi (2012) e Lepsch (2011) atribuem a alteração das rochas à mudança de condições termodinâmicas e de pressão pelas quais as rochas passam ao saírem das porções mais profundas da Terra e se alocarem em superfície.

Por intemperismo físico, compreendem-se os processos como variações térmicas, hidratação e desidratação, alívio de tensões, entre outros processos que resultam na desintegração física do material geológico. Esse processo se dá essencialmente em zonas de climas com baixa pluviosidade, como áreas de desertos (Selley 2000).

A alteração química das rochas, ou intemperismo químico, é condicionado primordialmente por reações de hidrólise e oxidação, onde se destaca a ação dos ácidos orgânicos para alteração das rochas (Selley 2000). O intemperismo químico pode ser simplificado como uma reação do tipo:



A hidrólise é caracterizada pela decomposição pela reação com a água. Nesse processo a água atua não só como um agente capaz de carrear os reagentes envolvidos, como também atua como um dos reagentes que promovem a modificação do material. A oxidação por sua vez é marcada pela ação do oxigênio dissolvido em água e que atua essencialmente sobre superfícies, criando um manto de alteração (Sgarbi 2012).

O intemperismo biológico pode ser entendido como um processo complementar aos demais tipos de intemperismo, uma vez que pode ocorrer tanto pela ação mecânica de raízes de árvores em fraturas de rochas, como pela ação de químicos decorrentes das atividades biológicas (Suguio 1980).

Vale salientar que nas regiões de climas úmidos e quentes, onde se tem o maior desenvolvimento da vegetação, esses processos serão mais significativos.

Posteriormente ao intemperismo, existe o binômio erosão e intemperismo. Suguio (1980) interpreta a erosão como a remoção dos produtos do intemperismo, enquanto o termo transporte é definido como a movimentação desse material.

### 3.3 HISTÓRICO SOBRE LATERITAS

O termo laterita tem como referência mais antiga os estudos de Buchanan (1807), usado na ocasião para descrever solos avermelhados da Índia. O termo “laterita” possui origem no latim, cujo significado se aproxima de “tijolo”, nome dado em função das características visuais do material descrito. É interessante notar que na ocasião o autor já salienta a grande quantidade de poros e cavidades nesse material geológico.

No contexto do Quadrilátero Ferrífero, as primeiras contribuições para o reconhecimento e discussão acerca das lateritas como sendo as de Eschwege (2002) em estudos desenvolvidos entre 1811 e 1817, Gorceix (1876), Barbosa (1960 *apud* Varajão 1988) e Dorr *et al.* (1969) como os primeiros a contemplarem o material laterítico.

Eschwege (2002) descreve a presença de lateritas na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais, material conhecido localmente como tapanhoacanga. Gorceix (*op. cit.*) utiliza do termo canga para couraças de composição ferruginosa, associadas aos horizontes laterais de composição semelhante. Barbosa (*op. cit.*) ainda separa as cangas segundo três classes para as cangas, sendo eles: eluvial, coluvial e aluvial, de acordo com os prováveis modelos de gênese. Dorr *et al.* (1969) tratam de tais materiais pelo termo *mudstone* (equivalente a lamito). Segundo o autor esse material estaria associado à superfície de aplainamento pós-Gondwana, e além disso, o material descrito no contexto do Quadrilátero Ferríferos em tese diferenciaria dos descritos na Índia por conta de ter sofrido transporte e não ter sido formado por acumulação sobre a rocha subjacente.

Em âmbito mais recente, Tardy (1991) também ressalta que os principais fatores a controlarem o intemperismo são a temperatura e a umidade relativa da atmosfera (fator que corrobora à recorrência desses materiais tanto em poções do Brasil quanto da África). No mesmo trabalho, o autor busca ainda propor metodologias para reconstruções continentais a partir dos elementos de intemperismo descritos em ambos continentes.

Teixeira *et al.* (2000) salientam a presença de materiais lateríticos em quase todo o território brasileiro, basicamente com exceção do ambiente semi-árido nordestino. Vale salientar que não faz

diferenciação nesse caso entre as lateritas com predominância de alumínio (bauxitas) daquelas que possuem maior quantidade de ferro.

O trabalho de revisão de Augustin *et al.* (2013) indica de forma incipiente as lateritas como materiais decorrentes do enriquecimento supergênico, porém, destaca que a formação das lateritas pode decorrer da alteração de diferentes tipos litológicos e também podem estar associadas a processos de dinâmicas muito variadas.

A proposta da revisão de Augustin *et al.* (2013) fornece os seguintes achados na literatura: primeiramente, a respeito das terminologias aplicadas às lateritas, que apresentam grande variação dentro da literatura (Tabela 3.1 - Tabela relacionando as diferentes terminologias aplicadas para lateritas nas referências.).

**Tabela 3.1** - Tabela relacionando as diferentes terminologias aplicadas para lateritas nas referências. (Fonte: Goudie 1973 *apud* Augustin *et al.* 2013).

Termo aplicado	Origem
Iron clay	
Laterite	India
Brickstone	
Piçarra	Brasil
Canga	
Murrum	Uganda
Ouklip	Africa S.
Ferricrete	
Eisenkruste	Alemanha
Krusteneisenstein	
Pisolite	Australia
Mantle rock	Ghana
Cuirasse	França
Moco de hierro	Venezuela
Ironstone	Nigeria
Plinthite	USA
Cabook	Sir Lanka

Outra abordagem importante tratada no trabalho são alguns dos modelos de formação dos materiais lateríticos. Basicamente eles são distribuídos em dois grandes grupos, o primeiro baseado na acumulação relativa e o segundo na acumulação absoluta.

### 3.3.1 Modelos por acumulação relativa

Modelos baseados na remoção de cátions metálicos e da sílica em solução com acumulação indireta dos óxi-hidróxidos de ferro e alumínio. McFarlane (1976) propõe que essa acumulação seja resultado de oscilações sazonais do nível de água. Nos estudos de Shellmann (2005 e 2010) e de Goudie

(1973 *apud* Augustin *et al.* 2013) esse transporte de material na verdade seria resultado de processos de infiltração e capilaridade.

### **3.3.2 Modelos por acumulação absoluta**

O grupo dos modelos por acumulação absoluta pressupõe que os principais íons ou materiais que compõem as lateritas, como é o caso do ferro e alumínio, seriam transportados e acumulados. As subdivisões desse modelo consistem basicamente na acumulação desses materiais nos sopés das vertentes, por precipitação ou de maneira detrítica (Goudie 1973 *apud* Augustin *et al.* 2013).





#### 4.1 INTRODUÇÃO

O presente tópico tem por finalidade levantar particularidades da área de estudo já exploradas em trabalhos anteriores, com finalidade de embasar as interpretações dos produtos geofísicos que compõem a fase final da metodologia proposta (integração geológico-geofísica).

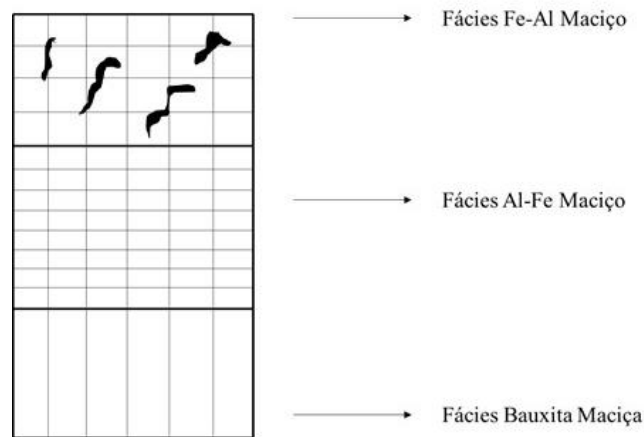
As principais referências bibliográficas adotadas neste capítulo são os trabalhos de Varajão (1988) e Assis (2018). O primeiro voltado à caracterização regional das minas de bauxita do Quadrilátero Ferrífero e o segundo relacionado à caracterização das ocorrências do Morro do Cruzeiro.

Na revisão conduzida por Varajão (1988), o autor indica inicialmente a percepção da literatura de em âmbito regional se agrupar as lateritas do Quadrilátero Ferrífero em dois grupos: o primeiro correspondente aos formados a partir da laterização de materiais transportados e o segundo *in situ*.

Varajão (1988) referencia aos trabalhos de Vaz (1931 *apud* Varajão 1988), Guimarães & Coelho (1945 *apud* Varajão 1988) e Guimarães (1945 *apud* Varajão 1988). Em resumo os autores definem como protólito das cangas rochas do Supergrupo Minas, em particular xistos e filitos, havendo ainda como consenso que esses materiais apresentem alto teor de ferro.

Guimarães & Coelho (1945 *apud* Varajão 1988) indicam a ocorrência de injeções pegmatíticas, o que seria evidenciado por presença de palhetas de muscovita e grânulos de quartzo. Ferreira (1983 *apud* Varajão 1988) propõe a formação *in situ* da bauxita presente no Morro do Cruzeiro.

Por fim, Varajão (1988) traz um modelo de caracterização da jazida (à época) do Morro do Cruzeiro baseado na presença de três fácies estruturais, fácies bauxita maciça, fácies Al-Fe maciço e fácies Fe-Al maciço (Figura 4.1).



**Figura 4.1** – Modelo de disposição das fácies estruturais indicado por Varajão (1988) para as cangas do Morro do Cruzeiro, modificado de Varajão (1988).

Assis (2018) por sua vez define os materiais lateríticos do Morro do Cruzeiro inicialmente em dois grupos de couraças, aluminosas e ferruginosas. De acordo com a metodologia adotada pelo autor são definidos dois perfis representativos, um para lateritas aluminosas, onde são definidas três fácies, e outro para as ferruginosas, com mais duas fácies definidas.

#### 4.1.1 Fácies das lateritas aluminosas

Foram definidas três fácies, sendo elas da base para o topo: maciça, fragmentada e nodular. A fácies maciça é recorrente nas bases dos perfis de alteração com espessuras de 0,60m. São descritas na mineralogia dessa unidade gibbsita, goethita, hematita e anatásio, além de caulinita.

Nessa porção do material são observados, em microscópio, vazios planares entre os agregados, vazios em cavidade, ou mesmo vazios em canal, contudo, ocorre com recorrência o preenchimento por gibbsita. Além disso, cabe destacar ocorrência considerável de argilominerais nas lâminas (33% na descrição informada). Um exemplo característico da fácies maciça encontra-se ilustrada na Figura 4.2. A referência espacial do ponto encontra-se na Figura 4.4, indicada como P3.

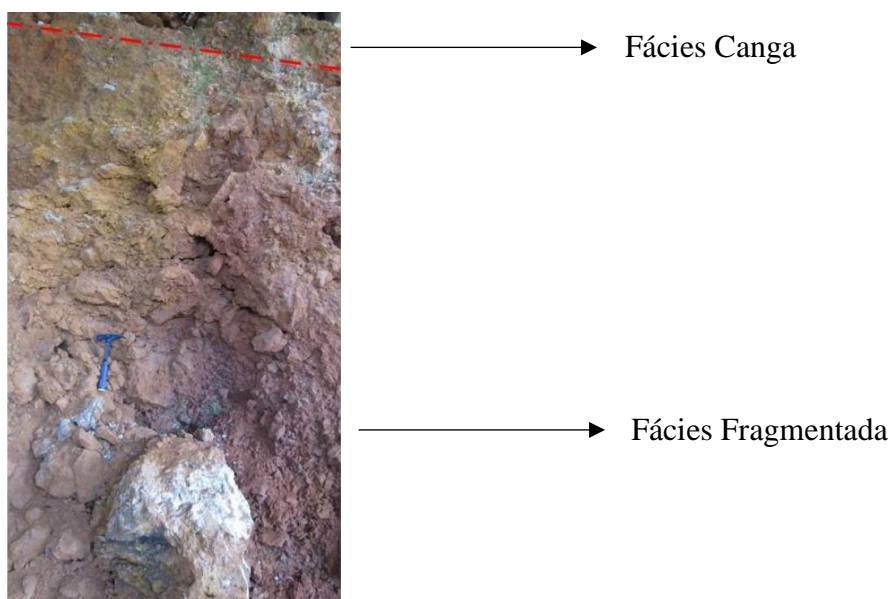


**Figura 4.2** – Fácies maciça em laterita aluminosa. A: imagem de afloramento do ponto P3. B: imagem de amostra do local indicado em A (modificado de Assis 2018).

Já a fácies fragmentada, correspondente à porção intermediária do perfil, possui espessura média de 0,90 m apresenta-se comumente constituída por fragmentos de aproximadamente 7 centímetros. Sua constituição mineralógica, para além dos minerais já descritos na fácies maciça, incluindo a caulinita, ainda apresenta quartzo.

#### 4.1.2 Fácies das lateritas ferruginosas

Para o caso das lateritas ferruginosas foram descritas duas fácies no perfil modelo, a fácies fragmentada e fácies canga. Ilustradas por Assis (2018) na Figura 4.3 – ponto P4 do mapa (Figura 4.4.)



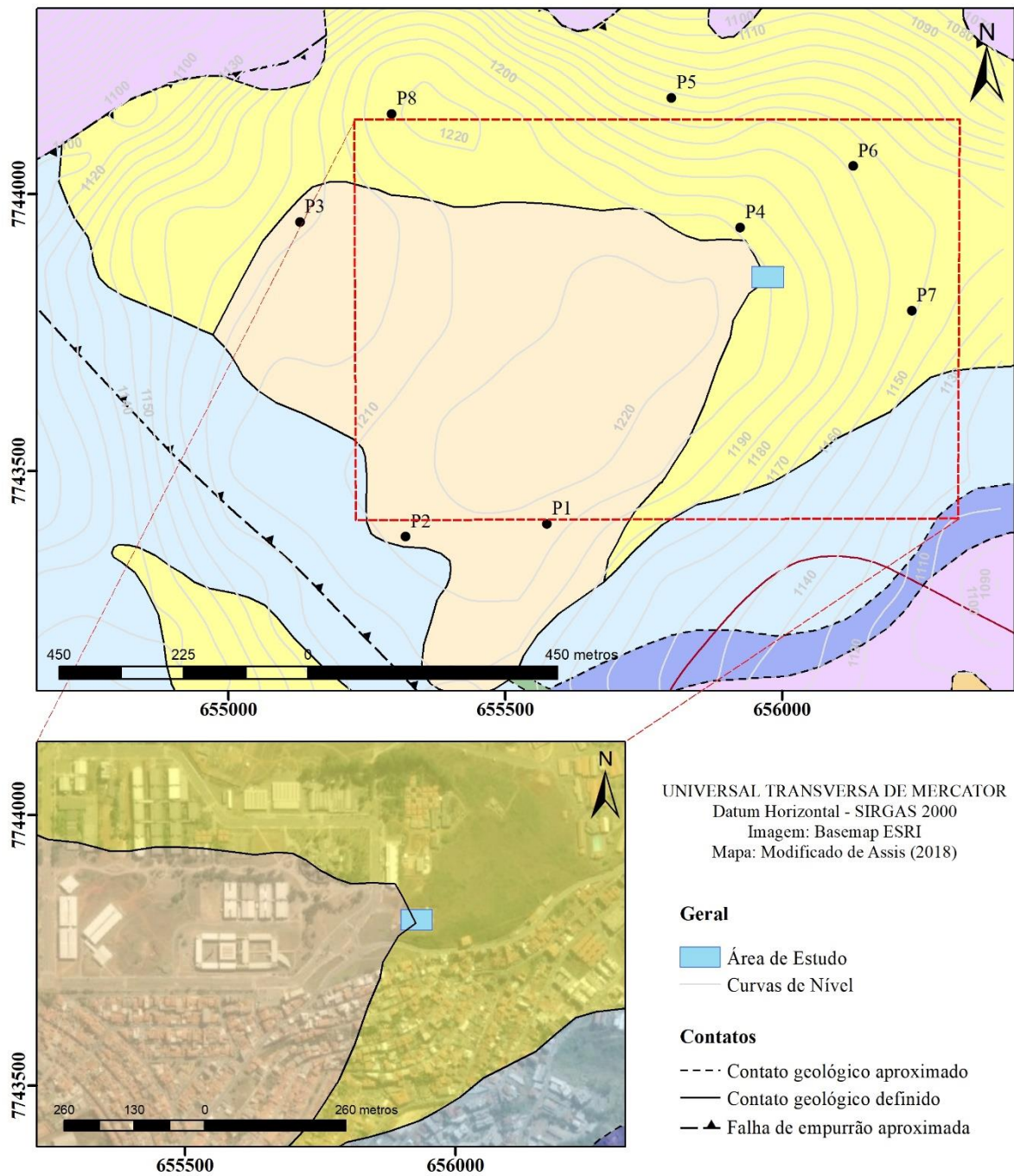
**Figura 4.3** – Exemplo característico da fácies canga e fragmentada na região de estudo (Assis 2018).

Na fácies fragmentada são descritos fragmentos angulares, de coloração cinza escura. A mineralogia é composta por goethita, gibbsita e quartzo, podendo apresentar também caulinita. Em nível de análise por microscópico a matriz se apresenta maciça e contendo grãos de quartzo. Para essa fácies é descrita porosidade de aproximadamente 15%, representada por poros cavitários.

É importante destacar que para além da delimitação da fácies maciça de forma mais estratificada, Assis (2018) destaca ocorrências de bolsões de fácies com textura maciça em meio à fácies fragmentada. Além disso, a autora atribui essa condição a possíveis caminhos preferenciais de propagação da água no meio que eventualmente formaram as porções fragmentadas.

A fácies canga, por sua vez, é descrita sobrepondo a fácies fragmentada (e maciça lateralmente adjacente). A mineralogia descrita é composta por goethita, gibbsita e grãos de quartzo variando entre granulometria de areia fina e grossa. São descritos poros com variação de tamanho entre 0,1 e 1,5 mm.

O mapa (Figura 4.4) consiste em um dos produtos apresentados por Assis (2018), no qual foram refinados os limites propostos pelo mapeamento de Baltazar *et. al* (2005). Nele inicialmente é feita a alocação espacial do levantamento realizado no mapa geológico produzido e posteriormente a integração dessas informações à imagem de satélite de forma a permitir espacialmente a percepção dos limites geológicos.



**Figura 4.4** – Mapa geológico modificado de Assis (2018) e Batalzar *et al.* (2005), com inserção da área de estudo (imagens de satélite, *Basemap ESRI*).



# CAPÍTULO 5

## ELETRORRESISTIVIDADE

---

A geofísica tem como base a investigação dos diversos sistemas terrestres e em seus diversos níveis de detalhe por meio das propriedades e respostas físicas das rochas. Segundo Kearey *et al.* (2009), é comum que na geofísica se busque uma variação local de um parâmetro em comparação a um valor de fundo. Em outras palavras, considerando-se uma dada propriedade física de entrada, é possível definir zonas com respostas anômalas. Tais anomalias estão, por sua vez, associadas às variações físicas do meio, mais especificamente a variações de diversas ordens nos materiais geológicos.

Para garantia de que o sinal inserido seja constante deve-se proceder com o adequado controle de qualidade durante os levantamentos, ou no caso do uso de campos variáveis, é necessário recorrer a correções.

Os métodos elétricos, de forma geral, utilizam de três propriedades elétricas: a condutividade elétrica, permissividade dielétrica e a cargabilidade. No caso da eletrorresistividade, em específico, é utilizado conceito de condutividade elétrica, eletrônica ou eletrolítica, porém, por razões operacionais, recorre-se à propriedade matematicamente inversa, a resistividade.

Segundo Braga (2006), a condutividade eletrônica é característica de metais e semicondutores, resultando essencialmente do transporte de elétrons na matriz da rocha; a condutividade eletrolítica por sua vez é comum de eletrólitos sólidos e líquidos, estando associada essencialmente à presença de água em poros. O autor resume as formas de condutividade elétrica segundo a Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** - Sumário dos parâmetros de levantamento adotados (Braga 2006).

Condutividade Eletrônica	Metais e Semicondutores	Deve-se ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo a sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e o grau de impurezas.
Condutividade iônica	Eletrólitos sólidos (dielétricos) e eletrólitos líquidos:	Deve-se ao deslocamento dos íons existentes nas águas contidas nos poros de uma massa de solo, sedimentos inconsolidados ou fissuras das rochas. Este tipo de mecanismo é o que interessa na Hidrogeologia.

Em termos dos métodos elétricos, o *input* é uma corrente, que pode ser natural ou artificial. No caso da eletrorresistividade a intensidade dessa corrente elétrica inserida é controlada pelo equipamento, logo, espera-se que seja aproximadamente constante. Sendo assim, toda a variação de intensidade dessa corrente é atribuída às variações geológicas do meio estudado.

Para garantir que o produto final da abordagem geofísica seja coerente deve-se garantir uma boa execução dos levantamentos em campo, seguindo boas práticas já consagradas na literatura; além disso,

deve-se ter um bom embasamento teórico da técnica que permitam o processamento de sinais e a interpretação geológica de forma integrada e coerente.

Frente à grande gama de recursos permitidos pelos *softwares* de processamento, pode-se gerar produtos puramente matemáticos que não representem com aderência o meio geológico ou que sejam fisicamente incoerentes. No intuito de garantir a integração dos produtos e o contexto de estudo, deve-se proceder com o detalhamento dos conceitos que embasam a técnica.

Neste capítulo é apresentada a revisão do recurso geofísico cuja aplicação foi indicada na metodologia. Em função da abordagem proposta e do tipo de alvo geológico associado, escolheu-se a aplicação do método de eletroresistividade.

## 5.1 ASPECTOS GERAIS

A eletroresistividade consiste em um método que tem como propriedade física de interesse a resistividade ( $\rho$ ), algebricamente o inverso da condutividade ( $\sigma$ ), conforme indica a equação (Equação 5.1).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\Omega m) \quad \text{(Equação 5.1)}$$

A condutividade pode ser eletrônica, presente em metais e semicondutores ou iônica, decorrente da presença de eletrólitos no sistema (Braga 2016). Sendo assim, é mais comum que se meça a condutividade eletrolítica.

Por conta desses possíveis mecanismos de propagação das correntes elétricas depreende-se que mesmo para litotipos relativamente semelhantes, diferentes repostas de condutividade podem ocorrer decorrentes de variações de temperatura, porosidade, teor de umidade, metamorfismo, entre outros (Kearey *et al.* 2009).

Além do uso da resistividade como princípio físico associado à técnica, a eletroresistividade tem por característica o uso de correntes artificiais, inseridas por meio de eletrodos (Telford *et al.* 1990). De forma geral a eletroresistividade tem sido um método recorrentemente indicado na literatura para estudos hídricos, ambientais e geotécnicos, o que coaduna com a proposta da presente pesquisa.

As deduções de equações a respeito da resistividade e do potencial elétrico são baseadas em Bortolozo (2016). A conceituação e desenvolvimento algébrico da inversão de dados a principal referência adotada será Sasaki (1992), publicação referenciada na própria brochura do *software* utilizado.



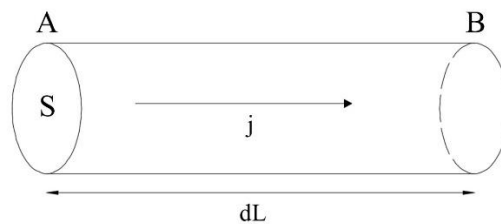
### 5.1.1 Lei de Ohm e definição da resistividade

A depender do foco da discussão abordada, os conceitos físicos necessários para embasar a aplicação de algum dos métodos geoeletricos podem envolver uma extensa variedade de conhecimentos associados ao eletromagnetismo, como as leis de Maxwell e as relações constitutivas (e.g. lei de Ohm). Aqui serão discutidos os conceitos mais aplicáveis ao objetivo do trabalho.

Primeiramente as equações de base serão a lei de Ohm e a definição de resistividade. A lei de Ohm é dada pela equação (Equação 5.2), a seguir. A lei de Ohm correlaciona a diferença de potencial elétrico ( $V$ ), a resistência do meio ( $R$ ) e a intensidade de corrente elétrica ( $I$ ).

$$V = RI \quad (\text{Equação 5.2})$$

A definição de resistividade pode ser entendida partindo de um problema puramente físico, onde considera-se uma corrente que atravessa um elemento finito ( $dL$ ) de um fio condutor homogêneo com seção transversal  $S$ . A situação encontra-se esquematizada na Figura 5.1.



**Figura 5.1** - Modelo esquemático do elemento infinitesimal de um fio condutor. Adaptado de Nussenzveig (2015).

Algebricamente uma relação empírica pode ser desenvolvida entre as grandezas salientadas, mediante a definição de uma constante de proporcionalidade, a qual será entendida como a resistividade do meio (Equação 5.3).

$$R = \rho \frac{dL}{S} \quad (\Omega m) \quad (\text{Equação 5.3})$$

Em termos físicos, essa constante de proporcionalidade está associada à dificuldade que a corrente elétrica tem de atravessar um dado meio. As equações (Equação 5.2) e (Equação 5.3) podem ser relacionadas com a finalidade de se chegar à forma constitutiva da lei de Ohm:

$$V = RI \quad \therefore \quad R = -\frac{dV}{I} \quad (\text{Equação 5.4})$$

$$R = \rho \frac{dl}{S} = -\frac{dV}{I} \quad \therefore \quad \frac{I}{S} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dV}{dl} \quad (\text{Equação 5.5})$$

Observe que aqui a diferença de potencial foi escrita como um diferencial ( $dV$ ), além disso, é comum que se estabeleça a razão como negativa em função do referencial de propagação se dar em direção ao menor potencial. Para os próximos passos deve-se introduzir a relação algébrica que define a densidade de corrente ( $J$ ) e o campo elétrico ( $E$ ).

A densidade de corrente consiste simplesmente na quantidade de corrente que passa por uma da área de seção transversal do fio.

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{Equação 5.6})$$

O campo elétrico na direção do vetor de corrente pode ser dado pela razão entre a diferença de potencial e o comprimento do fio. Cabe destacar que o comprimento de fio será discretizado, sendo as grandezas tratadas por diferenciais e considerando-se a superposição para análise do campo elétrico:

$$E = \frac{dV}{dl} \quad (\text{Equação 5.7})$$

Assim, correlacionando a equação (Equação 5.5) com as equações (Equação 5.6) e (Equação 5.7), é possível perceber que existe uma proporcionalidade entre a densidade de corrente e o campo elétrico mediante as condições de contorno estabelecidas pela abordagem. A constante de proporcionalidade entre a densidade de corrente e o campo serão ou a condutividade ou a resistividade do meio.

A relação é dada pelas equações (Equação 5.8) e (Equação 5.9).

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (\text{Equação 5.8})$$

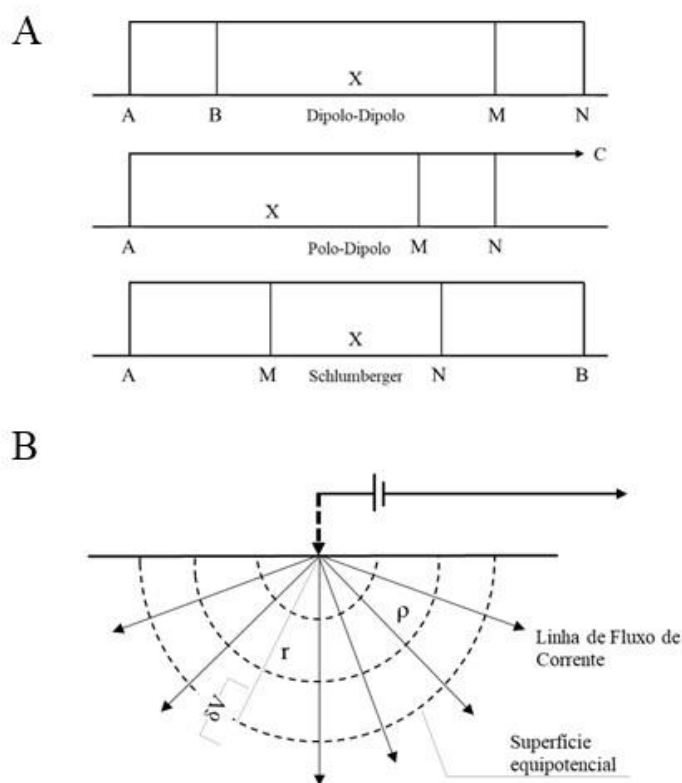
$$J = \sigma E \quad (\text{Equação 5.9})$$

A abordagem teórica apresentada até então é desenvolvida estabelecendo condições de contorno para validade das relações algébricas. Bortolozzo (2016) destaca que se deve considerar um meio homogêneo e isotrópico (segundo o qual a direção de propagação da corrente não influencie), que se estende infinitamente para baixo e lateralmente.

### 5.1.2 Técnica e Arranjo

Genericamente os eletrodos utilizados em um levantamento eletrorresistivo serão um par para inserção da corrente elétrica no solo (A e B) enquanto os outros dois (M e N) serão utilizados para mensurar a diferença de potencial entre os pontos (Braga 2016 – Figura 5.2 A). Entretanto, nem todos os levantamentos da técnica de eletrorresistividade devem contar necessariamente com 4 eletrodos sendo movimentados.

Ao se optar por uma técnica a outra, observa-se modificações essencialmente no produto do levantamento, enquanto os arranjos diferenciam-se pela geometria e movimentação dos eletrodos. Apesar dessas diferenças, termos práticos a propagação da corrente pode ser sistematizada na forma de superfícies equipotenciais com geometria de uma casca esférica (Kearey *et al.* 2009 - Figura 5.2 B).



**Figura 5.2** – A. Três formas possíveis de disposição dos eletrodos de corrente e potencial; B. Forma teórica, bidimensional, de irradiação da corrente elétrica emitida. Modificado de Kearey *et al.* 2009.

As técnicas aplicadas nos levantamentos por eletrorresistividade são divididas por Braga (2016) em três tipos:

- sondagem elétrica: pode ocorrer de forma simétrica ou dipolar, com eletrodos respectivamente alinhados e de alinhamento variável (Orellana 1982). São baseadas na investigação da profundidade a partir de um ponto fixo na superfície;

- perfilagem elétrica: baseada na investigação unidimensional pelo interior de furos de sondagem.
- caminhamento elétrico: feito a partir de medidas na superfície com espaçamentos constantes dos eletrodos.

Com relação aos arranjos utilizados comumente dentro da técnica de caminhamento elétrico salienta-se toda uma gama de possibilidades, entre essas o Schlumberger e Wenner, gradiente, polo-polo, dipolo-dipolo, entre outros.

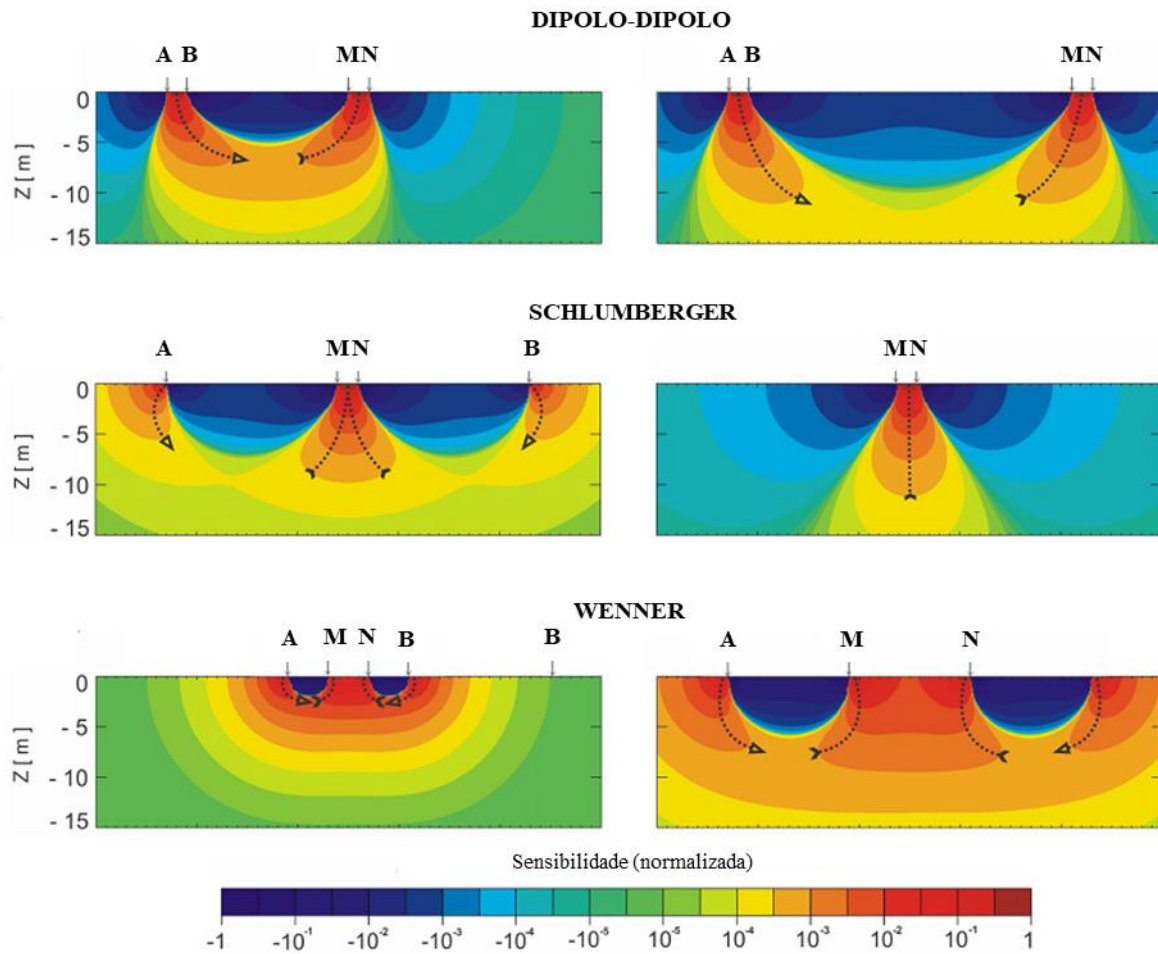
Para discussão do melhor arranjo a ser escolhido para o contexto, destacam-se os trabalhos de Dahlin & Zhou (2004), Szalai & Szarka (2008) e Moreira *et al.* (2016). Szalai & Szarka (2008) destacam a existência ao menos 92 tipos diferentes de arranjos à época de publicação do trabalho, além disso, destacam a popularidade dos arranjos dipolo-dipolo e Wenner, ressaltando a extensa discussão acerca de suas aplicações.

É nesse contexto extremamente amplo de possibilidades que autores como Dahlin & Zhou (2004) e Moreira *et al.* (2016) destacam a relação entre a escolha pelo arranjo e o contexto geológico a ser investigado, como no caso do segundo conjunto de autores que indicam a aplicação do arranjo dipolo-dipolo para modelagem de estruturas tridimensionais, de alta resistividade em zonas saturadas.

Dahlin & Zhou (2004) simulam numericamente a sensibilidade de diversos arranjos, utilizando 10 eletrodos, condição semelhante à observada metodologia do presente trabalho. Na análise do padrão de sensibilidade 2D, os autores salientam que a resolução espacial e penetração estão associadas basicamente ao espaçamento e distância máxima entre os eletrodos.

Entre as conclusões apresentadas por Dahlin & Zhou (2004), destaca-se a percepção de menor contaminação por ruído nos arranjos  $\gamma$  e Wenner- $\alpha$ . Em contrapartida apresentam que os arranjos Dipolo-dipolo, Polo-dipolo e gradiente, apesar de mais suscetíveis a ruídos, tendem a retornar anomalias mais precisas que arranjos como  $\gamma$ , Polo-polo, Wenner- $\alpha$  e Wenner- $\beta$ . Os autores ainda recomendam fortemente os arranjos gradiente, polo-dipolo, dipolo-dipolo e Schlumberger para investigações de resistividade 2D, cabendo destacar que deve-se levar em consideração as condições logísticas e da área de estudo.

Um recurso comum para compreensão das variações de produtos dos diferentes arranjos, consiste nas análises de sensibilidades. Tanto Dahlin & Zhou (2004) quanto Moreira *et al.* (2016) apresentam discussões baseadas na ferramenta para os respectivos trabalhos. A Figura 5.3 apresenta o parâmetro de discussão utilizado pelo segundo grupo de autores, que basicamente separa isolinhas de sensibilidade.

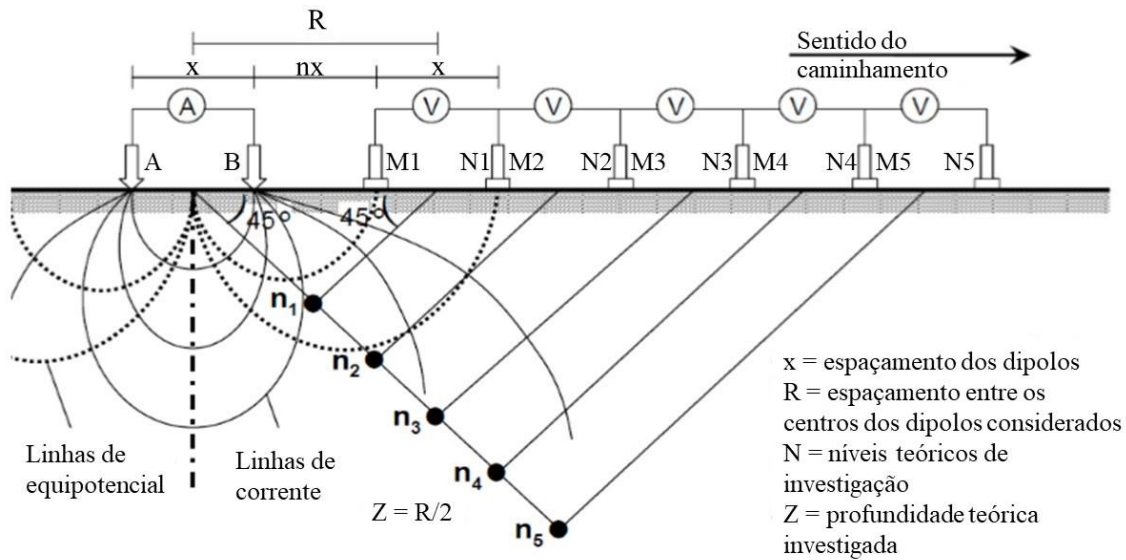


**Figura 5.3** – Seções sintéticas de eletroresistividade, indicando a sensibilidade normalizada por tipo de arranjo, modificado de Moreira *et al.* 2016.

No arranjo do tipo Dipolo-dipolo o par de eletrodos AB é separado por uma distância “x”, mesmo espaçamento aplicado para os eletrodos M e N. Esse espaçamento “x” é mantido ao longo de todo o levantamento, porém, a distância entre os pares de eletrodos é incrementada progressivamente, sendo cada incremento tratado como um nível “N” (Braga 2016).

Bortolozzo (2016) apresenta como uma desvantagem do arranjo dipolo-dipolo a perda da qualidade de sinal para altas profundidades (altos valores de “N”). Contudo, tratando-se de levantamentos em alvos mais próximos à superfície destaca-se a alta resolução horizontal como uma grande vantagem. Ainda é possível salientar que esse arranjo diminui a quantidade de cabos necessários o que facilita a movimentação do arranjo.

A investigação, ocorre teoricamente, em profundidade igual a metade da distância entre os centros dos dipolos. Os pontos amostrados são colineares a partir de uma reta com inclinação de  $45^\circ$  em relação à superfície e o sistema de plotagem encontra-se, em profundidade, no ponto médio entre os centros dos dipolos. A Figura 5.4 a seguir ilustra a relação descrita:



**Figura 5.4** - Disposição esquemática dos eletrodos em arranjo do tipo dipolo-dipolo. Observa-se o ângulo de investigação característico a partir dos pontos imageados. A setas indicam os eletrodos, sendo representado o equivalente a duas variações de posição dos que coletam a diferença de potencial e três pontos de amostragem (Braga 2016).

Considerando a estrutura de movimentação dos eletrodos e a geometria apresentada para a propagação da energia elétrica, é possível calcular o potencial elétrico em função do raio. Para tal, aplica-se a área de uma meia casca esférica ( $A_{SE}$ ) na equação (Equação 5.5). Nesse caso o elemento linear considerado é o próprio raio da esfera ( $r$ ).

$$A_E = 4\pi r^2 \therefore A_{SE} = 2\pi r^2 \quad (\text{Equação 5.10})$$

$$dV = -\frac{\rho I}{S} dl \therefore dV = -\rho I \cdot \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (\text{Equação 5.11})$$

Desenvolvendo ambos lados da equação, tem-se:

$$\int dV = -\int \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr \quad (\text{Equação 5.12})$$

$$V(r) = -\rho I \cdot \frac{1}{2\pi r} + C \quad (\text{Equação 5.13})$$

$$C \cong 0 \therefore V(r) = -\rho I \cdot \frac{1}{2\pi r} \quad (\text{Equação 5.14})$$

A partir da equação (Equação 5.14) é possível calcular o potencial nos eletrodos “M” e “N” ( $V_M$  e  $V_N$  respectivamente), considerando a injeção de corrente nas posições dos eletrodos “A” e “B”,

conforme ilustrado na Figura 5.4. Nesse caso AM, NA, BM e BN correspondem aos comprimentos dos seguimentos entre os respectivos eletrodos, que por sua vez consistem no raio de propagação.

$$V_M = \frac{i\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (\text{Equação 5.15})$$

$$V_N = \frac{i\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (\text{Equação 5.16})$$

$$V_{MN} = \frac{i\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad \therefore \quad (\text{Equação 5.17})$$

$$V_{MN} = \frac{i\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]$$

É fundamental enfatizar que a geometria dos arranjos pode ter grande influência sobre os resultados lidos, isso em função das diversas variáveis e heterogeneidades presentes na Terra. Essas variações implicam em limitações à aplicação direta dos princípios elencados anteriormente, como é o caso da definição da resistividade – é relativamente mais complexo se definir um elemento linear trabalhando com um meio geológico que um fio.

Assim, um dos primeiros recursos a se tratar os dados é por meio da ponderação da resistividade em função do fator ou coeficiente geométrico ( $K$ ), que pode ser entendido como uma adequação dos parâmetros de área e comprimento da equação (Equação 5.5):

$$\rho = \frac{dV}{I} \cdot \frac{S}{dl} \quad \therefore \quad \rho = K \frac{dV}{I} \quad (\text{Equação 5.18})$$

Onde a constante  $K$  será dada em função dos espaçamentos dos eletrodos. A equação (Equação 5.19) indica o cálculo do fator geométrico para uma disposição simétrica dos eletrodos.

$$K = 2\pi \cdot \frac{1}{\left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]} \quad (\text{Equação 5.19})$$

No caso do arranjo dipolo-dipolo, o fator geométrico será dado por (Equação 5.20):

$$K = 2\pi \cdot G \cdot x \quad (\text{Equação 5.20})$$

Onde  $G$  é dado pela (Equação 5.21):

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (\text{Equação 5.21})$$

$$K = \pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) \cdot x \quad (\text{Equação 5.22})$$

Onde “ $x$ ” é o espaçamento entre os dipolos e “ $n$ ” o nível de investigação. É fundamental perceber que, a partir da equação (Equação 5.18), se ocorre uma redução muito grande da diferença de potencial medido o resultado da resistividade passa a refletir mais o fator geométrico, o que implica em um resultado matemático e não físico. Uma das possíveis causas para essa perda de intensidade de sinal pode ser a profundidade de investigação.

## 5.2 INVERSÃO DE DADOS

As discussões elencadas em tópicos anteriores permitem perceber que os silogismos construídos e premissas adotadas para embasar a técnica assumem uma série de condições de contorno e aproximações às condições reais (*e.g.* assumir a homogeneidade do meio).

Entretanto, tratando-se dos meios naturais e dos problemas de ordem geológica é quase impossível se falar em meio realmente homogêneos. Assim sendo, como em todo processo de modelagem, parte-se de um pressuposto inicial simplificado, rebuscando o modelo gradualmente. É possível salientar para o método da eletorresistividade variações em função do arranjo, topografia, profundidade e homogeneidade do meio amostrado.

Esse conjunto de elementos tem como resultado que apenas o levantamento de dados, sem qualquer tipo de tratamento, retorna a chamada resistividade aparente. A partir desses dados são construídas as pseudosseções, que ainda devem ser processadas e associadas aos dados geológicos, até por fim se construir o modelo geoeletrico final (Braga 2016).

Um dos recursos para se aproximar os dados aparentes dos resultados reais, tanto em termos de resposta como também das profundidades, é o uso da ferramenta de inversão de dados. Esse recurso físico/matemático tende a melhorar em grande quantidade a interpretação dos dados (Bortolozzo 2016).

A inversão de dados é um recurso que pode ser aplicado em todos os diferentes contextos da geofísica, variando os algoritmos utilizados e também os produtos finais esperados. Como apresentado, na eletorresistividade a inversão de dados visa atingir as profundidades reais de investigação; em estudos de sísmica, por outro lado, comumente se aplica a inversão para transitar do tempo de trânsito para a distribuição de velocidades.

Em muitos contextos e mediante disponibilidade de dados ainda se recorre a aplicação de algoritmos para inversão conjunta, seja utilizando métodos semelhantes (mesma propriedade física investigada, exemplo, TDEM e eletorresistividade) ou utilizando métodos diferentes, mas que as



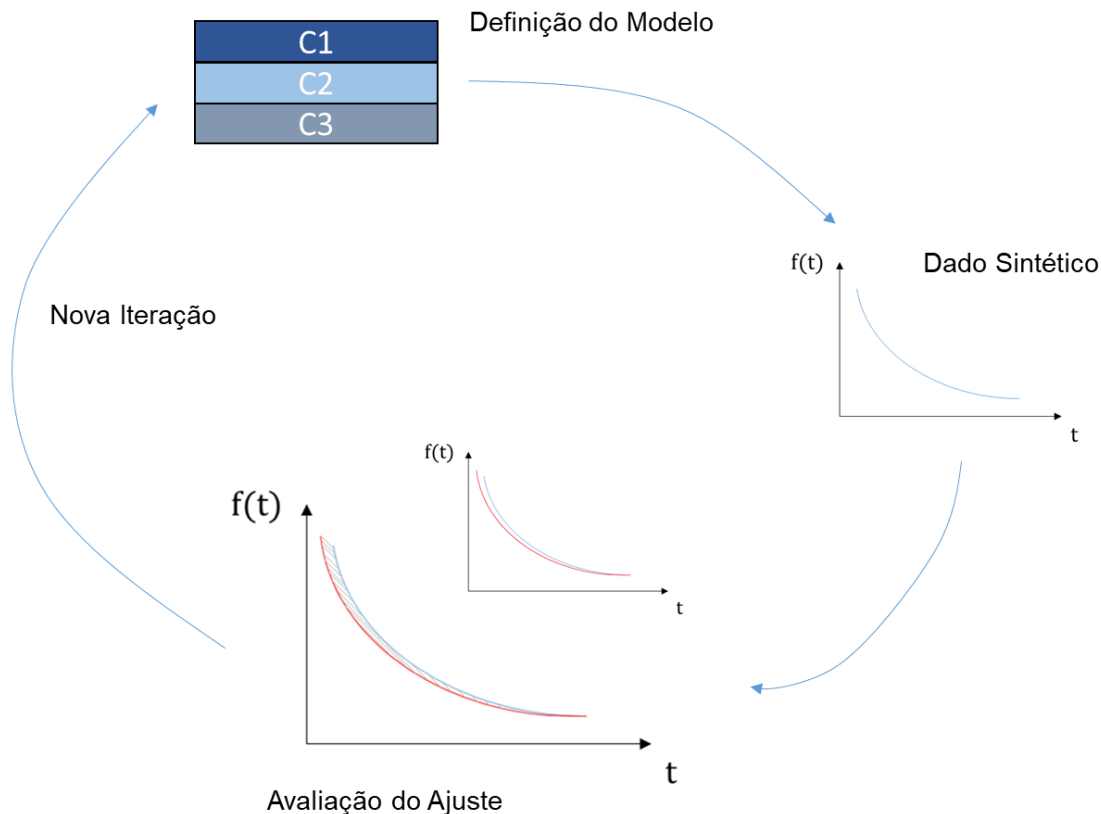
propriedades possam ser correlacionadas (exemplo, gravimetria – peso específico – e sísmica, velocidade de onda).

Apesar disso, pode-se estabelecer como comum a todos os processos de inversão uma tentativa de converter respostas físicas no conhecimento da distribuição de propriedade física em um meio. Nesse sentido algumas fases são comuns, por definição, nos processos de inversão geofísica. Bortolozo (2016) destaca entre eles a construção do modelo interpretativo, a obtenção ou definição dos parâmetros desse modelo e a análise.

Sistematizando o processo de inversão descrito por Gonçalves (2019), pode-se definir o processo da seguinte forma:

- uma primeira fase, com construção de um modelo baseado nos dados de campo observados, buscando reconstruir a geologia. A autora ainda destaca a necessidade de inserção de parâmetros para o modelo e definição da resposta do modelo (dados sintéticos) por uma função linear ou não linear.
- comparação do dado medido em campo com a resposta do modelo e comparação por algoritmos de otimização (análise do ajuste).
- iteração do algoritmo com produção de um novo modelo e avaliação da convergência.

Por fim, Gonçalves (2019) debate a falta de unicidade das inversões em decorrência da limitação numérica dos *inputs* (os dados geofísicos reais são sempre numericamente finitos). A Figura 5.5 ilustra graficamente as etapas supracitadas e discutidas.



**Figura 5.5** – Ilustração esquemática e simplificada da rotina de inversão comumente adotada pelos *softwares* de inversão.

Contudo, a inversão não consiste em um sistema tão simples, devendo-se assumir uma série de parâmetros, e nem sempre será baseada em métodos iterativos.

Para a inversão de dados, diferentes *softwares* podem ser utilizados, geralmente variando a abordagem matemática aplicada. Hellman *et al.* (2016) comparam os *softwares* **RES2DINV**, **AarhusInv** e **Bert**, chegando à conclusão que o primeiro tende a exagerar verticalmente as respostas, o segundo gera o exagero horizontal e o *software* Bert apesar ser intermediário entre os anteriores, tem dificuldade em delimitar o contorno das anomalias.

O *software* de inversão aplicado no trabalho (RES2DINV), indica em seu manual de usuário, que a inversão é conduzida utilizando o método “smoothness-constrained, Gauss-Newton least-squares” (Sasaki 1992), ainda contando com uma série de possibilidades de processamento adicionais.

### 5.2.1 Inversão Smoothness-Constrained

Neste tópico, apresentam-se os principais elementos associados ao algoritmo de inversão aplicado, discutindo-se alguns dos parâmetros de modelagem do *software*. Em tradução literal o recurso é chamado de suavização restrita por mínimos quadrados e para a presente discussão serão tomados por base os trabalhos de Sasaki (1992) para conceituar o recurso, e Loke *et al.* (2002) para discussões comparativas do método.

Para inversão adota-se uma parametrização do meio geológico, isso é feito considerando-se a divisão em uma série de blocos aos quais se atribui uma resistividade (Sasaki 1992). Pensando em um contexto puramente algébrico, essa condição implica em um problema não linear; sendo assim, se recorre à inserção de parâmetros iniciais para solução do problema inverso, conforme indicado no esquema da Figura 5.5.

Assim, o problema inicial pode ser descrito como:

$$\Delta d = A\Delta p \quad (\text{Equação 5.23})$$

Na equação,  $\Delta d$  consiste no vetor que contém os ajustes,  $\Delta p$  o vetor de correção dos parâmetros e  $A$  a matriz Jacobiana das derivadas parciais das funções que associam o modelo teórico aos parâmetros do modelo ( $A_{ij} = \partial y_i / \partial p_j$ ). O objetivo aqui será otimizar  $\Delta p$  ao mínimo, que em teoria corresponde ao melhor ajuste.

Sasaki (1992) ainda apresenta a necessidade de aplicar certa constrição ao vetor  $\Delta p$  no intuito de diminuir o desajuste, para tal considera-se a seguinte relação para avaliação da rugosidade:

$$r = C\Delta p \quad (\text{Equação 5.24})$$

Onde  $C$  consiste no operador Laplaciano. Desenvolvendo-se as relações anteriores, a equação (Equação 5.23 é dada por:

$$\Delta p = (A^T A + \lambda C^T C)^{-1} A^T \Delta d \quad (\text{Equação 5.25})$$

O parâmetro  $\lambda$  consiste no fator de amortecimento, que pode ser inserido ou alterado durante o processamento do dado.

### 5.3 CONTROLE DE QUALIDADE

Após o processamento dos dados deve-se adotar recursos para avaliar a qualidade da inversão final, observando tanto sua acurácia com o contexto geológico de estudo como também a presença de ruídos ou de incoerências nos sinais processados. Aliado a isso, o controle de qualidade permeia os diversos filtros e a análise estatística dos dados levantados.

Cabe destacar que nem sempre um valor de ruído ou uma taxa de erro mais baixa necessariamente correspondem à melhor aproximação à geologia. No caso dos modelos de resistividade, um modelo que atenda a todas as pequenas variações de resistividade implica em uma quantidade excessiva de camadas e unidades da geologia, o que não corresponde em termos práticos à realidade.

Um dos recursos mais comumente aplicados para controle de erros em métodos elétricos é o RMS (*Root Mean Square*). No âmbito da disciplina de processamento de sinais digitais, o conceito é associado à potência média, em outras palavras, seria a distribuição de amplitudes necessária para que um dado sinal tenha a mesma potência de um sinal de referência. A energia total e potência média são definidas por Oppenheim & Willsky (2010), no domínio do tempo discreto, respectivamente, como:

$$E_{\infty} \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^{+N} |x[n]|^2 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 \quad (\text{Equação 5.26})$$

$$P_{\infty} \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^{+N} |x[n]|^2 \quad (\text{Equação 5.27})$$

Nota-se que a potência média ( $P_{\infty}$ ) consiste basicamente na energia total do sinal dividida pelo intervalo de tempo amostrado. De forma mais específica ao âmbito da eletrorresistividade, Sasaki (1992) utiliza da sistemática discutida no tópico anterior e define o ajuste *RMS* como:

$$S = \sqrt{\Delta d^T \Delta d / N} \quad (\text{Equação 5.28})$$

Onde  $N$  consiste no número de *data points*. Em resumo, o cálculo do *RMS* é feito com base na diferença dos parâmetros quadráticos e aplicado para os casos onde o método de inversão é o de mínimos quadrados. No caso de inversões robustas o erro é calculado apenas pela diferença absoluta (erro ABS) entre o dado coletado e o dado do modelo de inversão gerado.

## CAPÍTULO 6

### AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

---

Conduziram-se duas campanhas de campo, a primeira no intuito de avaliação preliminar da área, definindo-se área alvo da investigação geofísica e uma segunda para realização do levantamento. No âmbito da geologia ponderou-se pela escolha de uma área com continuidade lateral dos perfis de lateritas. Ao definir a área de estudo, observaram-se locais de topografia com menor desnível com objetivo de facilitar o processamento posterior minimizando a influência topográfica, além da viabilidade de extensão (comprimento e largura) das linhas de levantamento, com a finalidade de construir o modelo 3D.

Diante desse cenário ponderou-se pela escolha da área lateralmente adjacente ao Departamento de Engenharia de Minas. Além de terem sido observadas variações no material também se configura como uma porção que já passou por processo de terraplenagem.

O levantamento geofísico foi realizado no dia 08 de junho de 2019, adotando-se o método da eletrorresistividade, técnica de caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo. A escolha da técnica é fruto do interesse avaliar com maior precisão as variações laterais do meio e o arranjo em função da quantidade de pontos amostrados e resolução superficial esperada. Ainda foi utilizada solução salina no intuito de reduzir a resistência de contato do meio.

#### 6.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

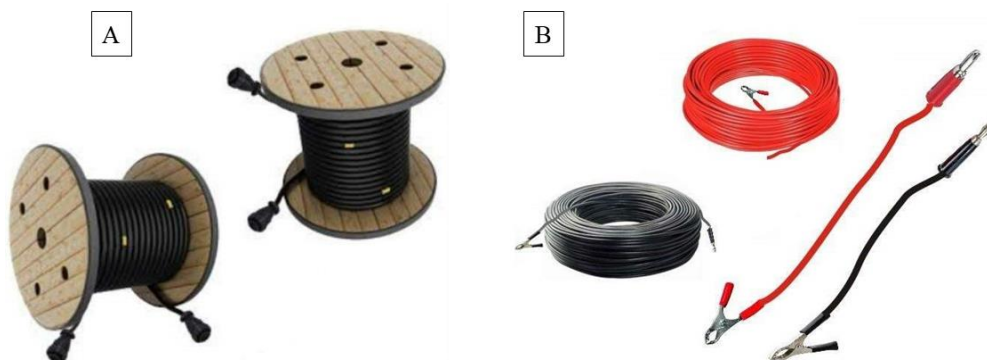
Foram utilizados no levantamento: resistímetro X5XTAL 250 Data logger (AutoEnergia) de 16 canais (Figura 6.1) em conjunto a um operador Multipoint de 32 canais (Figura 6.2); a conexão entre ambos é feita utilizando-se cabos manga (Figura 6.3) e as leituras são registradas em dois multímetros digitais (Figura 6.1); o resistímetro por sua vez é conectado a um conjunto de eletrodos de alumínio (Figura 6.4) por um cabo e adaptadores (Figura 6.3).



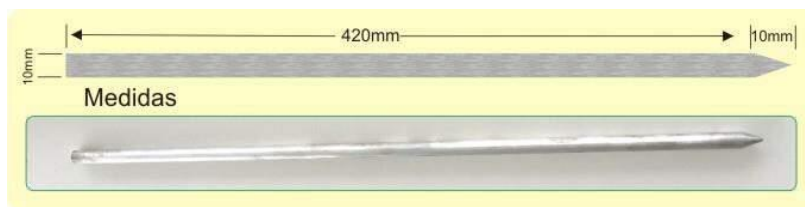
**Figura 6.1** – A) Resistímetro X5XTAL, imagens disponíveis em <http://autoenergia.com.br/Index.aspx>, acesso em 07/09/2020.



**Figura 6.2** – A) *Multipoint*, imagens disponíveis em <http://autoenergia.com.br/Index.aspx>, acesso em 07/09/2020.



**Figura 6.3** – A) Cabo manga; B) Conectores, imagens disponíveis em <http://autoenergia.com.br/Index.aspx>, acesso em 07/09/2020.



**Figura 6.4** – Eletrodos de alumínio, imagens disponíveis em <http://autoenergia.com.br/Index.aspx>, acesso em 07/09/2020.

## 6.2 LEVANTAMENTO ELETORRESISTIVO

Foram planejadas 4 linhas (Figura 6.5) paralelas entre si, com extensão de 50 metros cada uma. O espaçamento entre as linhas foi de 10 metros, totalizando uma poligonal de estudo de aproximadamente 200 m<sup>2</sup>. O espaçamento adotado para os eletrodos foi de 5 metros, nível de detalhamento que se considerou adequado à proposta do trabalho.



**Figura 6.5** – Alocação espacial das linhas levantamento geofísico. Datum horizontal SIRGAS 2000. Imagem de satélite Basemap ESRI, *shapefile* de uso e ocupação do solo da cidade de Ouro Preto, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA 2020).

Além disso, conduzidos 6 níveis de investigação com profundidade teórica (sem inversão) estimada para aproximadamente 17,5 metros. Os parâmetros de levantamento adotados encontram-se sumarizados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1** – Sumário de parâmetros de levantamento adotados.

Parâmetros do levantamento	
Espaçamento	5 metros
Arranjo	Dipolo-dipolo
Extensão das linhas	50 metros
Espaçamento entre linhas	10 metros
Nº de níveis	6 níveis
Nº de linhas	4 linhas
Erro do GPS	1 metro

A Tabela 6.2 a seguir indica as coordenadas de início e final de cada linha realizada, no sistema de coordenadas UTM, datum horizontal SIRGAS 2000:

**Tabela 6.2** – Coordenadas dos limites das linhas realizadas, UTM, SIRGAS 2000, zona 23S.

Linha	Coordenadas (m)		Altitude (m)
	X	Y	
Início linha 1	655955	7743820	1224
Final linha 1	655901	7743824	1232
Início linha 2	655951	7743815	1217
Final linha 2	655951	7743809	1219
Início linha 3	655949	7743801	1222
Final linha 3	655902	7743809	1230
Início linha 4	655953	7743791	1233
Final linha 4	655902	7743793	1231

A Figura 6.6, ilustram parte do processo de aquisição de dados, contando com a instalação dos eletrodos na área de estudo e as medições realizadas.



**Figura 6.6** – A) Medição da área com auxílio de trena para estaqueamento das posições dos eletrodos. B) Instalação dos eletrodos nos pontos demarcados com auxílio de marreta. C) Coleta de dados via resistivímetro a partir da estação de trabalho.

### 6.3 Análise exploratória de dados

Antes de conduzir a modelagem dos dados e interpretação visual da informação, o banco de dados será avaliado de forma numérica, buscando uma percepção para além do critério do analista. A ideia é que, com base nas observações de medidas de forma, dispersão e tendência, além das distribuições dos dados, seja possível nortear o processo de modelagem e integração geológica dos dados, principalmente pelo reconhecimento de eventuais dados espúrios.

Para o presente estudo foi utilizado um banco de dados relativamente pequeno, o que decorre essencialmente das dimensões da área de investigação e do método utilizado. Apesar disso, as análises foram conduzidas adotando-se rotinas para automatização dos cálculos, via Python 3.7, já que a mesma abordagem pode ser aplicada para estudos com bancos de dados mais complexos.



Para análise estatística dos dados e produção dos gráficos que constam no presente tópico foram utilizados módulos numéricos e bibliotecas para recursos visuais, como os gráficos. Entre elas destacam-se o *Numpy* (1.19.1) para cálculos envolvendo o uso de *arrays* e cálculos dos parâmetros de estatística descritiva; as bibliotecas *Matplotlib* (3.3.1) e *Seaborn* (0.10.1) foram aplicadas para construção de gráficos, com destaque para a segunda que opera de forma otimizada em relação à primeira. Ainda foi utilizada a biblioteca *Pandas*, uma das mais aplicadas em linguagem Python para o contexto da ciência de dados.

Cabe destacar, previamente, que mesmo tratando-se de um conjunto de recursos abertos, esses se mostraram muito efetivos para a análise de dados geofísicos, o que se deve principalmente à contribuição do ecossistema.

### 6.3.1 Estatística descritiva

Nessa fase, o banco de dados será observado sob perspectiva de diversos parâmetros a fim de suportar a etapa de processamento e interpretação dos produtos. Segundo Isaaks & Srivastava (1989), o conceito de estatística descritiva, pode ser categorizado entre medidas de localização, de forma e de espalhamento. A Tabela 6.3 sumariza os parâmetros levantados.

**Tabela 6.3** – Sumário de parâmetros, estatística descritiva, da amostra.

Parâmetro	Valor	Tipo
Total de Dados	132	-
Mínimo	0.060	-
Máximo	2637.600	-
Média	207.364	Localização
Mediana	3.365	Localização
25%	1.940	Localização
50%	3.365	Localização
75%	142.975	Localização
Variância	238096.758	Dispersão
Desvio Padrão	487.952	Dispersão

Observa-se pela comparação entre a discrepância da média e mediana que os dados possuem assimetria. Condição essa que é confirmada ao se observar os valores de variância e desvio padrão. De toda forma, a priori não consiste em um problema com o banco de dados que se trata de uma medida de resistividade elétrica em um material natural e não homogêneo.

Para fins de confirmar o acúmulo de baixas resistividades na amostra, foram calculadas as medidas de forma – coeficiente de assimetria e coeficiente de variação, dados respectivamente pela Equação 6.1 e pela Equação 6.2.

$$CS = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - m)^3}{\sigma^3} \tag{Equação 6.1}$$

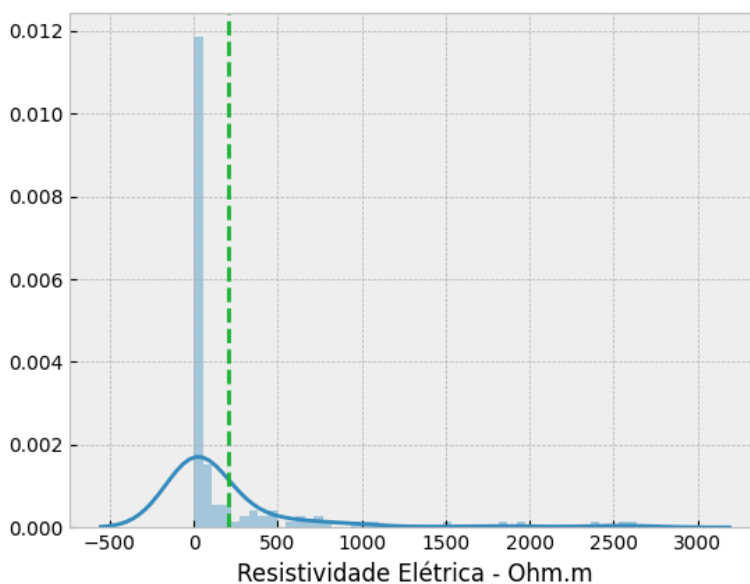
$$CV = \frac{\sigma}{m} \tag{Equação 6.2}$$

Nas equações acima  $m$  representa a média dos valores,  $\sigma$  o desvio padrão da amostra,  $v_i$  o valor da amostra e  $n$  o tamanho da amostra. Os valores resultantes para o coeficiente de assimetria e de variação encontram-se indicados na Tabela 6.4:

**Tabela 6.4** – Sumário de parâmetros para medidas de forma da amostra.

Parâmetro	Valor	Tipo
Coefficiente de Assimetria	2.000	Forma
Coefficiente de Variação	3.412	Forma

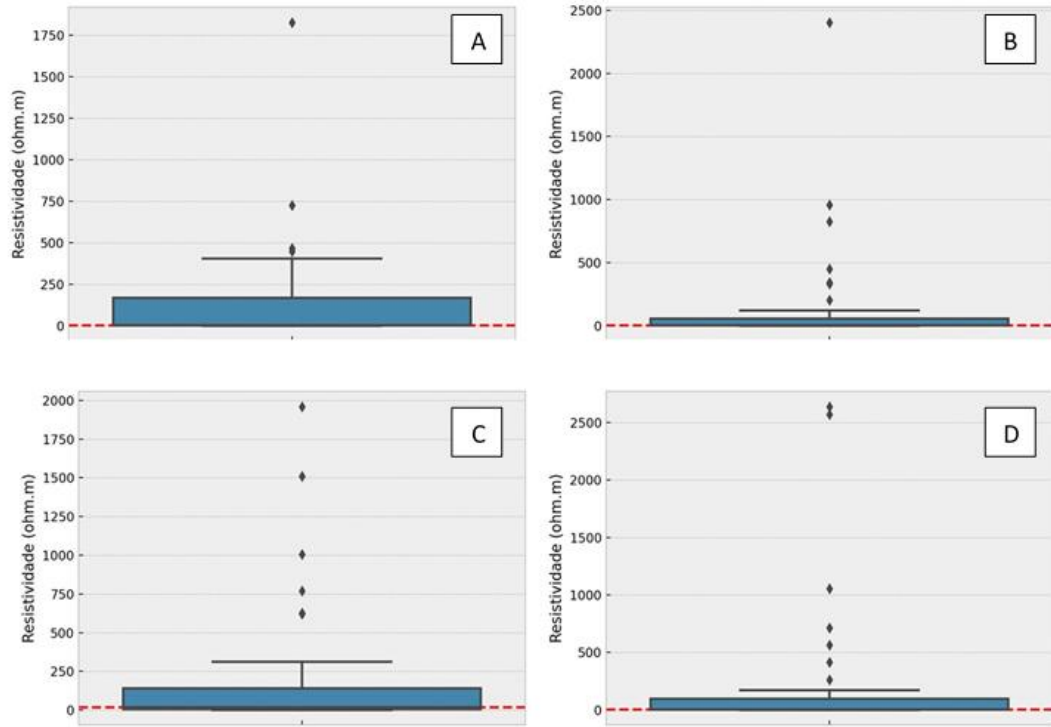
Cabe destacar que o coeficiente de assimetria tem uma boa aplicação por se tratar de uma medida portátil, uma vez que é normalizado pela média. Além disso, a amostra foi organizada na forma de um histograma, conforme apresentado na Figura 6.7 – a linha verde tracejada indica a posição da média.



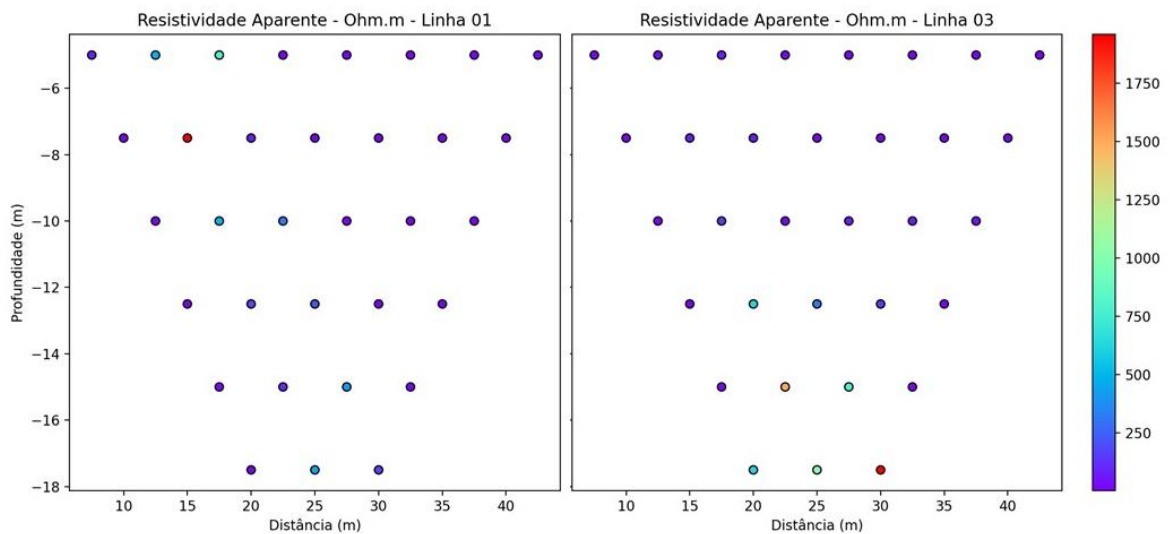
**Figura 6.7** – Histograma com distribuição das resistividades para todo o banco de dados.

Fica evidente a partir das avaliações até aqui conduzidas que o banco de dados apresenta forte assimetria, concentrando dados essencialmente na zona de baixa resistividade elétrica. Nesse sentido, é esperado que o processamento para inversão passe por certa dificuldade no sentido de controle de ruídos e aproximação para interpolação dos dados – dados com maior variância aumentam a chance de erro em processos de estimativa, interpolação e extrapolação, uma vez que a condição dificulta a estimativa precisa nos locais onde há ausência de informação.

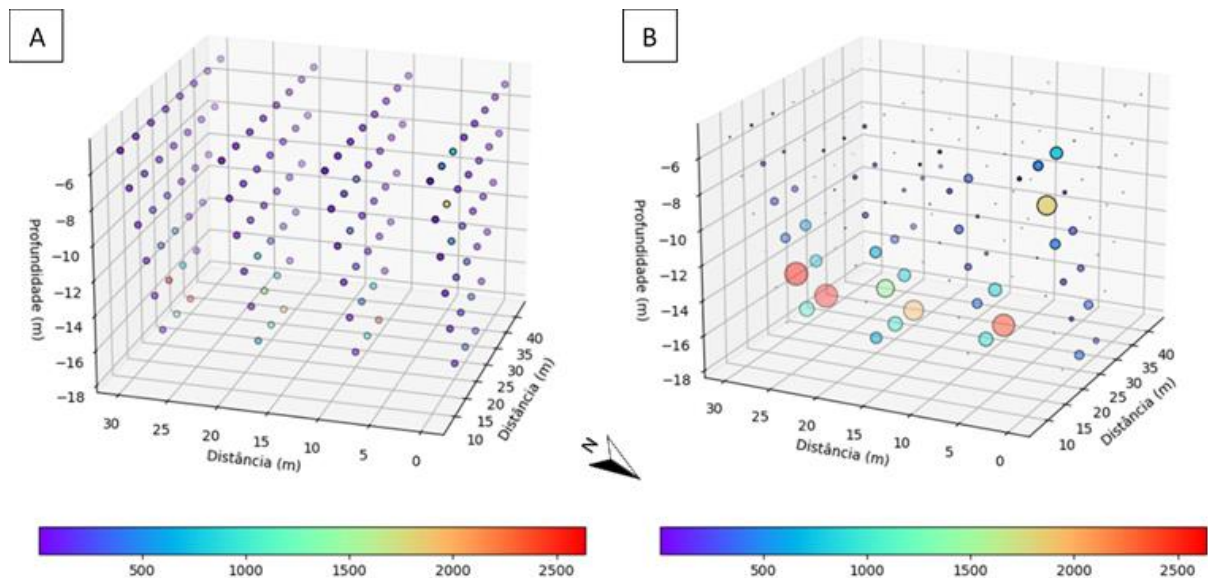
No intuito de se explorar mais a fundo a amostra, buscou-se entender se as baixas resistividades estavam alocadas em linhas específicas do levantamento ou se essa se tratava de uma resposta distribuída por toda a área de investigação. Nesse sentido, foram construídos gráficos *boxplot* para cada uma das linhas de levantamento (Figura 6.8) e posteriormente os dados foram alocados em ambiente 2D (Figura 6.9) e 3D (Figura 6.10) de forma a permitir a visualização das zonas de resistividade discrepante.



**Figura 6.8** – Gráfico *boxplot* para cada linha de levantamento geofísico, correspondendo às letras A, B, C e D, respectivamente as linhas 01, 02, 03 e 04. Em cor vermelha e tracejada destaca-se a linha da mediana.



**Figura 6.9** – Gráfico relacionando intensidade da resistividade elétrica medida com a profundidade de investigação para as linhas 01 e 03. Valores em Ohm.m.



**Figura 6.10** – Integração 3D dos pontos amostrados no levantamento por eletrorresistividade com escala de cores em Ohm.m. A imagem B pondera o tamanho do ponto pela intensidade da resistividade, enquanto a imagem A apenas pela escala de cores.

Com o objetivo de ponderar a análise exploratória dos dados, adotando-se por premissa uma eventual variação na resposta física da geologia de acordo com a profundidade, avaliou-se os dados extremos da amostra, ponderando pelo nível de investigação (N – ver Figura 5.4).

Para o reconhecimento de valores extremos (*outlier*), adotou-se uma vez e meia a faixa interquartil (FIQ) (Magalhães & Lima 2013). Além disso, buscou-se pelos valores que extrapolaram duas vezes o desvio padrão para cada nível de investigação.

A Tabela 6.5 sumariza os parâmetros para cada nível de investigação.

**Tabela 6.5** – Sumário de parâmetros por nível de investigação.

Nível	Parâmetro	Valor
1	Desvio Padrão	147,07
	FIQ	17,90
2	Desvio Padrão	345,70
	FIQ	41,06
3	Desvio Padrão	130,84
	FIQ	83,17
4	Desvio Padrão	198,39
	FIQ	198,16
5	Desvio Padrão	715,51
	FIQ	726,18
6	Desvio Padrão	940,89
	FIQ	1170,65

A partir das análises gráficas e numéricas dos dados, apresentadas, fica evidente que as baixas resistividades foram predominantes no levantamento, não sendo resultado, por exemplo, de uma concentração de dados em uma dada linha – ou seja, espera-se que sejam produto essencialmente das particularidades do meio geológico.

Ademais, é perceptível que, diante dos parâmetros utilizados, uma quantidade significativa de dados extremos é definida. Cabem aqui diversas avaliações sobre a melhor tratativa a essas informações. Essa discussão será abordada nos tópicos seguintes à luz tanto da abordagem matemática/física dos parâmetros, como também das percepções acerca da geologia investigada.

Esse conjunto de informações orienta o analista nas etapas seguintes de processamento dos dados, tendo em vista que já foi conduzida uma fase para garantia da coerência do banco de dados e além disso, foi mapeado o caráter geral da distribuição de resistividade no meio.

#### **6.4 Inversão de dados**

De acordo com o debate da literatura supracitado, a inversão de dados para eletrorresistividade tem uma diversidade de abordagens possíveis, contudo, destacam-se como metodologias consagradas na literatura a inversão por mínimos quadrados e a inversão robusta.

Portanto, foram conduzidos testes usando as duas abordagens (mínimos quadrados e robusta), além da possibilidade de filtragem dos valores extremos. Após observados os resultados de cada uma das análises adotou-se o produto considerado como mais adequado, dada a geologia esperada para o local. Será apresentada a análise conduzida para a linha 01 para fins de ilustração do processo, para as demais apenas o produto escolhido.

Cabe ressaltar que a definição de metodologias para filtragem de dados é de escopo aberto, estando muitas vezes condicionada à percepção do analista e do contexto geológico associado. De forma geral, é possível salientar metodologias, como Borges (2007), que toma por regra a exclusão de dados que ultrapassam duas vezes o desvio padrão da amostra.

Vale ressaltar no banco de dados objeto do estudo, tem-se uma quantidade relativamente baixa de dados por seção, logo, a exclusão de dados implica na perda de quantidade considerável de informação. Ainda, como discutido na fase de análise exploratória de dados, tem-se uma distribuição assimétrica e concentrada nas baixas resistividades, o que naturalmente tende a induzir a uma exclusão de dados de resistividades mais elevadas, que podem ser significativas para representatividade da geologia da região.

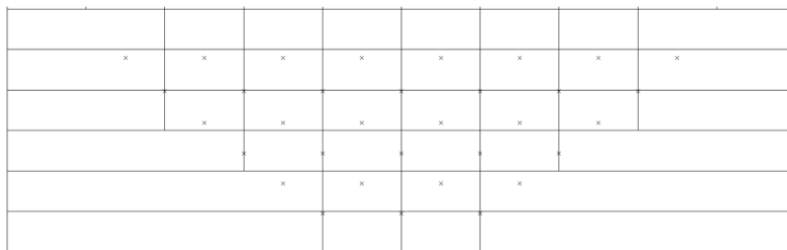
Dessa forma, os tópicos seguintes vão apresentar os produtos das inversões no *software* RES2DINV 3.53, avaliando-se métodos de inversão, bem como respectivos erros associados. Ao final,

será apresentado o produto que se entende como mais adequado ao modelo, bem como as justificativas para a escolha. O produto definido será aplicado para o modelo 3D e integração com a geologia.

### 6.4.1 Escolha de parâmetros

Inicialmente, será detalhado um pouco sobre a escolha dos parâmetros de inversão, como a escolha pelo fator de amortecimento (*damping factor*), distribuição de blocos, quantidade de iterações e método de inversão.

A Figura 6.11, retirada do *software* de inversão, ilustra a disposição dos blocos para a seção 01, observa-se que foram definidos blocos de tamanhos iguais a independender da profundidade. Para todas as linhas a adoção desse parâmetro para distribuição dos blocos gerou uma relação de 33 pontos de dados, e 34 blocos. A escolha foi ponderada em dar visibilidade a cada ponto amostrado, e não tanto à suavização da seção final.

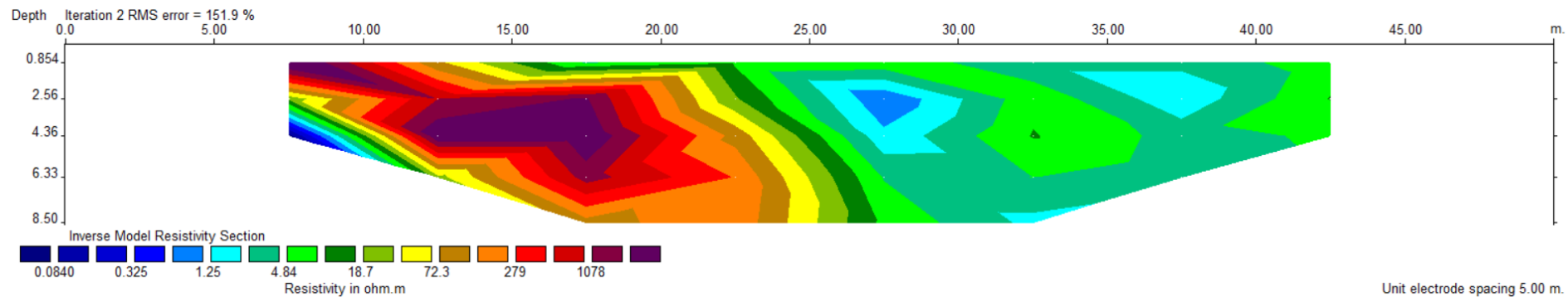


**Figura 6.11** – Modelo de distribuição de blocos para inversão dos dados.

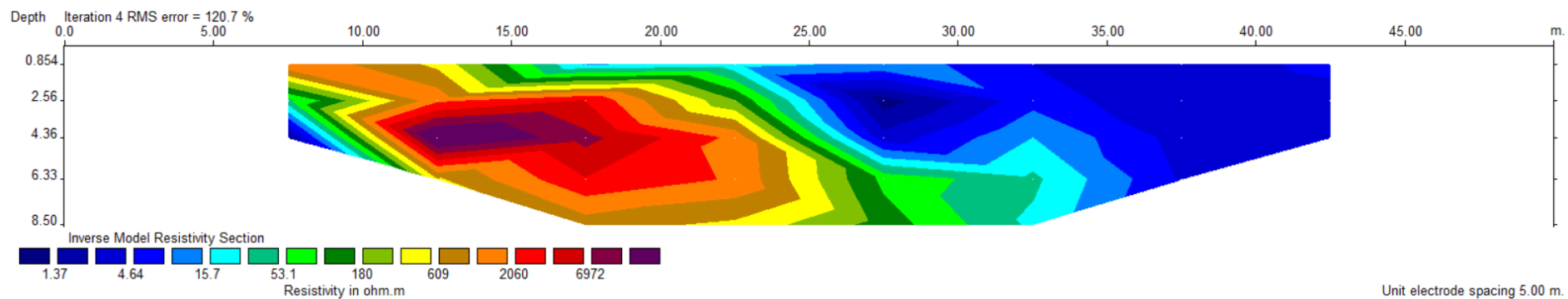
No que tange ao *damping factor*, por sugestão da própria interface do *software* deve-se adotar valores iniciais entre 0,25 e 0,05, enquanto que para o valor mínimo esse deve ser entre 0,10 e 0,01. São recomendados ainda, valores mais elevados para dados ruidosos.

Diante dos resultados da análise exploratória entende-se que a variabilidade de resistividades pode refletir em maior quantidade de ruídos calculados. Foram conduzidos testes, em que se observou instabilidade (divergência do ajuste) no algoritmo para valores muito baixos. Por fim adotou-se os limites das faixas sugeridas pelo *software*.

As Figuras 6.12 e 6.13 ilustram respectivamente a inversão com valores de *damping factor* no limite inferior e superior da faixa sugerida. No primeiro caso, após duas iterações, o valor de resistividade máxima calculada é 60 mil vezes superior ao mínimo.



**Figura 6.12** – Seção invertida com valores baixos de *damping factor* – Linha 01.



**Figura 6.13** – Seção invertida com valores altos de *damping factor* – Linha 01.

Os parâmetros do tipo de inversão (tratados aqui como mínimos quadrados ou robusta) e da quantidade de iterações também foram avaliados. No que se refere ao número de iterações a interface do *software* coloca como pouco aplicável a quantidades acima de dez, em contrapartida, apresenta que usualmente a convergência ocorre entre 4 e 6 iterações (Locke 2004). Assim, foi estabelecido como critério de convergência ao menos quatro iterações e uma taxa de variação do RMS abaixo de 5%.

Em relação ao tipo de inversão, observou-se que:

1. a inversão robusta retornou, para o caso da linha 01, um RMS mais elevado;
2. a inversão robusta indicou uma variação abrupta e verticalizada dos níveis de resistividade;
3. a inversão por mínimos quadrados retornou uma seção com maior variabilidade lateral;
4. ambos os casos retornaram elevados níveis de RMS;



Os resultados das inversões são ilustrados na Figura 6.14, inversão por mínimos quadrados, e Figura 6.15, inversão robusta:

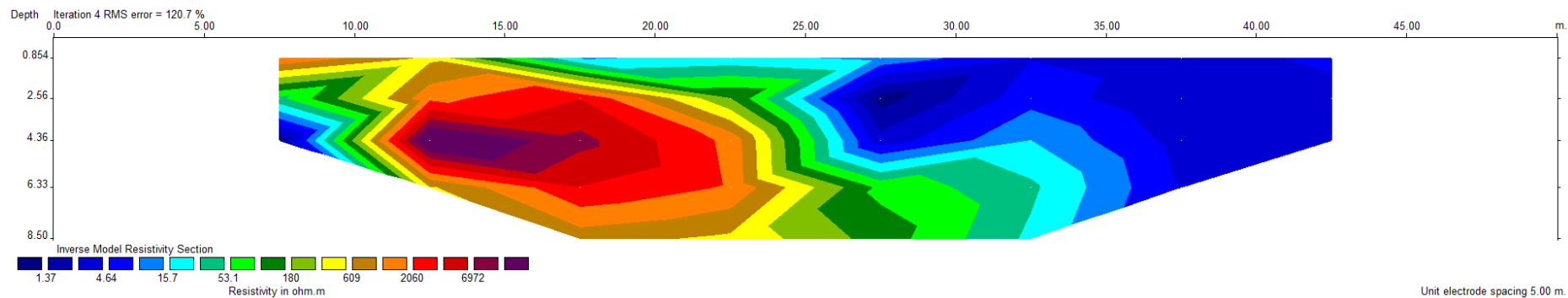


Figura 6.14 – Seção invertida por mínimos quadrados, 4 iterações – Linha 01.

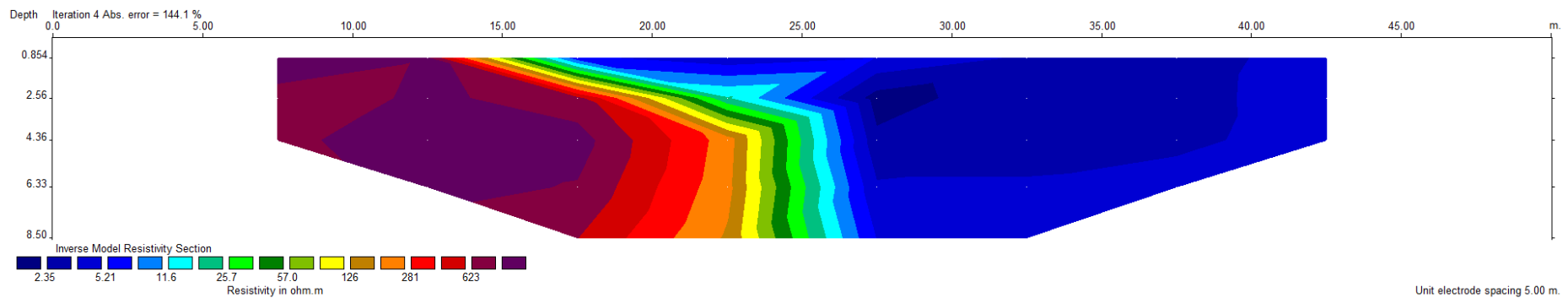


Figura 6.15 – Seção invertida por método de inversão robusta, 4 iterações – Linha 01.

Diante das discussões conduzidas e de todo o arcabouço de conhecimento construído nas fases de revisão bibliográfica, bem como as observações de campo, conduzidas nesse e em outros trabalhos, serão adotadas as seguintes percepções para escolha do fluxo de inversão:

1. distribuição de blocos de forma homogênea a independer da profundidade;
2. *damping factor* elevado no intuito de convergir o algoritmo diante da variabilidade de resistividades amostradas;
3. limite de quatro iterações por seção, buscando-se uma escolha ponderada entre a convergência da inversão e concomitantemente evitar a construção de produtos puramente matemáticos;
4. optou-se pela inversão por mínimos quadrados, o que ao entendimento do analista representa de forma mais condizente o contexto geológico investigado, observação tomada principalmente em função dos trabalhos já registrados na área.
5. ponderou-se por não filtrar os dados pelo o tamanho do espaço amostral disponível e focar as discussões nas possíveis causas geológicas dos resultados.

#### 6.4.2 Seções invertidas

Dados os parâmetros estabelecidos anteriormente, os produtos das quatro seções levantadas são sumarizados nas Figuras 6.16 a 6.19:

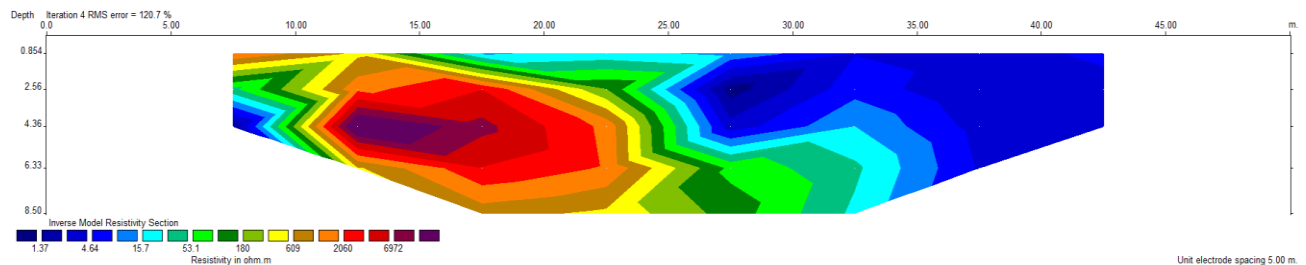


Figura 6.16 – Linha 01 invertida.

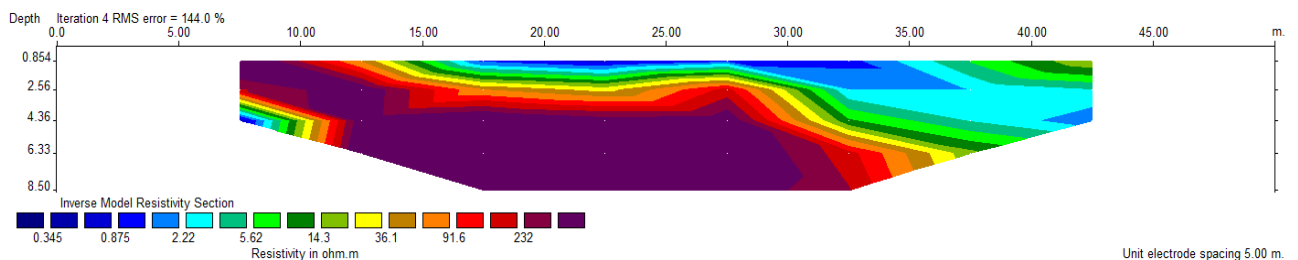
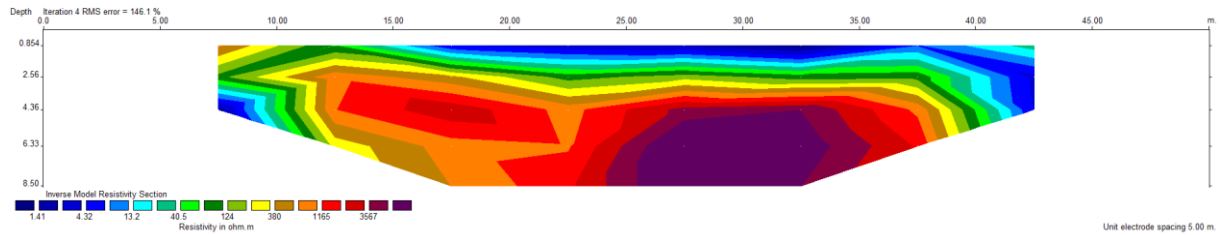
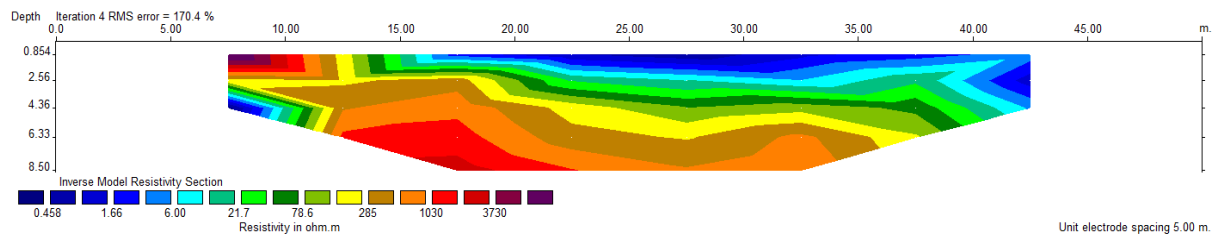


Figura 6.17 – Linha 02 invertida.



**Figura 6.18** – Linha 03 invertida.



**Figura 6.19** – Linha 04 invertida.

A Tabela 6.6 sumariza o erro RMS por seção.

**Tabela 6.6** – Sumário de erros RMS por seção.

Linha	RMS (%)
1	120,7
2	144,0
3	146,1
4	170,4

A profundidade máxima alcançada nas seções após inversão foi de 8,5 metros. O range de resistividades ficou entre 0,33 e 32007,9 Ohm.m – cabe destacar que os valores máximos de resistividade são elevados e pouco esperados para materiais naturais, se tratando assim de um produto da inversão.

## 6.5 Modelagem espacial dos dados

Após inversão dos dados levantados, as informações foram organizadas em um banco de dados e analisadas no *software* Leapfrog Geo, versão 5.0 (Seequent). A aplicação da ferramenta teve por intuito avaliar tridimensionalmente o produto gerado.

Primeiramente, o banco de dados foi preparado de acordo com as especificações do *software* e posteriormente os pontos foram inseridos no modelo, conforme Figura 6.20. Adotou-se para tal a mesma escala de cores geralmente adotada para estudos geofísicos no *software* Oasis Montaj 9.8.

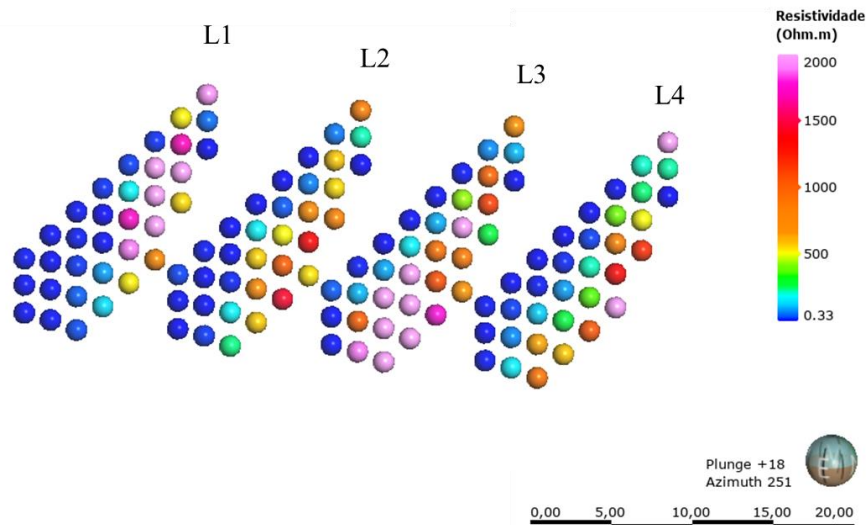


Figura 6.20 – Pontos de resistividade plotados em ambiente 3D utilizando o Leapfrog Geo (5.0).

Uma vez inseridos os pontos, procedeu-se com a modelagem numérica para interpolação das seções. Dessa forma foi definido o limite (*boundary*) do interpolador (Figura 6.21):

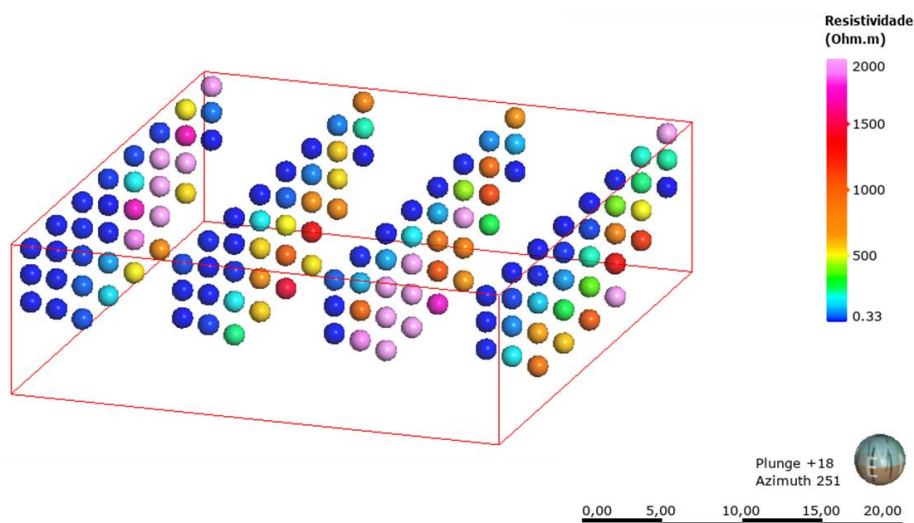


Figura 6.21 – Caixa definindo limites do modelo de interpolação dos dados.

Por padrão a ferramenta utiliza de interpoladores que partem de um elipsoide de busca por amostras. Segundo Isaaks & Srivastava (1989), a adoção desse recurso é comum para finalidades de estimativa, sendo baseado em definir a contribuição de um dado valor para a vizinhança desse registro. Logo, é importante a compreensão do variograma das amostras com finalidade essencialmente de compreender a anisotropia da informação/material de estudo.

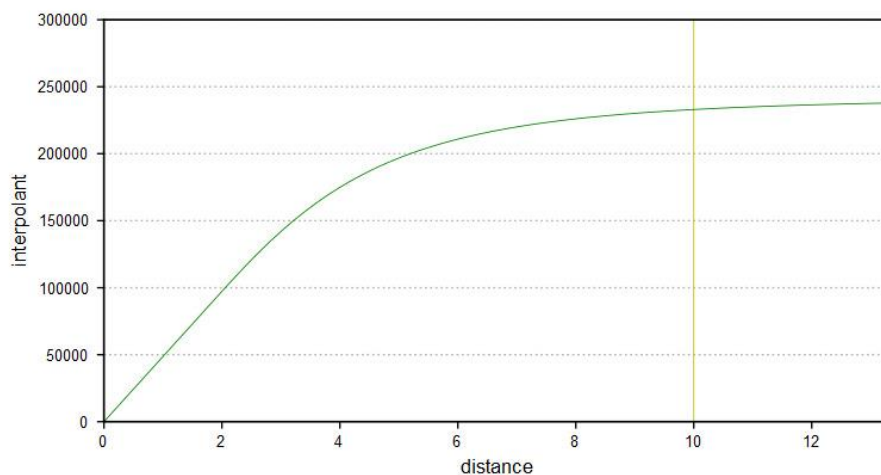
Em vista disso, foram testados diferentes cenários para construção do modelo de resistividades. Cabe destacar que os bancos de dados por levantamentos de eletroresistividades já são criados com certo viés, uma vez que naturalmente a resolução das informações diminui com o aumento da

profundidade, além, de que a geometria trapezoidal observada nas seções levantadas comumente implica em ausência de amostras em parte da “caixa” definida como limite do modelo.

Para ambos cenários se considerou os parâmetros listados abaixo de acordo com as definições estabelecidas nos manuais do *software* (Seequent 2019):

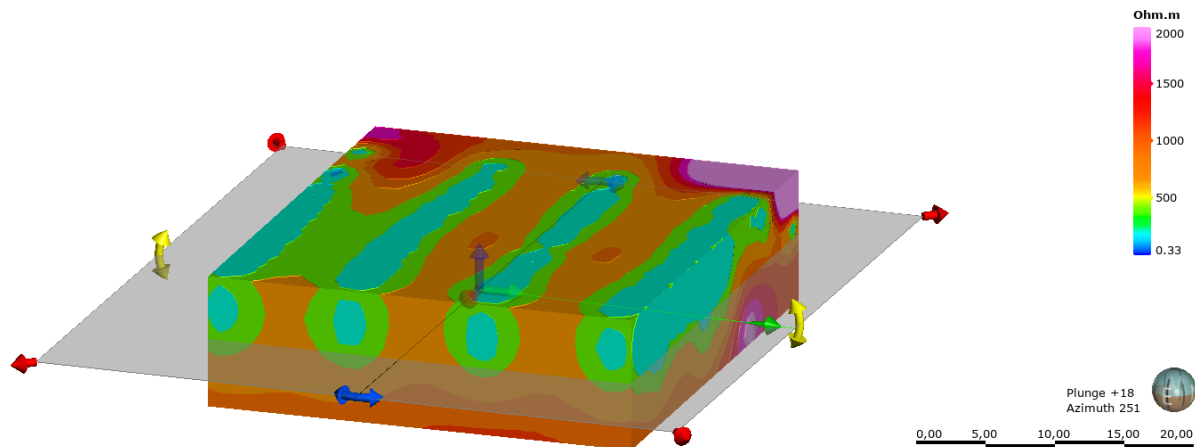
- *Sill* (limiar) – indica o limiar da função de interpolação esferoidal, define o valor a partir do qual não se tem mais correlação entre os valores. Valor inserido igual à variância do dado.
- *Base range* – parametriza a distância de busca do algoritmo, foi definido com valor 10, correspondendo à distância entre duas seções.
- *Drift* – define o comportamento do interpolador na ausência de amostragem. Para esse caso foi escolhida a opção “constante”, a qual tende os valores para a média. Entende-se que diante dessa escolha tem-se um prejuízo maior aos valores de resistividade intermediária, enquanto os de baixa e alta resistividade são preservados. Justifica-se a escolha do parâmetro pela expectativa de uma grande relevância do comportamento hídrico ao entendimento do material investigado.

A Figura 6.22 indica o semi-variograma aplicado para ambos modelos.



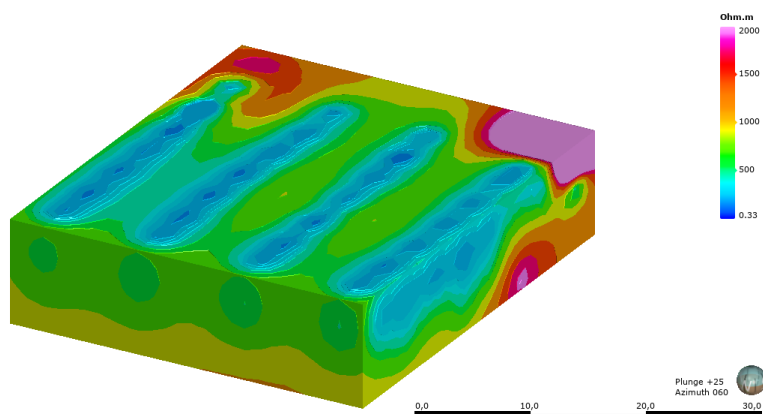
**Figura 6.22** – Semi-variograma aplicado para os interpoladores.

As diferenças entre os cenários avaliados consistem na tendência estipulada para a busca de dados. No primeiro caso não foi definida nenhuma tendência ao interpolador (1, 1, 1), sendo adotado valor 1 para as três direções de busca. No segundo cenário considerou-se um plano de referência e peso três para a busca por valores no eixo máximo (3,2,1) (Figura 6.23).

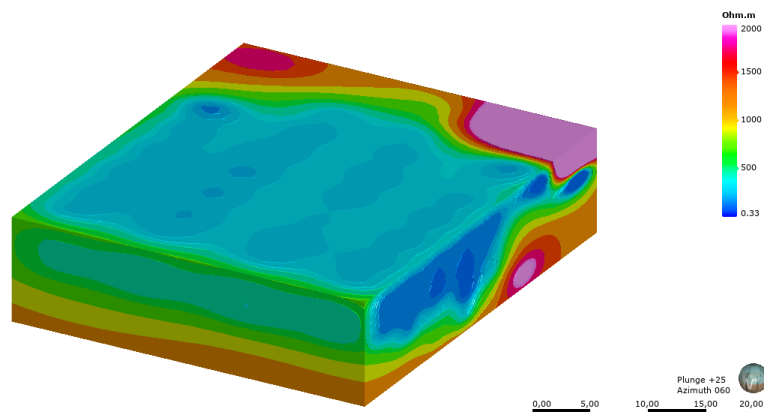


**Figura 6.23** – Plano de referência para definição do *trend* de busca para norte. O direcional verde indica o eixo máximo.

Assim, tem-se nas figuras (Figura 6.24 e Figura 6.25) os produtos de cada interpolação. É perceptível que no primeiro cenário (Figura 6.24) tem-se um viés decorrente da densidade de dados ao longo das linhas de levantamento.

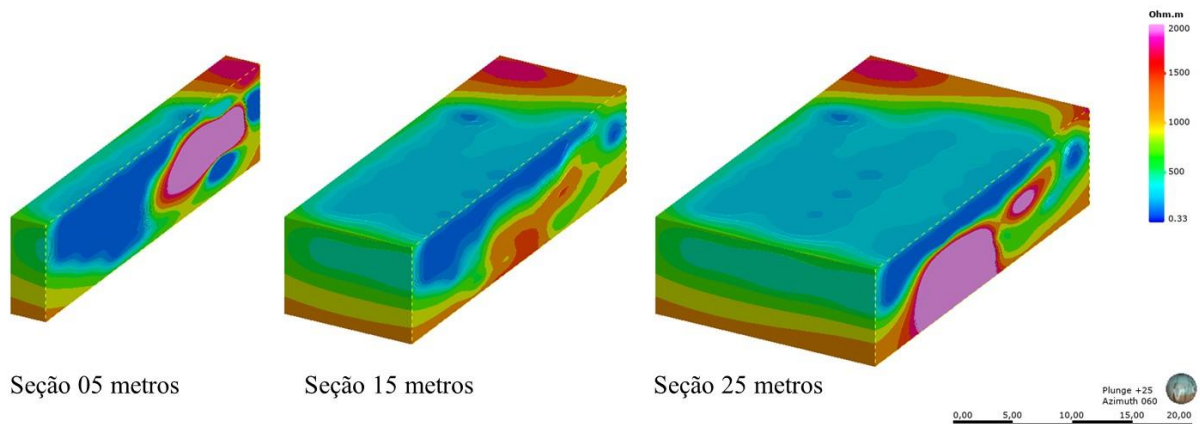


**Figura 6.24** – Interpolador de busca sem tendência.



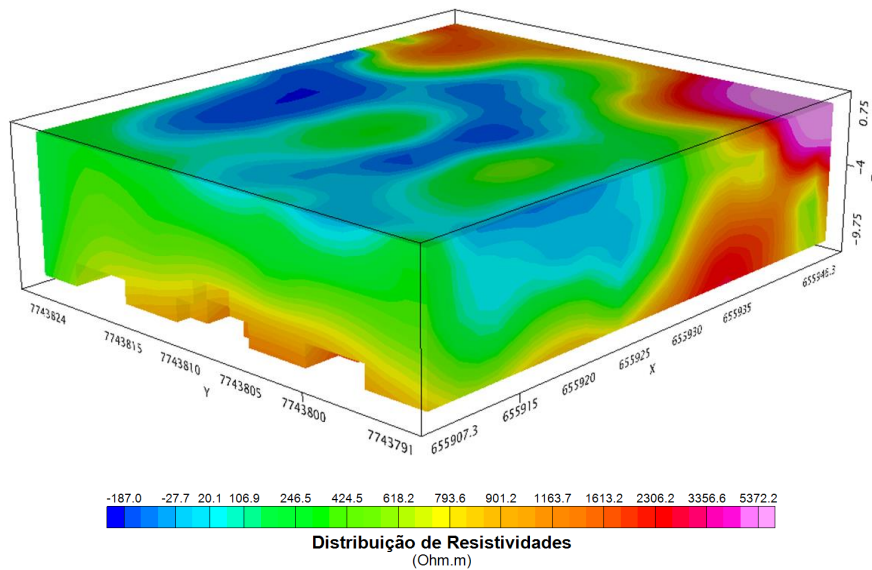
**Figura 6.25** – Interpolador de busca com tendência.

A Figura 6.26 apresenta *slices* do modelo interpolado:



**Figura 6.26** – Cortes paralelos às linhas de levantamento.

Para fins de comparação, os dados ainda foram interpolados, utilizando o recurso *Voxel* e a ferramenta de krigagem do *software* Oasis Montaj 9.8 (Figura 6.27). Aplicou-se a ferramenta de suavização para visualização dos dados.



**Figura 6.27** – Interpolação de resistividades pelo Oasis Montaj (Voxel).

Conduzindo uma análise descritiva das distribuições de resistividade pela integração construída no Oasis Montaj, partindo do modelo tridimensional, definiu-se agrupamentos de resistividades em zonas de baixa – ZBR (até 100 Ohm.m), alta – ZAR (acima de 1600 Ohm.m) e resistividades intermediárias, separadas aqui em dois grupos, valores entre 100 e 500, e valores entre 500 e 1600. Nas fases seguintes do trabalho, esse agrupamento será apresentado com refinamento teórico e justificativas geológicas do produto.



A Figura 6.28 ressalta o espectro geral de cores com as distribuições de valores do modelo após krigagem.

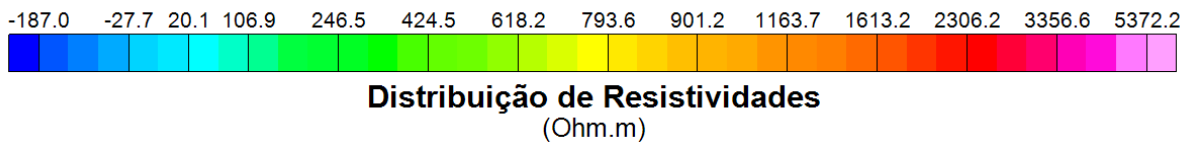


Figura 6.28 – Agrupamento de níveis de resistividade.

As Figuras 6.29 a 6.32 ilustram os conjuntos de visadas para cada um dos limites de resistividades agrupados. Essa primeira abordagem, descritiva, será conduzida no intuito de se reconhecer as distribuições espaciais dos níveis de resistividade, sendo refinadas as interpretações em um segundo momento.

A análise descritiva foi conduzida diretamente sobre os dados já integrados tridimensionalmente pois nesse caso o produto encontra-se normalizado, ou seja, os agrupamentos de resistividades (e cores) se aplicam a todas as seções, o que se espera que facilite o acompanhamento da discussão.

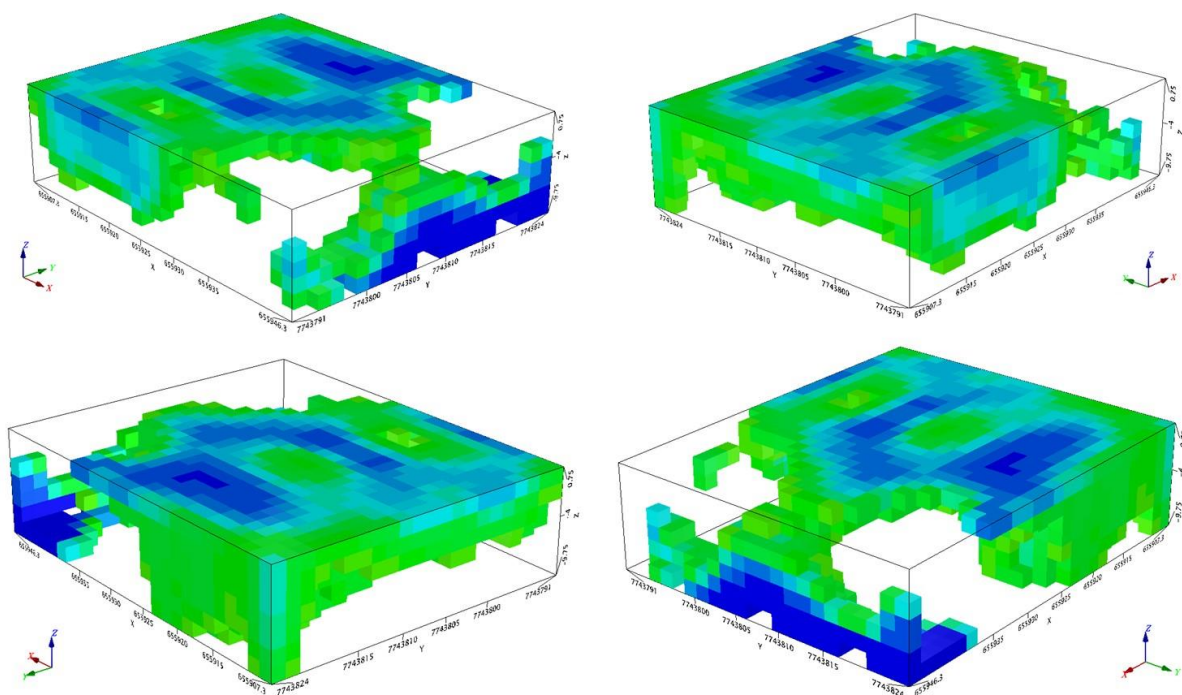
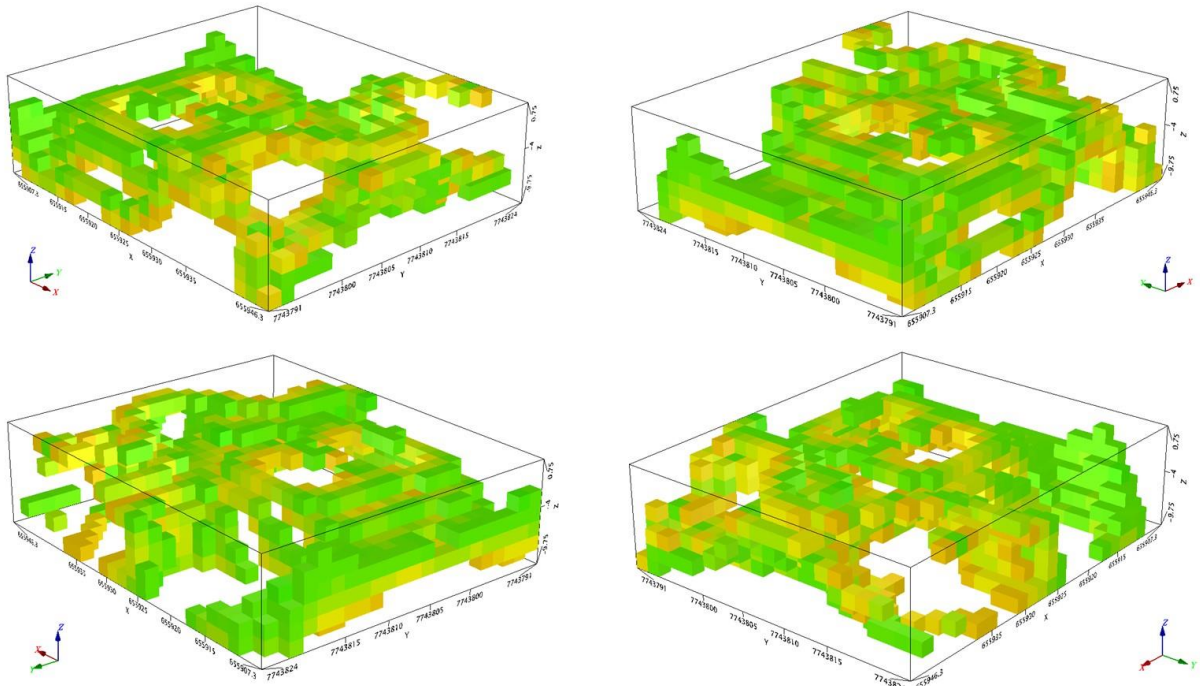
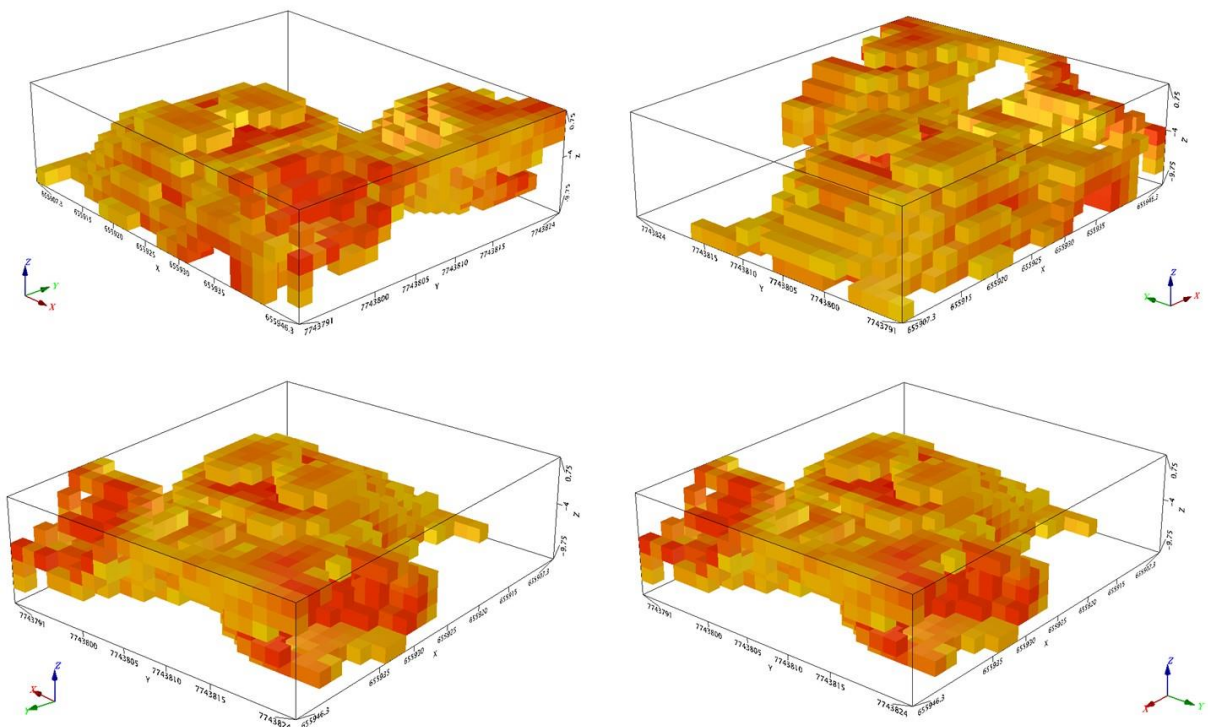


Figura 6.29 – Zonas de baixa resistividade, até 100 Ohm.m.





**Figura 6.30** – Primeira classe de zonas de resistividade intermediária, entre 100 e 500 Ohm.m.



**Figura 6.31** – Segunda classe de zonas de resistividade intermediária, entre 500 e 1600 Ohm.m.

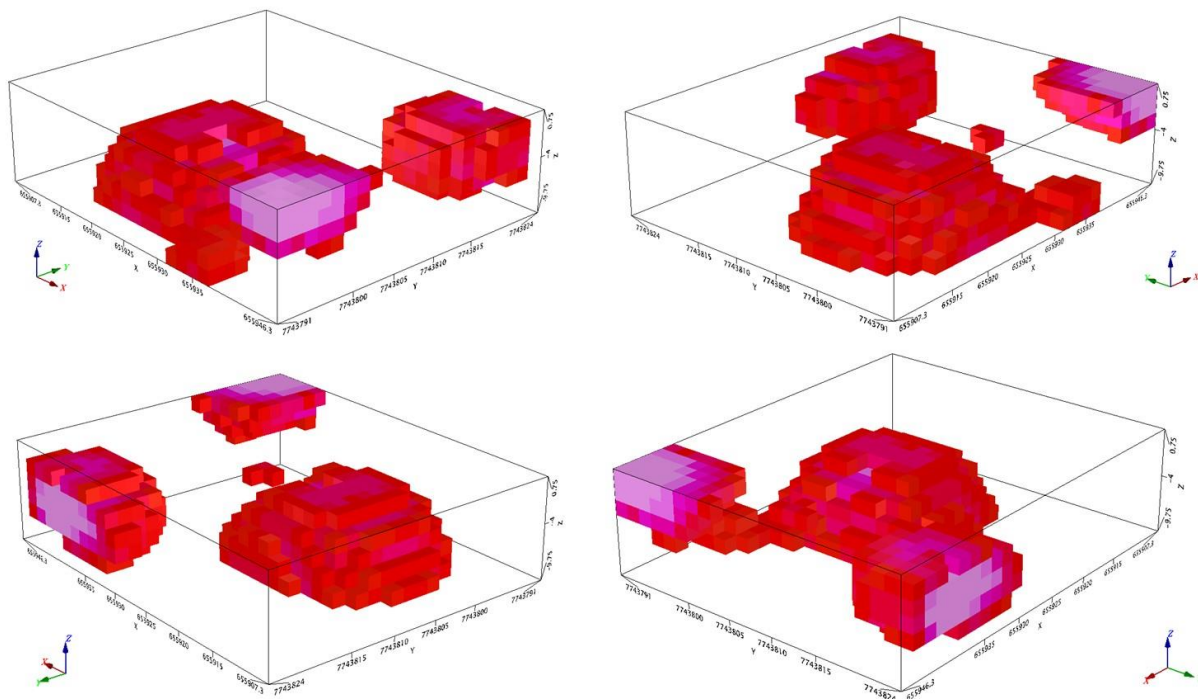


Figura 6.32 – Zonas de alta resistividade, superiores a 1600 Ohm.m.

Observa-se boa aderência entre as interpolações conduzidas em ambos *softwares*, havendo consistência entre os resultados gerais observados. A interpolação conduzida via Leapfrog, essencialmente pelos parâmetros escolhidos, resultou em uma integração maior das áreas de baixa resistividade.

Na presente abordagem, que se ateu exclusivamente a uma análise geofísica ponderou-se pelo uso dos produtos gerados no Oasis Montaj. Contudo, a interoperabilidade entre as plataformas, sendo que muitas vezes a segunda ferramenta pode ser um forte recurso em casos de integração de modelos geológicos e visualizações diversas.

## CAPÍTULO 7

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

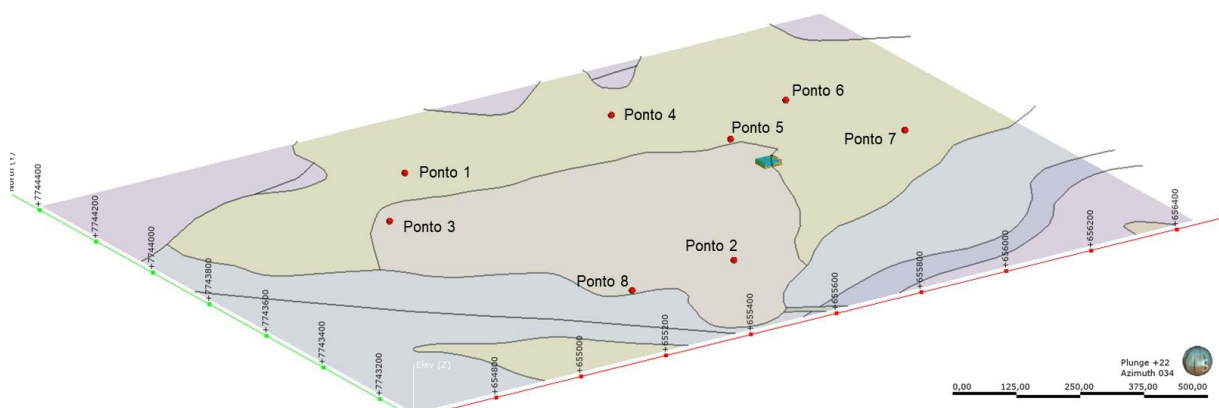
Para o estudo não foi possível realizar investigações diretas do material, o que seria o cenário mais adequado à integração entre os dados geológicos e geofísicos. Via de regra tem-se que a amostragem direta é pontual (sondagens, ensaios, entre outros), e nesse contexto a geofísica é aplicada com caráter de integração espacial da informação. Diante dos dados disponíveis para o cenário atual, a geofísica será aplicada com um intuito de análise primária, podendo nesse contexto ser uma forte ferramenta ao direcionamento de estudos e investigações diretas.

Dadas as possibilidades de ação apresentadas, a interpretação dos dados geofísicos será conduzida aqui com base em dados de mapeamentos regionais (Baltazar 2005), e principalmente pela literatura relacionada à caracterização local das cangas (Assis 2018). Além disso, eventuais considerações observadas em campo serão levadas em consideração, como particularidades observadas durante o próprio levantamento.

Analisando-se primeiramente o produto do mapeamento geológico de Baltazar (2015), em escala 1:50.000, refinados por Assis (2018). Percebe-se que a autora contribuiu para o detalhamento da área caracterizando com grande detalhe pontos amostrais e definindo as transições de litologias.

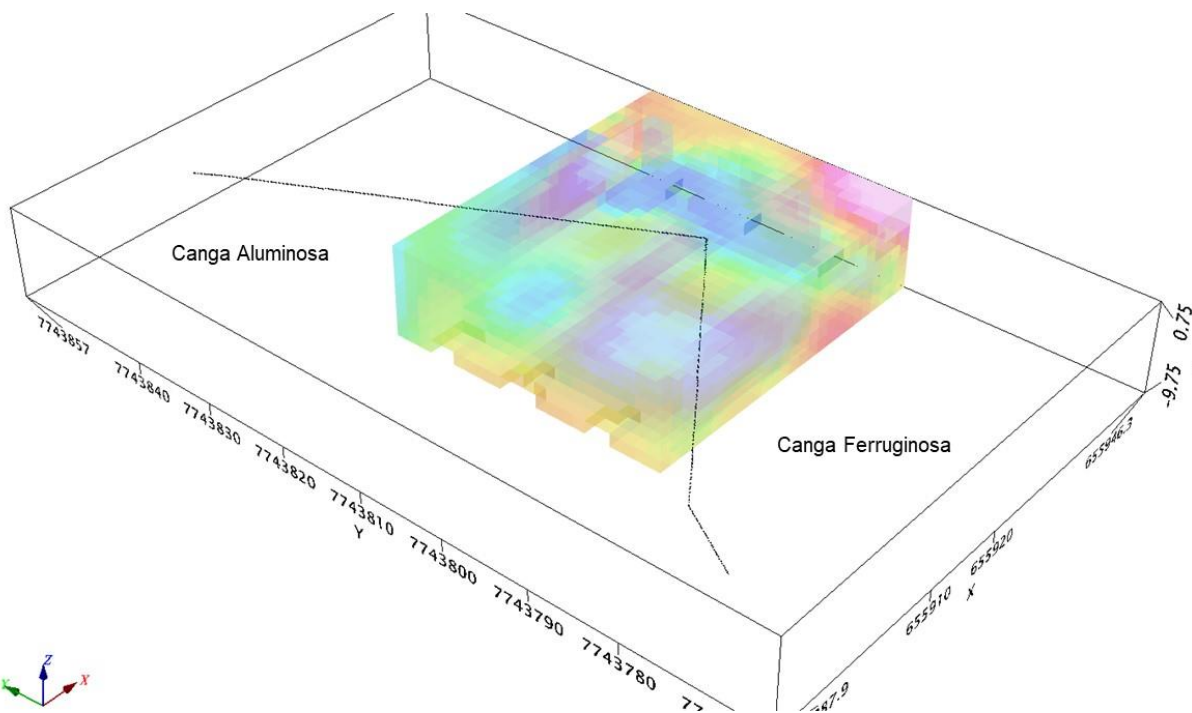
Na integração construída pela autora tem-se que as amostras mais próximas ao levantamento consistem nos pontos 5, 6 e 7, os quais têm a particularidade de estarem alocados em lateritas ferruginosas. Nesse sentido, percebe-se uma necessidade de inferência da transição entre os tipos de laterita, dada a posição do Ponto 5 ser relativamente distante da área de investigação geofísica.

A Figura 7.1 indica os pontos amostrados e analisados por Assis (2018), apresentados no mapa da Figura 4.4 - capítulo de Geologia Local, e sua disposição espacial em relação ao modelo geofísico.



**Figura 7.1** – Integração do modelo geofísico com alocação dos pontos levantados em Assis (2018).

A Figura 7.2, por sua vez, destaca o contato inferido por Assis (2018) em relação ao levantamento geofísico.



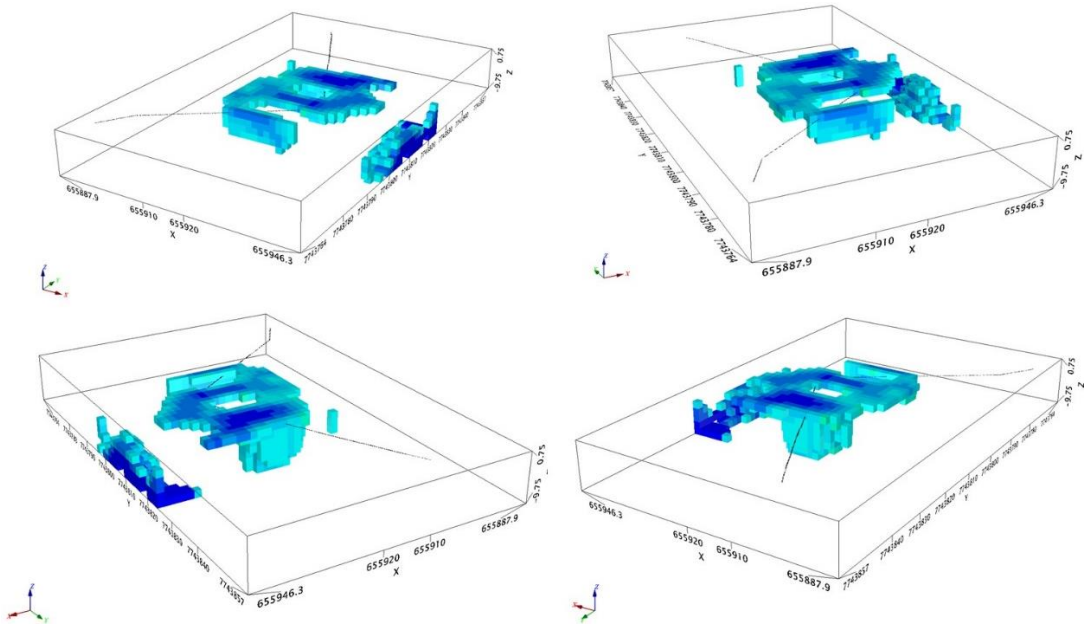
**Figura 7.2** – Disposição espacial e em relação à geologia do modelo geofísico.

Na impossibilidade de obtenção de dados de investigação direta para calibração das respostas de resistividade, os limites foram agrupados, inicialmente com intuito de se definir zonas com a maior expectativa de existência de umidade até a zonas mais resistivas, onde, a priori, não se espera presença tão significativa de água.

Diante dessa proposta, as respostas de resistividade foram agrupadas tomando-se por base as morfologias esperadas e descritas em campo para as fácies de cangas presentes na área de estudo. Assim, cabe enfatizar alguns pontos, o primeiro é que de forma genérica as lateritas da área, tanto aluminosas quanto ferruginosas apresentam fácies que se distribuem em geometrias tabulares.

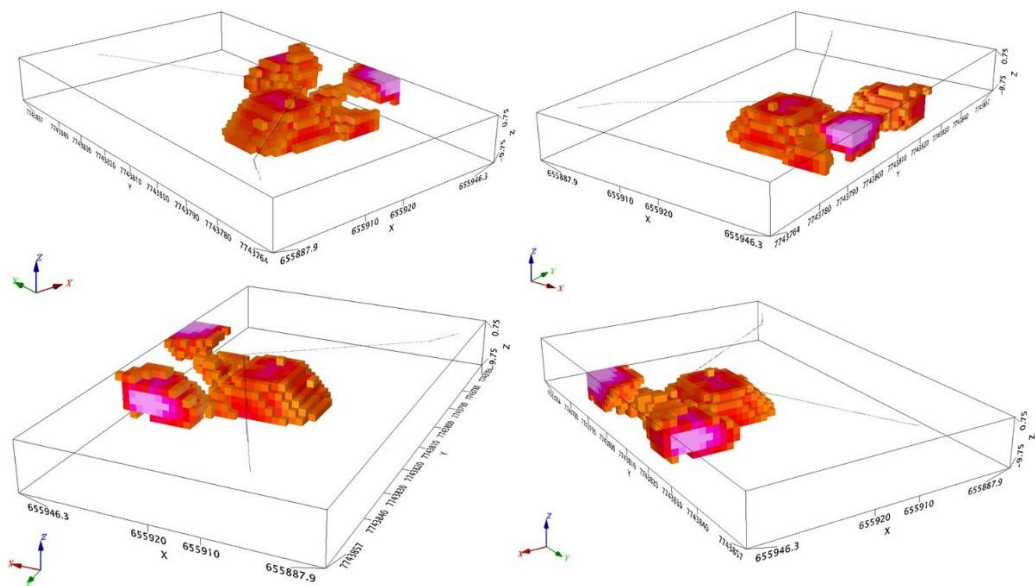
Dessa forma, o primeiro nível agrupado durante a modelagem consiste nos dados de resistividade interpolada por krigagem de até -100 (Figura 7.3). Essa unidade foi definida basicamente como uma unidade de baixa resistividade e morfologia tabular concentrada na parte superior do modelo. Esse conjunto de resistividades encontra-se mais fortemente concentrada na porção aluminosa, sendo ainda que na porção ferruginosa esse nível de resistividade encontra-se essencialmente na porção mais superficial amostrada.





**Figura 7.3** – Disposição espacial de baixas resistividades em relação ao contato geológico da literatura.

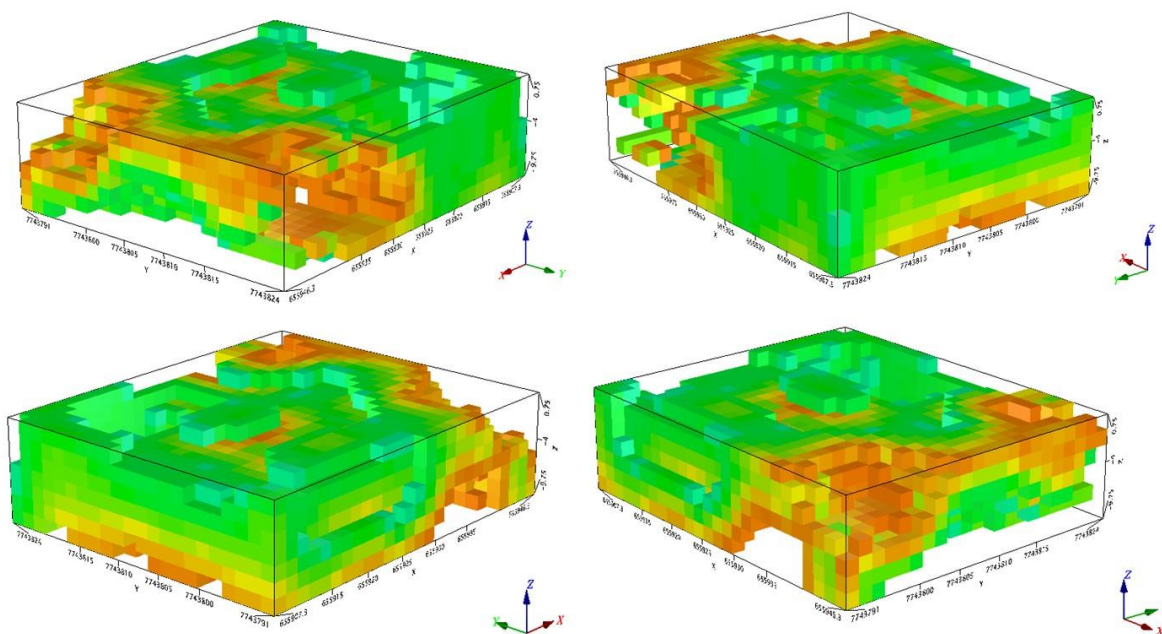
O segundo nível de resistividades delimitadas foi baseado no agrupamento das porções mais resistivas (acima de 1000 Ohm.m). Conforme explícito na Figura 7.4, essas porções mais resistivas apresentam concentração mais pronunciável na porção inferior do modelo gerado, estendendo-se para a superfície nas porções onde é descrita a ocorrência de cangas ferruginosas. A geometria dessa unidade tem características mais esferoidais e não se distribui de forma planar como a descrita para as baixas resistividades.



**Figura 7.4** – Disposição espacial de altas resistividades em relação ao contato geológico da literatura.

As unidades de resistividades intermediárias, conforme observado nas análises estatísticas conduzidas, correspondem à maior parte da amostra. Nesse sentido, conforme apresentado na Figura

7.5, apesar de comporem a maior parte do modelo, não tendem a ser diagnósticas para o estudo. Sendo assim, o terceiro agrupamento interpretado, responde por valores entre -100 e 1000 Ohm.m do modelo interpolado.



**Figura 7.5** – Disposição espacial de resistividades intermediárias em relação ao contato geológico da literatura.

Integrando as propriedades físicas dos respectivos materiais da área, descritos por Assis (2018) é possível propor correlações com as respostas indicadas pelos modelos da eletrorresistividade. Conforme apresentado no capítulo “Geologia Local”, as lateritas aluminosas apresentam quantidade significativa de argilominerais na fácies maciça; as lateritas ferruginosas por sua vez apresentam bolsões de material fragmentado em meio à fácies maciça o que é associado a um caminho preferencial da água.

Buscando uma correlação com os dados geofísicos, primeiramente é possível ponderar que a quantidade de argilominerais (baixa permeabilidade) na canga aluminosa facilitou o acúmulo de altas resistividades nessa porção. Essa condição gera uma quebra significativa nas respostas resistivas, que passam rapidamente de ZBR para ZAR, o que possivelmente pode estar associado à distribuição desse conteúdo de argila.

Na porção modelada como canga ferruginosa, especialmente na fácies “maciça/fragmentada”, observa-se acúmulos pontuais de baixa resistividade, acredita-se que a correlação mais consiste para interpretação desses resultados consiste em que essas sejam zonas aproximadas da ocorrência de material fragmentado em meio ao maciço. Contudo, não foi interpretada uma conexão entre os registros pontuais e que um eventual *trend* nas medidas pode estar associado ao interpolador.

De forma geral, para ambos tipos de lateritas (aluminosas e ferruginosas) as resistividades apresentaram um acréscimo significativo com o aumento da profundidade investigada, o que ajusta com a ideia de maior dificuldade de infiltração da água no meio, a não ser pela presença de características texturais específicas que favoreçam essa infiltração/presença da água.

É importante evidenciar que as respostas resistivas não indicam fluxo (mais indicado para essa finalidade seria o potencial espontâneo), e nem respondem especificamente por um tipo de material, mas são muito bem associadas à umidade no meio, o que potencialmente indica a presença de água associada a respostas de baixa resistividade e a ausência de água (ou presença de ar) nas zonas de alta resistividade.

Além disso, naturalmente o modelo aqui adotado consiste em uma considerável simplificação de um contexto geológico totalmente mais complexo, seja no nível da percepção visual das unidades componentes, seja em relação às diversas possibilidades de caracterização micromorfológicas do material ou mesmo das propriedades físicas que compõem esse ambiente geológico.

Eventualmente, a disponibilidade de dados de investigação direta (sondagens, por exemplo) poderia permitir uma parametrização das resistividades intermediárias, possibilitando ao analista caracterizar esses dados de forma mais diagnóstica em relação aos materiais geológicos investigados. Outro ponto fundamental para complementação da análise seria considerar ensaios de laboratório e caracterização em detalhe das propriedades físicas do material, permitindo correlações mais acuradas acerca dos níveis de resistividade: *e.g.* outra abordagem possível seria interpretar acúmulos de argilominerais como zonas de baixos resistivos devido à presença de cargas livres. No presente trabalho entende-se que o grau de saturação pode eventualmente exercer menor influência à resistividade do meio, porém, tratando-se de argilas, a resposta resistiva pode estar condicionada diretamente à umidade volumétrica como apresentado por Aquino (2010) e Campos (2015).

Reforça-se ainda o posicionamento de Starfield & Cundall (1988), que no caso tratam especificamente sobre modelos numéricos, mas cuja abordagem é extensível a outros campos da modelagem, ao dizerem que os modelos devem ser um suporte ao pensamento, não um substituto.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

---

O presente trabalho de conclusão de curso foi orientado pelo questionamento da viabilidade e ganhos possíveis da análise eletrorresistiva de materiais lateríticos presentes no campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto.

Para definição dos parâmetros, métodos e compreensão do ambiente investigado, foi conduzida uma revisão do tema, buscando-se a exaustão principalmente dos tópicos associados ao estudo de materiais lateríticos e das técnicas de processamento e garantia de qualidade de dados da eletrorresistividade.

A abordagem sequencial do tema de estudo, permitiu o desenvolvimento de uma clivagem teórica robusta, baseada essencialmente na escolha ponderada entre os recursos matemáticos para processamento de dados e a aderência dessa informação ao contexto geológico investigado. Logo, justifica-se a escolha dos *softwares*, como a inversão pelo RES2DINV, e também a caracterização das couraças de acordo com o trabalho de Assis (2018).

Em termos da metodologia aplicada, cabe salientar como pontos positivos a integração de diferentes ferramentas, indo desde recursos livres como as bibliotecas Python e também a avaliação de diferentes ferramentas com licenças comerciais, como o Leapfrog Geo e Oasis Montaj. Para mais, são pontos favoráveis a interlocução desenvolvida entre o presente estudo e trabalhos anteriores, que culminaram no desenvolvimento de um modelo, ainda que simplificado pela existência de uma única forma de investigação, capaz de trazer percepções e discussões.

Se por um lado a pesquisa contou com um levantamento de dados relativamente restrito, que consistiu basicamente em uma aquisição geofísica pelo método da eletrorresistividade, por outro lado as análises de dados (antes e após processamento), abordagens estatísticas e os recursos de modelagem geológica permitiram extrair dados e informações que contribuíram para o estudo e desenvolver uma análise simplificada do meio.

Diante das considerações supracitadas, é possível elencar importantes pontos de discussão como saídas das análises desenvolvidas, direcionando a pontos de melhoria e orientações a futuros trabalhos desenvolvidos no tema.

Em primeiro lugar, em relação ao processamento dos dados de eletrorresistividade, pode-se dizer que os recurso de inversão por mínimos quadrados apresentou-se, para o caso em específico, resultados mais condizentes com o contexto geológico, de fácies mais voltadas a uma distribuição planar. Eventualmente, quebras de linearidade mais significativas ainda podem ser associadas à



transição entre fácies, todavia, deve-se ter em mente que a transição indicada, como destacado, consiste em uma simplificação – em campo essas variações tendem a ser mais graduais.

Os produtos invertidos indicaram grande quantidade de ruído, o que certamente deve ser levado em consideração, recomendando-se sempre o absoluto esforço do operador do levantamento em dirimir as influências indesejadas no dado. Contudo, destaca-se que essa condição pode estar potencialmente associada às características do material, sendo que as próprias resistividades medidas durante o levantamento indicaram-se muito dispersas.

Ainda que de forma rotineira seja usual e indicado a filtragem de dados (quando esses são interpretados como ruídos), para o contexto em questão não se adotou tal procedimento dadas as validações do banco de dados, onde se esperava heterogeneidade de resistividade, consequência das características geológicas.

O modelo gerado é consideravelmente uma simplificação da realidade, contudo, é aplicável para suporte ao entendimento do contexto geológico investigado, mais especificamente para distinguir zonas aluminosas e ferruginosas. Perante a quantidade de dados disponíveis consistiu em um recurso, onde, por parcimônia, buscou-se inferir a menor quantidade de ajustes e complexidades geológicas ao meio. Estimou-se ainda a distribuição espacial de unidades com base em estudos anteriores conduzidos na área.

O arranjo e espaçamento aplicados foram suficientes para amostragem para o estudo conduzido, por outro lado, não tiveram resolução significativa nas fácies mais superficiais (fácies canga e fácies nodular, respectivamente para material ferruginoso e aluminoso). Para caracterização desses materiais, recomenda-se usar espaçamentos menores, sem, contudo, comprometer boas práticas de campo, como controle da resistência de contato.

Os produtos gerados possibilitaram a caracterização de unidades de baixa, intermediária e alta resistividade, as quais apresentaram relativa concentração espacial. A partir do modelo interpretado, integrando a geologia e geofísica, observou-se uma transição mais abrupta dos níveis de resistividades na porção aluminosa investigada, enquanto que a laterita ferruginosa apresentou respostas mais pontuais de baixa resistividade. Tal distribuição de propriedade física foi associada à presença de água (ou à variação de umidade) e posteriormente interpretada como um resultado das particularidades texturais de cada material, atendendo aos objetivos propostos para o trabalho.

Posto isso, a metodologia proposta mostrou-se com grande relevância para caracterização em profundidade de zonas mais aluminosas e ferruginosas em lateritas. Dessa forma, o recurso pode ser replicado para diferentes áreas com contexto geológico similar, trazendo vantagens como a visualização tridimensional de forma não invasiva, indireta, maximizando resultados e diminuindo custos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alkmin, F. F., Marhak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**: 29-58.
- Alkmim, F. F.; Martins-neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **33**:127–139.
- Agência Nacional de Águas. 2020. Shapefile de uso e ocupação do solo em alta resolução espacial (1m) dos municípios com mais de 50.000 habitantes na Bacia do Rio Doce. Acesso em 08/11/2020, disponível em <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?uuid=7e4929ae-a1a3-4800-8e0f-b111835d8295>.
- Aquino, F. S. 2010. Estudo comparativo entre a resistividade elétrica e características geotécnicas de um solo argiloso compactado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, p. 117.
- Assis, D.A. 2018. *Tipologia das couraças do morro do cruzeiro, Quadrilátero Ferrífero, MG. Um estudo macromorfológico, mineralógico, micromorfológico e geoquímico*. Monografia n. 278, Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 61.
- Augustin, C. H. R. R., Lopes, M.R.S., Silva, S.M. 2013. Lateritas: Um conceito ainda em construção. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.14, n.3, (Jul-Set) p.241-257.
- Bacellar, L.A.P. 2000. *Condicionantes geológicos, geomorfológicos e dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá. Ouro Preto, MG*. Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 225p.
- Baltazar, O.F., Baars F.J., Lobato, L.M., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Berni, G.V., Silveira, V.D. 2005. Mapa Geológico Ouro Preto na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. CODEMIG. Belo Horizonte.
- Baltazar, O. F.; Zucchetti, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, **32**: 471–499.
- Beato D.A.C., Monsorens A.L.M., Bertachini A. C. 2005. Hidrogeologia. In: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, v.9. Parte A.
- Bortolozzo, C. A. 2016. *Inversão conjunta 1D e 2D de dados de Eletroresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 293.
- Borges, W. R. 2007. *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 271 p.
- Box, G. E. P. 1976. Science and Statistics. *Journal of the American Statistical Association*, **71**: 791-799.
- Braga, A. C. O. 2006. *Métodos da eletroresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática*. Tese (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 121 p.
- Braga, A.C.O.B. 2016. *Geofísica Aplicada: Métodos geoeletricos em Hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p.
- Brandi, I. V. 2018. *Proposta de uma metodologia de classificação geotécnica aplicada a cavernas em litologias ferríferas*. Tese de Doutorado, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 338.
- Buchanan, F. 1807. *A Journey from Madras through the countries of Mysore, Canara, and Malabar*. Londres, Inglaterra, v. 2, 556 p.
- Calux, A. S. 2013. *Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, p. 218.

- Calux, A. S., Cassimiro, R., Salgado, A. A. R. 2019. Caves in iron formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, southeastern Brazil: lithological, morphological and hydrological settings and speleogenesis. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.62/2, p.125-144.
- Campos, L. G. 2015. Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho, p. 126.
- Castello, L. Z., Moreira, C. A., Braga, A. C. de O. 2011. Estudo geofísico de vazamento controlado de álcool combustível em escala laboratorial. *Revista Brasileira de Geofísica*, **29**: 231–237.
- Coelho, D. M. 2018. *Análise geofísica na prospecção de água no vale do Ribeirão Aredes, no município de Itabirito, Minas Gerais*. Monografia n. 258, Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 114.
- Dahlin, T., Zhou, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **52**: 379–398.
- Dubreuil, V., Fante, K. P., Sant'anna-Neto, O. P. J. L. 2018. Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *CONFINS – Revista Franco-Brasileira de Geografia*. **37**. Disponível em <https://journals.openedition.org/confins/15738#quotation>. Acesso em 14/02/2021
- Dorr J. V. N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. U. S. Geological Survey Prof. Paper, Washington, 641 (A): 110 p.
- Endo, I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 382 p.
- Endo, I., Castro, P.T.A., Gandini, A.L. 2020. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, 480 p.
- Eschwege, W. L. 2002. *Jornal do Brasil, 1811-1817*. Trad. Friedrich E. Renger, Tarcísia L. Ribeiro, Günther Augustin. Belo Horizonte, Fundação João Pinheiro, Centro de Estudos Históricos e Culturais, 408 p.
- Gonçalves, J.T.D. 2019. *Integração do método geofísico de eletroresistividade e ensaios SPT na investigação de perfis de subsolos da região metropolitana de Salvador (RMS)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 67 p.
- Gorceix, C. H. 1876. *Note sur la roche connue vulgairement au Brasil sous le nom de Canga, et sur le bassin d'eau douce de Fonseca*. (Province de Minas Geraes). Soc. Geol. de France, Bulletin 3me, p. 321-323.
- Heilbron, M. Cordani, U. G., Alkmim, F. F. 2016. *São Francisco Craton, Eastern Brazil, Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Springer International Publishing, p. 331.
- Hellman, K., Johansson, S.J., Olsson P.O., Dahlin, T.D. 2016. Resistivity Inversion Software Comparison. In: Near Surface Geoscience 2016 - 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Barcelona, Espanha.
- Isaaks, E.H., Srivastava R. M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, Department of Applied Earth Sciences, 561 p.
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos, São Paulo, 438p.
- Kilty, K. T. 1984. On the Origin and Interpretation of Self-Potential Anomalies. *Geophysical Prospecting*, n. 32, p. 51–62.
- King, L. A. 1956. Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, p. 147-256.
- Köppen W. 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, 6, 657–679.
- Lana, C. E. 2010. *Influência de níveis de base nas características morfossedimentares das bacias dos rios das Velhas e Jequitaiá (MG)*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 223 p.
- Lemes, C.G.C. 2018. *Diversidade metagenômica e potencial biotecnológico de cavernas de canga do Quadrilátero Ferrífero*. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Núcleo de Pesquisas em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 86.

- Lepsch, F. I. 2011. *19 Lições de Pedologia*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Locke M.H. 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. Disponível em: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- Loke, M. H., Dahlin, T. 2002. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, v. 49, n. 3, p. 149–162.
- Magalhães, M. N., Lima, A. C. P. 2013. *Noções de probabilidade e estatística*. Edusp, São Paulo, 428 p.
- McFarlane, M.J. 1976. *Laterite and Landscape*. London, Academic Press, 151 p.
- Morais, F.; Bacellar, L. de A. P. 2010. Geofísica aplicada ao estudo de fluxos da água no solo. *Sociedade & Natureza*, 22: 213–222.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. de O., Hansen, M. A. F. 2016. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, **41**: 549–557.
- Mourão M.A.A. 2007. *Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Escola De Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, Belo Horizonte, 297 p.
- Nussenzveig, H. M. 2006. *Curso de Física Básica*. 6. ed. São Paulo, Edgard Blücher, v. 3, 259 p.
- Oppenheim, A. V.; Willsky, A. S. 2010. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. Massachusetts Institute of Technology, Pearson, 568 p.
- Orellana, E. 1982. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Segunda edición corregida y ampliada. Ed. Paraninfo, Madrid, 579 p.
- Prosdocimi, G. A. S. 2019. *Avaliação das relações lito-estruturais em cavidades ferríferas, com base em métodos geofísicos – estudo de caso: cavidade ferrífera da província Carajás/PA*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p. 188.
- Rosiere, C. A., Chemale Jr. F. 2000. Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma Visão Geral e Discussão. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27-42.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*. **40**:453-464.
- Seequent. 2019. *Numeric Modelling with the Wolf Pass Project for Leapfrog Geo version 5.0*. Manual de usuário.
- Selley, R. 2000. *Applied Sedimentology*. Academic Press, Imperial College of Science, 543 p.
- Sgarbi, G. N. C. S. 2012. *Petrografia Macroscópica das Rochas ígneas, Sedimentares e Metamórficas*. Editora UFMG, 2ª Edição, 559 p.
- Shellmann, W. (2005/2010). *Laterite Story: An Introduction in Laterite*. Disponível em: <<http://www.laterite.de/>>. Acesso em 04-10-2020.
- Silva, J.E.B., Santos, P.R.A. 2007. A utilização dos modelos SRTM na interpretação geomorfológica: técnicas e tecnologias aplicadas ao mapeamento geomorfológico do território brasileiro. In: Inpe, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Anais em CD-ROM, p. 4261-4266.
- Simmons, G. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 1963. *The National Speleological Society Bulletin*, v. 25, p. 66–72.
- Souza, B. E. V. F. 2018. *Caracterização da capacidade de armazenamento e de transmissão de água em distintos maciços de canga do quadrilátero ferrífero (MG)*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p.126.
- Suguio, K. 1980. Rochas Sedimentares. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 499 p.
- Starfield, A. M., Cundall, P. A. 1988. Towards a methodology for rock mechanics modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **25**: 99-106.
- Szalai, S., Szarka, L. 2008. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 56: 159–175.
- Takahasi, A., Meirelles, S. T. 2014. Ecologia da vegetação herbácea de bancadas lateríticas (cangas) em Corumbá, MS, Brasil. *Hoehnea*, v. 41, n. 4, p. 515–528.

Tardy, Y., Kobilshek, B., Paquet, H. 1991. Mineralogical composition and geographical distribution of Africa and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. *Journal Afr. Earth Sci.*, **12**:283-295.

Teixeira, W., Toledo, M.C.M., Fairchild, T.R. & Taioli, F. 2000. *Decifrando a terra*. USP, São Paulo, 557 p.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2ª edição, 770 p.

Varajão C.A.C. 1988. *Estudo comparativo das Jazidas de Bauxita do Quadrilátero Ferrífero, MG - Micromorfologia, Geoquímica, Geomorfologia e Sensoriamento Remoto*. Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado, São Paulo, 213 p.

Varajão, C.A.C., Salgado, A.A.R., Varajão, A.F.D.C., Braucher, R., Colin, F., Nalini Jr, H.A. 2009. Estudo da Evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão ( $^{10}\text{Be}$ ) e da pedogênese. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33:1409-1425.

## Apêndice(s)

Quadro resumizando os dados de resistividade coletados (Quadro 1).

Linha	Xa (m)	Za (m)	Rho_a (Ohm.m)	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Profundidade (m)
1	7.5	-5	67.61	7.5	0	0	-5
1	10	-7.5	0.56	10	0	0	-7.5
1	12.5	-10	4.2	12.5	0	0	-10
1	15	-12.5	2.04	15	0	0	-12.5
1	17.5	-15	0.97	17.5	0	0	-15
1	20	-17.5	0.96	20	0	0	-17.5
1	12.5	-5	449.02	15	0	0	-5
1	15	-7.5	1825.39	15	0	0	-7.5
1	17.5	-10	465.77	17.5	0	0	-10
1	20	-12.5	168.57	20	0	0	-12.5
1	22.5	-15	91.58	22.5	0	0	-15
1	25	-17.5	403.4	25	0	0	-17.5
1	17.5	-5	725.89	17.5	0	0	-5
1	20	-7.5	58.61	20	0	0	-7.5
1	22.5	-10	287.83	22.5	0	0	-10
1	25	-12.5	198.87	25	0	0	-12.5
1	27.5	-15	366.33	27.5	0	0	-15
1	30	-17.5	146.53	30	0	0	-17.5
1	22.5	-5	4.38	22.5	0	0	-5
1	25	-7.5	1.97	25	0	0	-7.5
1	27.5	-10	1.73	27.5	0	0	-10
1	30	-12.5	1.95	30	0	0	-12.5
1	32.5	-15	2.1	32.5	0	0	-15
1	27.5	-5	2.33	27.5	0	0	-5
1	30	-7.5	1.79	30	0	0	-7.5
1	32.5	-10	2.12	32.5	0	0	-10
1	35	-12.5	1.83	35	0	0	-12.5
1	32.5	-5	2.8	32.5	0	0	-5
1	35	-7.5	3.1	35	0	0	-7.5
1	37.5	-10	2.73	37.5	0	0	-10
1	37.5	-5	3.44	37.5	0	0	-5
1	40	-7.5	3.71	40	0	0	-7.5
1	42.5	-5	3.45	42.5	0	0	-5
2	7.5	-5	27.63	7.5	10	0	-5
2	10	-7.5	3.01	10	10	0	-7.5
2	12.5	-10	3.53	12.5	10	0	-10
2	15	-12.5	2.68	15	10	0	-12.5
2	17.5	-15	1.91	17.5	10	0	-15
2	20	-17.5	2.29	20	10	0	-17.5
2	12.5	-5	54.01	15	10	0	-5

Linha	Xa (m)	Za (m)	Rho_a (Ohm.m)	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Profundidade (m)
2	15	-7.5	120.58	15	10	0	-7.5
2	17.5	-10	343.16	17.5	10	0	-10.0
2	20	-12.5	204.1	20	10	0	-12.5
2	22.5	-15	449.59	22.5	10	0	-15.0
2	25	-17.5	959.13	25	10	0	-17.5
2	17.5	-5	0.86	17.5	10	0	-5.0
2	20	-7.5	331.58	20	10	0	-7.5
2	22.5	-10	41.87	22.5	10	0	-10.0
2	25	-12.5	56.52	25	10	0	-12.5
2	27.5	-15	824.25	27.5	10	0	-15
2	30	-17.5	2403.15	30	10	0	-17.5
2	22.5	-5	2.41	22.5	10	0	-5
2	25	-7.5	1.82	25	10	0	-7.5
2	27.5	-10	1.99	27.5	10	0	-10
2	30	-12.5	1.9	30	10	0	-12.5
2	32.5	-15	1.82	32.5	10	0	-15
2	27.5	-5	2.75	27.5	10	0	-5
2	30	-7.5	2.94	30	10	0	-7.5
2	32.5	-10	3.29	32.5	10	0	-10
2	35	-12.5	2.91	35	10	0	-12.5
2	32.5	-5	2.78	32.5	10	0	-5
2	35	-7.5	2.78	35	10	0	-7.5
2	37.5	-10	2.55	37.5	10	0	-10
2	37.5	-5	2.52	37.5	10	0	-5
2	40	-7.5	2.39	40	10	0	-7.5
2	42.5	-5	3.1	42.5	10	0	-5
3	7.5	-5	18.57	-7.5	20	0	-5
3	10	-7.5	5.34	10	20	0	-7.5
3	12.5	-10	3.81	-12.5	20	0	-10
3	15	-12.5	2.66	15	20	0	-12.5
3	17.5	-15	2.34	-17.5	20	0	-15
3	20	-17.5	622.34	20	20	0	-17.5
3	12.5	-5	21.98	15	20	0	-5
3	15	-7,5	75.36	15	20	0	-7.5
3	17.5	-10	150.72	-17.5	20	0	-10
3	20	-12.5	628	20	20	0	-12.5
3	22.5	-15	1510.63	22.5	20	0	-15
3	25	-17.5	1007.08	25	20	0	-17,5
3	17.5	-5	63.25	-17.5	20	0	-5
3	20	-7.5	75.36	20	20	0	-7.5
3	22.5	-10	13.46	22.5	20	0	-10
3	25	-12.5	310.86	25	20	0	-12.5
3	27.5	-15	769.3	27.5	20	0	-15



Linha	Xa (m)	Za (m)	Rho_a (Ohm.m)	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Profundidade (m)
3	30	-17.5	1959.36	30	20	0	-17,5
3	22.5	-5	2.34	22.5	20	0	-5
3	25	-7.5	1.98	25	20	0	-7.5
3	27.5	-10	56.97	27.5	20	0	-10
3	30	-12.5	141.79	30	20	0	-12.5
3	32.5	-15	2.58	32.5	20	0	-15
3	27.5	-5	1.59	27.5	20	0	-5
3	30	-7.5	6.92	30	20	0	-7.5
3	32.5	-10	63.44	32.5	20	0	-10
3	35	-12.5	2.79	35	20	0	-12.5
3	32.5	-5	1.27	32.5	20	0	-5
3	35	-7.5	7.23	35	20	0	-7.5
3	37.5	-10	60.36	37.5	20	0	-10
3	37.5	-5	1.07	37.5	20	0	-5
3	40	-7.5	1.6	40	20	0	-7.5
3	42.5	-5	1.32	42.5	20	0	-5
4	7.5	-5	4.89	7.5	30	0	-5
4	10	-7.5	1.9	10	30	0	-7.5
4	12.5	-10	1.99	12.5	30	0	-10
4	15	-12.5	0.06	15	30	0	-12.5
4	17.5	-15	1.51	17.5	30	0	-15
4	20	-17.5	2.28	20	30	0	-17.5
4	12.5	-5	26.38	15	30	0	-5
4	15	-7.5	97.97	15	30	0	-7.5
4	17.5	-10	263.76	17.5	30	0	-10
4	20	-12.5	414.48	20	30	0	-12.5
4	22.5	-15	2571.66	22.5	30	0	-15
4	25	-17.5	1055.04	25	30	0	-17.5
4	17.5	-5	16.96	17.5	30	0	-5
4	20	-7.5	37.68	20	30	0	-7.5
4	22.5	-10	172.7	22.5	30	0	-10
4	25	-12.5	565.2	25	30	0	-12.5
4	27.5	-15	714.35	27.5	30	0	-15
4	30	-17.5	2637.6	30	30	0	-17.5
4	22.5	-5	1.76	22.5	30	0	-5
4	25	-7.5	1.86	25	30	0	-7.5
4	27.5	-10	1.76	27.5	30	0	-10
4	30	-12.5	2.26	30	30	0	-12.5
4	32.5	-15	1.89	32.5	30	0	-15
4	27.5	-5	1.13	27.5	30	0	-5
4	30	-7.5	0.87	30	30	0	-7.5
4	32.5	-10	1.48	32.5	30	0	-10
4	35	-12.5	1.4	35	30	0	-12.5

Linha	Xa (m)	Za (m)	Rho_a (Ohm.m)	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Profundidade (m)
4	32.5	-5	0.86	32.5	30	0	-5
4	35	-7.5	1.4	35	30	0	-7.5
4	37.5	-10	1.33	37.5	30	0	-10
4	37.5	-5	0.97	37.5	30	0	-5
4	40	-7.5	0.99	40	30	0	-7.5
4	42.5	-5	0.63	42.5	30	0	-5