



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



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE RISCO  
GEOTÉCNICO EM ÁREAS URBANAS ASSOCIADO À ZONA DE  
CISALHAMENTO SÃO BENTO, OURO PRETO – MG.**

**Pedro Lourenço dos Reis**

**MONOGRAFIA nº 466**

Ouro Preto, fevereiro de 2023



**ANÁLISE GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO  
DE RISCO GEOTÉCNICO ASSOCIADO À ZONA DE  
CISALHAMENTO SÃO BENTO, 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. José Alberto Naves Cocota Junior

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio



# **MONOGRAFIA**

**Nº 466**

## **ANÁLISE GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE RISCO GEOTÉCNICO ASSOCIADO À ZONA DE CISALHAMENTO SÃO BENTO, OURO PRETO – MG.**

**Pedro Lourenço dos Reis**

*Orientadora*

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

*Co-Orientadores*

**Prof. Dr. Joney Justo da Silva**

**MSc. 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 2022/2.

**OURO PRETO**

**2023**

---

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: Pedro Lourenço dos Reis

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

R375a Reis, Pedro Lourenço dos.

Análise geofísica aplicada à caracterização de risco geotécnico associado à zona de cisalhamento São Bento, Ouro Preto - MG. [manuscrito] / Pedro Lourenço dos Reis. - 2023. 80 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.

Coorientadores: Prof. Dr. Joney Justo da Silva, Me. Luis Artur Souza Oliveira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica - Magnetometria. 2. Geofísica - Eletrorresistividade. 3. Gravimetria. 4. Geotecnia. I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. II. Oliveira, Luis Artur Souza. III. Silva, Joney Justo da. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 550.3

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Pedro Lourenço dos Reis**

Análise Geofísica Aplicada à caracterização de risco geotécnico em áreas urbanas associado à Zona de Cisalhamento São Bento, Ouro Preto – MG.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 13 de fevereiro de 2023

### Membros da banca

Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa - Orientadora (Departamento de Geologia/UFOP)  
Dr. Paulo de Tarso Amorin Castro - (Departamento de Geologia/UFOP)  
Dr. Hernani Mota de Lima - (Departamento de Engenharia de Minas/UFOP)

Maria Sílvia Carvalho Barbosa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/02/2023



Documento assinado eletronicamente por **Maria Sílvia Carvalho Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/02/2023, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0475379** e o código CRC **61AE9F8C**.



## Agradecimentos

---

Aquilo que realizamos é apenas uma consequência das pessoas que convivemos e dos lugares que habitamos. Dessa forma, aproveito esse espaço para registrar todos aqueles que tiveram uma participação especial ao longo da minha formação acadêmica.

Um agradecimento especial aos meus pais e minha irmã, que apesar da distância física, sempre senti o apoio de vocês muito de perto. Vocês formam o pilar mais importante de todas as minhas conquistas e não há forma suficiente de explicar o quanto sou grato por isso.

Agradeço também todo o corpo docente do DEGEO por compartilharem comigo esse universo que é a geologia. Um abraço querido à professora Adivane por me mostrar que a Universidade também tem o potencial de desenvolver nosso lado humano. Aos orientadores Maria Sílvia, Joney Justo e Luis Artur Souza Oliveira por terem abraçado esse projeto com tanta dedicação e empenho. Muito obrigado por todos os dias de campo, de troca de ideias e de muito aprendizado. Este trabalho que desenvolvemos juntos foi, sem dúvida alguma, a experiência mais engrandecedora que tive na graduação.

A todos do PET e da SGA, obrigado por me proporcionarem tantas experiências e amizades ao longo da graduação. Reconheço também o importante papel que a UFOP teve ao me proporcionar o acesso a um ensino de altíssima qualidade de forma gratuita.

Por fim, agradeço esta cidade chamada Ouro Preto, que me recebeu de braços abertos e que me presenteou em diversas oportunidades durante estes últimos seis anos com belíssimas paisagens, pessoas incríveis e experiências tão enriquecedoras.



# SUMÁRIO

---

AGRADECIMENTOS.....	ix
SUMÁRIO .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE QUADROS E TABELAS .....	xv
RESUMO .....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	1
1.3 OBJETIVO .....	2
1.4 JUSTIFICATIVA .....	2
1.5 METODOLOGIA.....	4
2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
2.1 CONTEXTO REGIONAL .....	5
2.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS .....	7
2.2.1 Embasamento cristalino .....	8
2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas .....	8
2.2.3 SuperGrupo Minas.....	8
2.2.4 Supergrupo Espinhaço e Coberturas Cenozoicas .....	9
2.3 GEOLOGIA LOCAL .....	9
3. GEOTECNIA.....	11
3.1 RISCO GEOLÓGICO .....	11
3.2 MOVIMENTOS DE MASSA .....	12
3.2.1 Classificações.....	13
3.2.2 Características dos movimentos de massa.....	14
3.2.3 Fatores condicionantes dos movimentos de massa .....	16
3.3 ANÁLISE CINEMÁTICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES .....	18
4. MÉTODOS GEOFÍSICOS .....	23
4.1 MÉTODOS POTENCIAIS .....	23
4.1.1 Gravimetria.....	23
4.1.2 Magnetometria.....	25
4.1.3 Deconvolução de Euler .....	27
4.2 RADIOMETRIA .....	28
4.2.1 Radioatividade de rochas e minerais .....	28
4.2.2 Levantamento radiométrico.....	29

4.2.3	Processamento de dados.....	30
4.3	ELETORRESISTIVIDADE .....	31
4.3.1	Método da eletorresistividade .....	32
4.3.2	Caminhamento elétrico: arranjo dipolo-dipolo .....	35
4.3.3	Inversão geolétrica.....	37
5.	ANÁLISE GEOFÍSICA.....	39
5.1	BANCO DE DADOS .....	39
5.2	ANÁLISE RADIOMÉTRICA .....	39
5.3	ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA.....	45
5.4	DECONVOLUÇÃO DE EULER.....	49
5.5	DEFINIÇÃO DO LEVANTAMENTO TERRESTRE .....	50
6.	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	53
6.1	LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO .....	53
6.2	LEVANTAMENTO MAGNETOMÉTRICO .....	54
6.3	LEVANTAMENTO DE ELETORRESISTIVIDADE.....	56
7.	PROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS .....	57
7.1.	PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GRAVIMETRIA.....	57
7.2.	PROCESSAMENTO DOS DADOS DE MAGNETOMETRIA .....	58
7.3.	PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ELETORRESISTIVIDADE.....	65
7.4.	ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS.....	67
8.	CONCLUSÕES .....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77

## INDÍCE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1:</b> Localização e via de acesso à área de estudo. ....	2
<b>Figura 1.2:</b> Regiões com risco de deslizamento e queda/tombamento de blocos. ....	3
<b>Figura 2.1:</b> Mapa simplificado geológico do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a região onde foi conduzida este estudo. ....	6
<b>Figura 2.2:</b> Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero com destaque para as Formações que afloram na área de estudo. ....	7
<b>Figura 2.3:</b> Mapa geológico da área de estudo. ....	10
<b>Figura 3.1:</b> Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul) e com ângulo de atrito 30° (em verde). ....	19
<b>Figura 3.2:</b> Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul) e com ângulo de atrito 30° (em verde). ....	20
<b>Figura 3.3:</b> Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul), face de escorregamento 90/30 (em laranja) e limites laterais de 20° (em preto). ....	21
<b>Figura 3.4:</b> Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul), ângulo de atrito de 30° (em verde) e limites laterais de 20° (em preto). ....	21
<b>Figura 4.1:</b> Amplitude de densidades observadas em diferentes tipos de rocha. ....	24
<b>Figura 4.2:</b> Valores médios e intervalos de susceptibilidade das rochas. ....	25
<b>Figura 4.3:</b> Diagrama ternário representando os litotipos característicos de cada associação entre os elementos radioativos. ....	29
<b>Figura 4.4:</b> Janela espectral de radioelementos com destaque para as janelas de potássio, urânio e tório. ....	30
<b>Figura 4.5:</b> Classificação dos métodos geoeletricos galvânicos. ....	32
<b>Figura 4.6:</b> Esquema ilustrando a relação entre resistência e resistividade. ....	33
<b>Figura 4.7:</b> Representação de fluxo de corrente gerado a partir de um único eletrodo em espaço tridimensional homogêneo. ....	33
<b>Figura 4.8:</b> Valores de resistividade e suas variações em rochas e solos. ....	34
<b>Figura 4.9:</b> Representação de levantamento com arranjo dipolo-dipolo. ....	35
<b>Figura 4.10:</b> Distribuição teórica de pontos de uma pseudoseção de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo em N níveis de investigação. ....	37
<b>Figura 4.11:</b> Etapas na interpretação de dados geoeletricos com destaque para a etapa da inversão. ....	38

<b>Figura 5.1:</b> Mapas radiométricos.....	40
<b>Figura 5.2:</b> Mapa ternário com destaque para radiofácies.....	42
<b>Figura 5.3:</b> Comparativo entre as informações regionais de radiometria e mapeamento geológico.....	44
<b>Figura 5.4:</b> Lineamentos estruturais traçados a partir do mapa canal de tório.....	45
<b>Figura 5.5:</b> Mapas magnetométricos.....	47
<b>Figura 5.6:</b> Lineamentos estruturais traçados a partir do mapa de amplitude do sinal analítico.....	48
<b>Figura 5.7:</b> Pontos correspondentes às fontes de anomalia magnética utilizando a deconvolução de Euler a partir da amplitude do sinal analítico de magnetometria.....	49
<b>Figura 5.8:</b> Resultados da deconvolução de Euler.....	50
<b>Figura 5.9:</b> Análise integrada dos dados geofísicos regionais.....	51
<b>Figura 5.10:</b> Posicionamento das duas linhas selecionadas para condução dos levantamentos terrestres.....	51
<b>Figura 6.1:</b> Localização dos pontos nos quais foram realizados levantamentos gravimétricos.....	54
<b>Figura 6.2:</b> Localização dos pontos nos quais foram realizados levantamentos magnetométricos.....	55
<b>Figura 6.3:</b> Linha pela qual foi realizado o levantamento de eletrorresistividade.....	56
<b>Figura 7.1:</b> Resultados do processamento de gravimetria. Em azul, a correção de <i>free air</i> pelo método de Telford e em vermelho, a correção de Bouguer.....	57
<b>Figura 7.2:</b> Destaque para os pontos de baixo gravimétrico na linha levantada.....	58
<b>Figura 7.3:</b> Campo anômalo (CA) calculados a partir do levantamento terrestre em ambas as linhas.....	59
<b>Figura 7.4:</b> Amplitude do sinal analítico (ASA) calculada a partir do levantamento terrestre em ambas as linhas.....	60
<b>Figura 7.5:</b> Resultado da deconvolução de Euler para a linha localizada a norte.....	61
<b>Figura 7.6:</b> Integração do resultado de deconvolução com mapa de amplitude do sinal analítico.....	61
<b>Figura 7.7:</b> Resultado da deconvolução de Euler para a linha localizada a sul.....	62
<b>Figura 7.8:</b> Integração do resultado de deconvolução com mapa de amplitude do sinal analítico.....	63
<b>Figura 7.9:</b> Pontos de anomalia magnética e sua profundidade na área norte.....	64
<b>Figura 7.10:</b> Pontos de anomalia magnética e sua profundidade na área sul.....	64
<b>Figura 7.11:</b> Posicionamento dos pontos amostrados reprojatados e seus respectivos valores de eletrorresistividade.....	65
<b>Figura 7.12:</b> Modelo voxel de eletrorresistividade.....	66
<b>Figura 7.13:</b> Seção transversal de eletrorresistividade.....	66

<b>Figura 7.14:</b> Comparação entre os resultados de radiometria com o grau de risco. ....	68
<b>Figura 7.15:</b> Mapa da amplitude do sinal analítico destacando as três seções utilizadas como base para discussão. ....	69
<b>Figura 7.16:</b> Seção I, localizada na posição 7745669N.....	70
<b>Figura 7.17:</b> Seção II, localizada na posição 7745612N. ....	70
<b>Figura 7.18:</b> Seção III localizada na posição 7745571N. ....	71
<b>Figura 7.19:</b> Áreas com maior risco potencial com base nos resultados geofísicos. ....	74



## ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

---

<b>Quadro 3.1:</b> Classificação de movimentos de massa segundo .....	13
<b>Quadro 3.2:</b> Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho.....	14
<b>Quadro 4.1:</b> Correções aplicadas aos levantamentos gravimétricos.....	24
<b>Quadro 4.2:</b> Correções de dados magnetométricos .....	26
<b>Quadro 4.3:</b> Filtros aplicados à magnetometria e suas finalidades geofísicas.....	27
<b>Quadro 4.4:</b> Relação entre índice estrutural e geometria da fonte de anomalia magnética.....	28
<b>Quadro 4.5:</b> Principais minerais radioativos. ....	29
<b>Quadro 4.6:</b> Processamento utilizado para a geração dos principais produtos radiométricos .....	30
<b>Quadro 4.7:</b> Utilização dos mapas temáticos na radiometria. ....	31
<b>Tabela 3.1:</b> Características dos principais movimentos de massa.....	15



## Resumo

---

O município de Ouro Preto, localizado no estado de Minas Gerais, ocupa um território com topografia marcadamente acidentada e com geologia complexa. Durante o século XVIII, com o advento do Ciclo do Ouro, o município passou por um processo desordenado de ocupação territorial, o que resultou em um número elevado de pessoas habitando regiões de alto risco geológico-geotécnico. Durante as décadas de 1950 e 1960, devido à exploração de bauxita na região, o município passou novamente por outro processo de ocupação desordenada, com pessoas e infraestrutura ocupando regiões de grande susceptibilidade a movimentos de massa. Estudos relacionados à caracterização de áreas de risco já foram conduzidos na região levando em consideração aspectos como a influência da geomorfologia e da pluviosidade. No entanto, análises mais aprofundadas que levem em consideração as características do terreno em subsuperfície ainda são escassas. O objetivo deste trabalho consiste na utilização de métodos geofísicos como forma de elucidação das propriedades físicas em subsuperfície e relacioná-las com as regiões de risco geotécnico potencial. Os métodos gravimétricos se mostraram com potencial para identificação de galerias subterrâneas que apresentam sérios riscos de solapamento, muito comuns na região, principalmente quando utilizados em conjunto com informações de eletrorresistividade. O método magnetométrico se mostrou útil na identificação do posicionamento de fontes anômalas em subsuperfície, e, quando associado com regiões de baixa eletrorresistividade, destacam áreas onde as estruturas que condicionam as descontinuidades podem favorecer a percolação de água, o que acentua o risco de deslizamentos e queda de blocos. Já o método de eletrorresistividade permitiu a identificação de descontinuidades ao realçar o contraste de condutividade em subsuperfície, além de servir de grande auxílio na interpretação das ambiguidades inerentes dos métodos potenciais.

**Palavras-chave:** Magnetometria, Gravimetria, Eletrorresistividade, Geotecnia, Zona de Cisalhamento São Bento, Ouro Preto.



## Abstract

---

The municipality of Ouro Preto, located in the state of Minas Gerais, occupies a territory with a markedly rugged topography and complex geology. During the 18th century, with the advent of the Gold Cycle, the municipality underwent a disorderly process of territorial occupation, resulting in families inhabiting regions of high geological-geotechnical risk. During the 1950s and 1960s, due to the exploitation of bauxite in the region, the municipality again underwent another disorderly settling process, with homes and infrastructure built in areas of great susceptibility to mass movements. Studies related to the characterization of risk areas were already conducted in the region, considering aspects such as the influence of geomorphology and rainfall. However, analyzes considering the characteristics of the underground fabric are still scarce. The objective of this work is to use geophysical methods to elucidate the physical properties in the subsurface and relate them to regions of potential geotechnical risk. The gravimetric methods, when used in parallel with electroresistivity information, showed potential for identifying underground galleries that present serious risk of ground collapse, very common in the region. The magnetometric method proved useful to identify the positioning of anomalous sources underground, and, when associated with regions of low electroresistivity, highlight areas where the structures that condition the discontinuities can favor the percolation of water, which accentuates the risk of landslides and blocks fall. The electroresistivity method, on the other hand, allowed the identification of discontinuities by enhancing the conductivity contrast in the subsurface, in addition to serving as a great aid in the interpretation of the inherent ambiguities of potential methods.

**Key words:** Magnetometry, gravimetry, electroresistivity, geotechnical risk, São Bento shear zone, Ouro Preto.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O município de Ouro Preto, localizado a 100km da capital mineira Belo Horizonte, está inserido numa região cujas condições geológicas e geomorfológicas apresentam considerável instabilidade geotécnica, comprometendo construções e colocando em risco a vida de moradores. Esta situação é agravada pelo movimento de ocupação urbana desordenada ocorrida desde o Ciclo do Ouro, no final do século XVIII (Pinheiro *et al.* 2004).

Em anos de elevada pluviosidade, o município sofre com significativas perdas humanas e materiais, incluindo danos ao patrimônio histórico e cultural da cidade (Castro *et al.* 2012). Tamaña a regularidade de tais ocorrências, que em 1982 foi elaborada a primeira Carta Geotécnica de Ouro Preto (Carvalho 1982), indicando os pontos mais críticos da cidade em relação à instabilidade geotécnica.

Desde então, trabalhos subsequentes vêm sendo desenvolvidos de forma a aprimorar a caracterização das regiões que apresentam alto risco geotécnico como a aplicação de abordagens estatísticas para identificação de quais áreas podem ser diretamente afetadas pelos movimentos de massa (Barella 2016) e a elaboração de inventário de ocorrências identificando áreas mais críticas e os tipos de materiais envolvidos nos movimentos de massa (Xavier 2017).

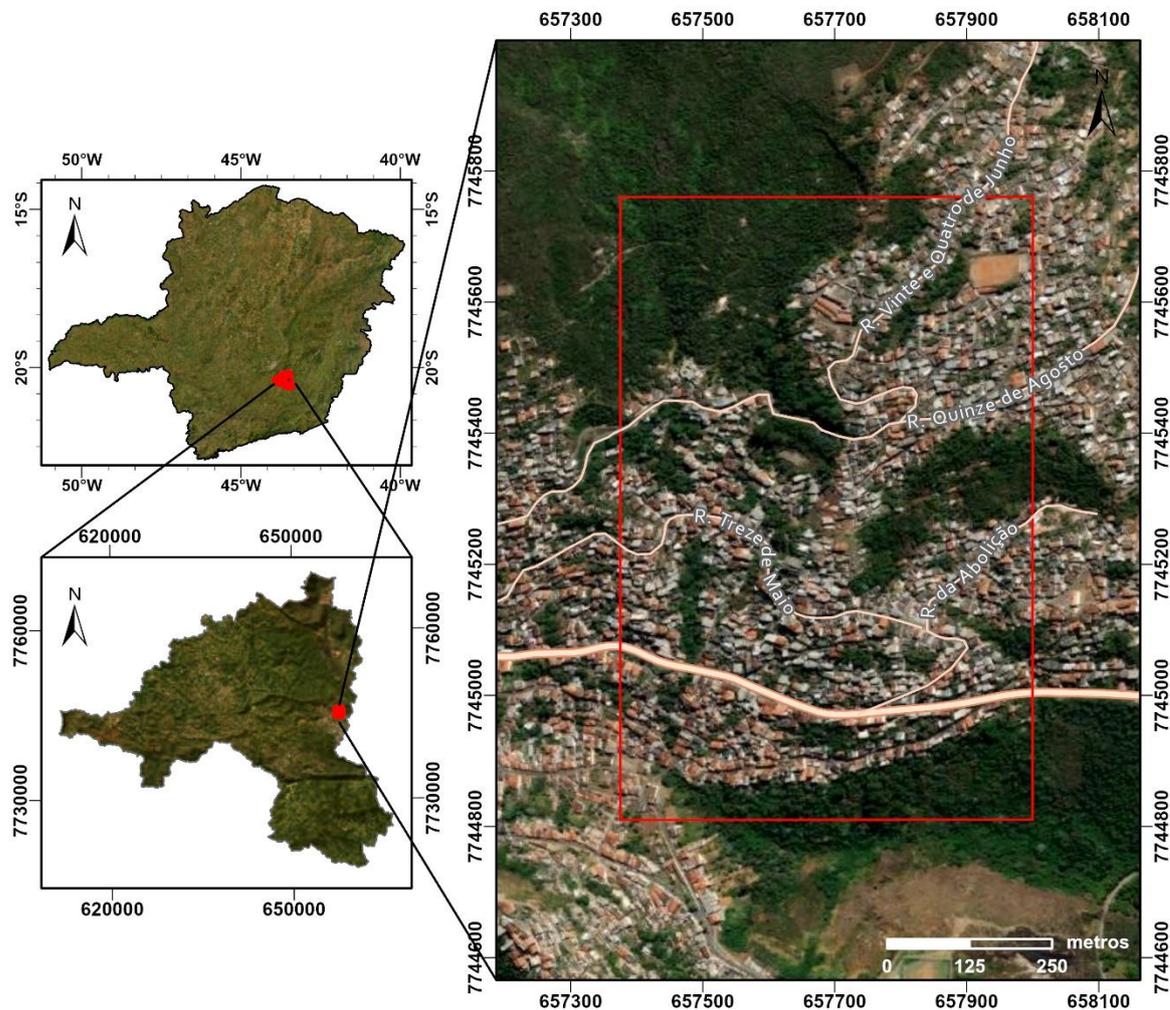
O presente estudo propõe um refinamento dos sistemas de classificação de susceptibilidade de riscos geotécnicos para o município de Ouro Preto – MG, utilizando informações de estruturas e descontinuidades em subsuperfícies adquiridas por meio de métodos geofísicos de investigação. A metodologia empregada neste trabalho também possui a possibilidade de auxiliar futuras implementações na mitigação de riscos para um melhor planejamento de ocupação urbana propostos pela Defesa Civil a partir da análise de dados obtidos de forma não invasiva e com baixo custo relativo.

### 1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada na sede do município de Ouro Preto – MG, na porção leste da Serra de Ouro Preto, compreendendo parte dos bairros Morro da Queimada, Morro Santana, Alto da Cruz, Padre Faria, Taquaral, Nossa Senhora da Piedade e Padre Faria (Figura 1.1).

A área está localizada a aproximadamente 100km de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais, e pode ser acessada pela BR-356, passando por Itabirito e Cachoeira do Campo e chegando em Ouro

Preto. Em Ouro Preto, o acesso se dá pela Rua Padre Rolim, passando pela Praça Tiradentes, com acesso à Avenida Farmacêutico Duílio Passos, sendo essa a principal via dentro da área de estudo. As demais vias inseridas na área estão representadas na Figura 1.1.



**Figura 1.1:** Localização e via de acesso à área de estudo (Imagens: Google Earth).

### 1.3 OBJETIVO

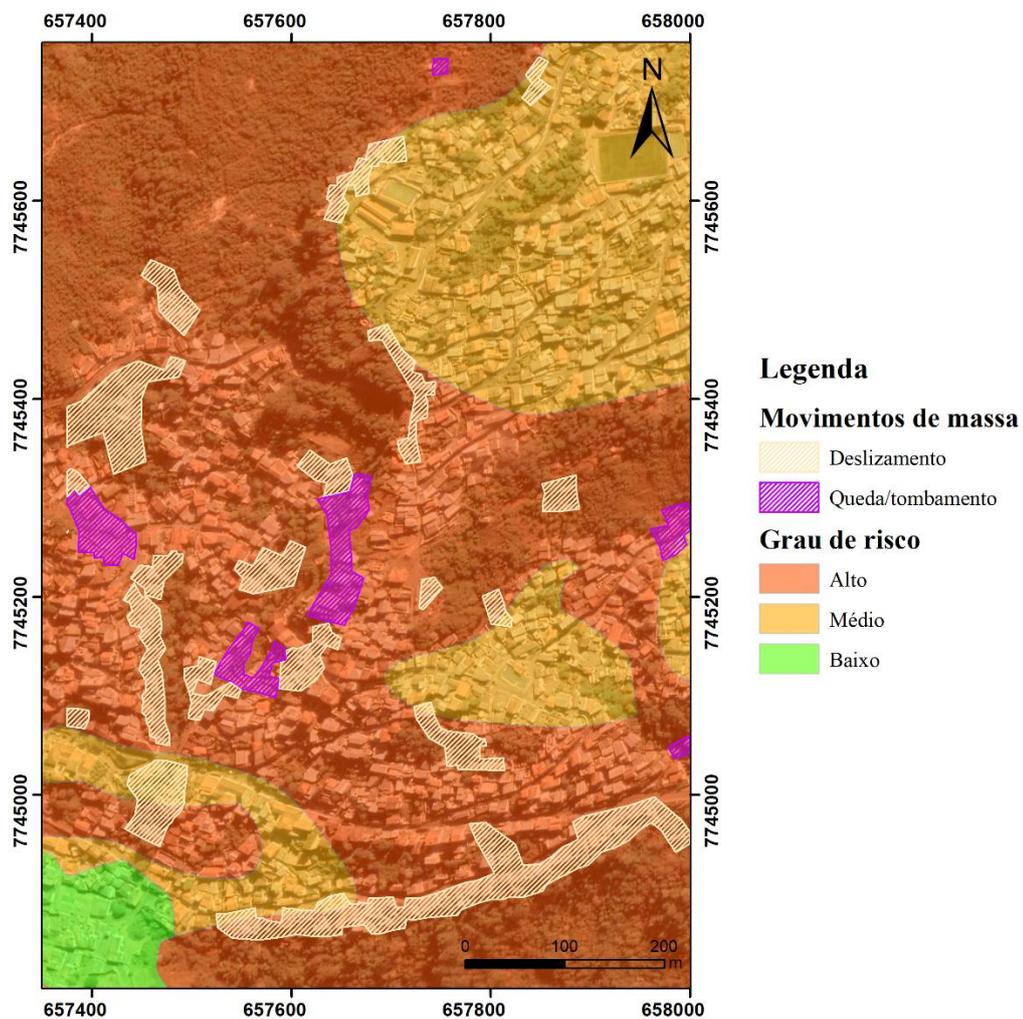
O objetivo deste estudo é a definição de características de áreas de risco de movimento de massa na porção oriental da Serra de Ouro Preto a partir de propriedades geofísicas e sua análise integrada com os dados geológicos e geotécnicos disponíveis.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Ouro Preto é um município do estado de Minas Gerais que enfrenta problemas devido a ocorrências de movimentos de massa desde o seu povoamento, no início do século XVIII, durante o

Ciclo do Ouro. A partir de 1945, com a corrida do alumínio e consequente aumento populacional, o processo de expansão das áreas urbanas não foi acompanhado de planejamento prévio adequado, ocasionando a ocupação de áreas que apresentam características morfológicas, geológicas e geotécnicas inadequadas (Sobreira & Fonseca 2001a).

A área selecionada para este estudo consiste numa região retangular com área total de 59,37ha. De acordo com o projeto “Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes, Inundações e Movimentos de Massa” realizado pela CPRM em 2016 (Goes *et al.* 2016), 6,19ha da área selecionada, o que corresponde a 10,4% da área total, apresenta algum grau de risco geotécnico, predominando os riscos de deslizamento e queda/tombamento de blocos. Ao total, na data em que foi conduzido tal projeto, foi estimado que 850 pessoas que habitavam esta região corriam risco direto de serem afetadas por algum movimento de massa. Cabe também ressaltar que 71,7% da área de estudo está classificada como possuindo um alto grau de risco, 26,4% como risco médio e apenas 1,9% como baixo risco (Figura 1.2).



**Figura 1.2:** Regiões com risco de deslizamento e queda/tombamento de blocos (modificado de Goes *et al.* 2016).

Muitos estudos recentes dedicaram-se a examinar com mais profundidade os aspectos que condicionam e propiciam a ocorrência dos movimentos de massa a partir de diferentes metodologias, como a utilização de análise estatística para determinação dos fatores que influenciam o impacto dos movimentos de massa (Souza 2019) e para classificação de mapas de susceptibilidade a movimentos de massa (Barella 2016). No entanto, muitas destas análises se baseiam apenas em aspectos superficiais do terreno como declividade e a geometria e material do talude, sem levar em consideração os fatores em subsuperfície, devido à indisponibilidade destas informações

O emprego de métodos geofísicos na identificação e caracterização de parâmetros condicionantes de movimento de massa em subsuperfície é algo ainda não realizado nesta região selecionada para estudo.

## 1.5 METODOLOGIA

A primeira etapa do desenvolvimento deste trabalho consistiu no levantamento de informações bibliográficas disponíveis na literatura e banco de dados públicos, para que fosse delimitada uma área no município de Ouro Preto com alto risco geotécnico e que fosse densamente povoada. Para isso, foram utilizados os dados de litologia e estruturas geológicas descritas em Endo *et al.* (2019), os dados de levantamento aéreo de alta resolução de magnetometria e radiometria (CODEMG 2001) realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em parceria com a Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG), e os dados de geotecnia e susceptibilidade de riscos elaborados pela CPRM e pela Defesa Civil de Ouro Preto (Goes *et al.* 2016). Estes dados foram analisados de forma integrada com a finalidade de se definir uma área que apresente um número elevado de estruturas e litologias que sejam propícias à movimentos de massa e com alto potencial de danos a estruturas e vidas humanas.

Em seguida, foram realizados levantamentos terrestres de magnetometria e gravimetria, além de aplicação de método elétrico nas regiões cujas condições geológicas e geotécnicas são mais propícias a ocorrências de movimentos de massa com a finalidade de identificação e caracterização de estruturas em subsuperfície que potencializam os riscos, como descontinuidades geológicas, zonas preferenciais de percolação de água e cavidades, por exemplo.

Por fim, todos os dados obtidos em levantamento foram processados e interpretados de forma integrada com as informações bibliográficas já existentes para que fosse definida uma nova classificação de risco geotécnico para a área, que seja embasada nas propriedades geofísicas observadas.

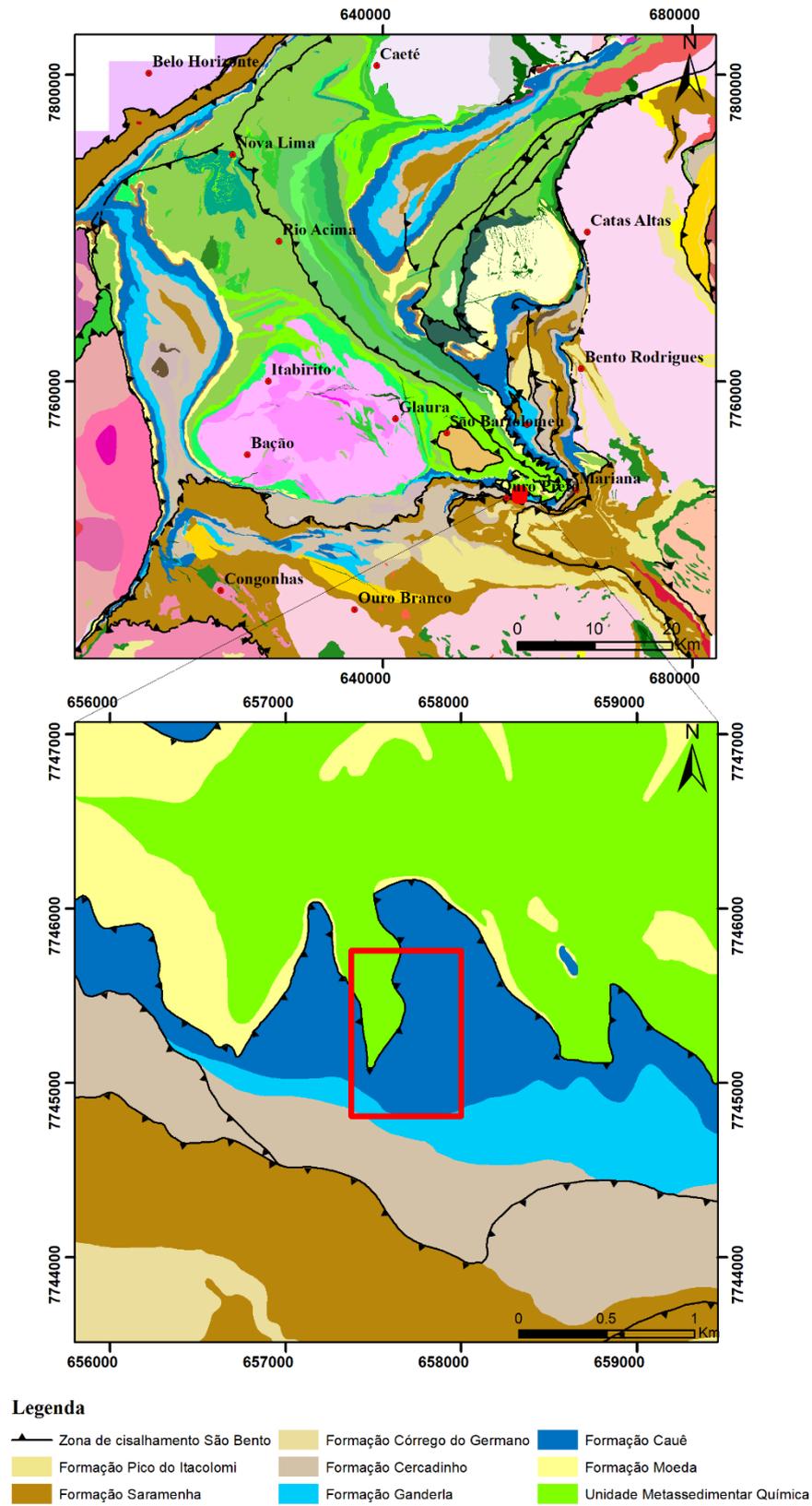
## CAPÍTULO 2

### CONTEXTO GEOLÓGICO

---

#### 2.1 CONTEXTO REGIONAL

A região na qual foi desenvolvido o estudo encontra-se localizada na porção setentrional do Cráton São Francisco, na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2.1). Nesta porção do cráton afloram rochas de idade arqueanas e paleoproterozoicas além da presença de cobertura cenozoica com padrões de deformação que remetem aos ciclos Transamazônico (Paleoproterozoico) e Brasileiro (Neoproterozoico) (Alkmim *et al.* 1993).



**Figura 2.1:** Mapa simplificado geológico do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a região onde foi conduzida este estudo (modificado de Endo *et al.* 2019).

## 2.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

As unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero são representadas por rochas correspondentes ao embasamento cristalino recobertas por coberturas vulcânicas e sedimentares metamorizadas correspondentes a vários ciclos de deposição tanto em ambiente continental como em ambiente marinho (Alkmim & Marshak 1998). A coluna litoestratigráfica elaborada por Endo *et al.* (2019) está ilustrada na Figura 2.2. Neste estudo, será dada ênfase às litologias no Neoproterozoico e do Paleoproterozoico do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas.

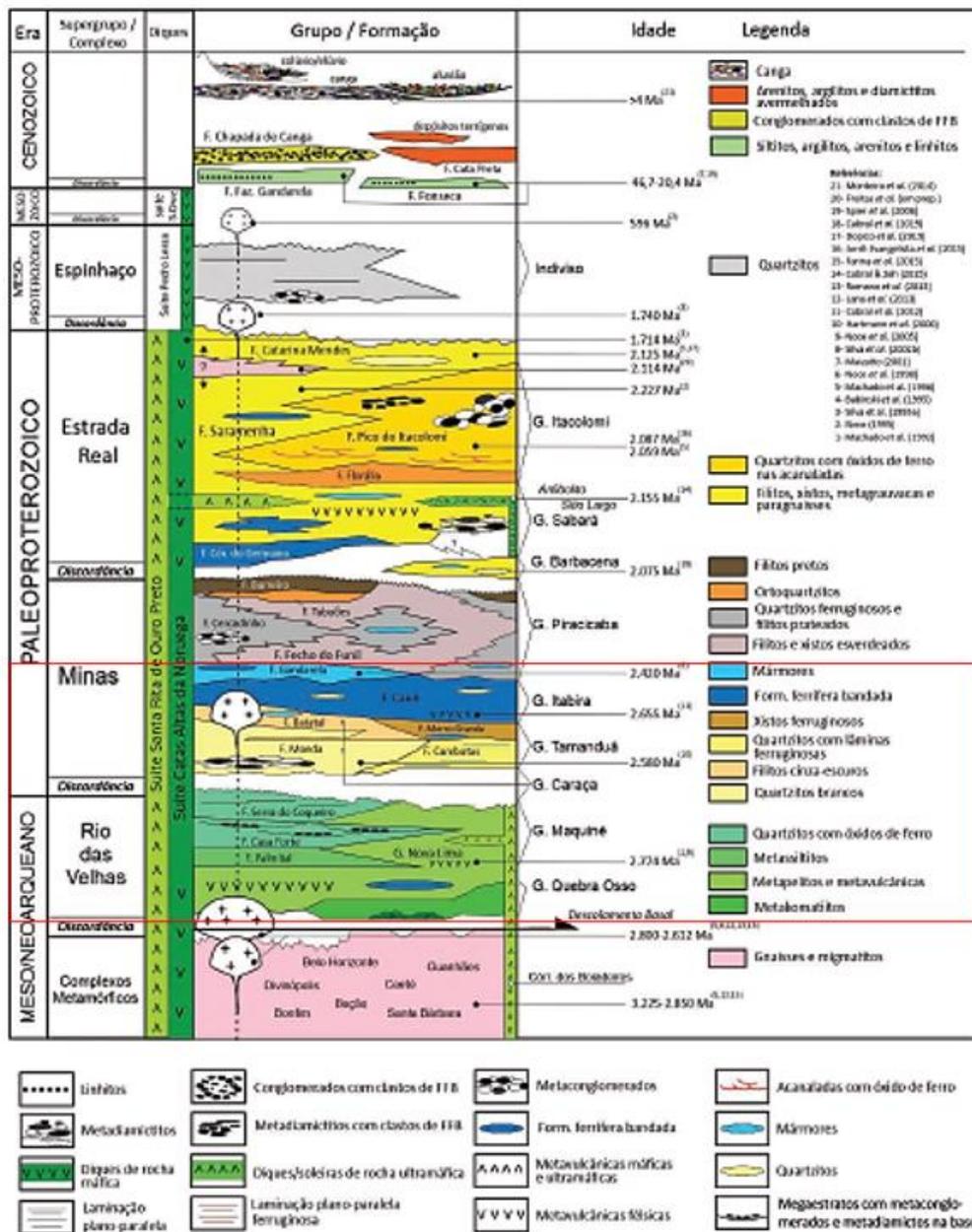


Figura 2.2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019) com destaque para as Formações que afloram na área de estudo

### **2.2.1 Embasamento cristalino**

O embasamento cristalino é formado essencialmente por crosta arqueana constituída por TTGs (tonalito-trondhjemito-granodiorito), migmatitos, granitos e enxames de diques máficos (Alkmim & Teixeira 2016).

Estas rochas estão dispostas majoritariamente na forma de domos invertidos e confinados por estruturas transpressionais. É representado pelos complexos Bação, Bonfim e Belo Horizonte.

### **2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas**

O Supergrupo Rio das Velhas é descrito como sendo o resultado de quatro ciclos sedimentares podendo ocorrer vulcanismo associado (Baltazar & Zucchetti 2007), composto pelos grupos Nova Lima, mais antigo e de granulação mais fina e Maquiné, mais recente e de granulação mais grossa.

O Grupo Nova Lima apresenta associação de rochas vulcânicas e sedimentares metamorfizadas em baixo grau, com destaque para as ocorrências auríferas e rochas de protólito ultramáfico, como os esteatitos (Lobato *et al.* 1998). O topo do Grupo Nova Lima é composto pela Formação Palmital, formada por xistos e filitos. Já o Grupo Maquiné sobrepõe o Grupo Nova Lima por meio de uma discordância erosiva, onde foram depositados metarenitos, metaconglomerados e filitos subordinados (Moreira *et al.* 2016).

### **2.2.3 Supergrupo Minas**

O Supergrupo Minas é de idade paleoproterozoica e depositado em bacia intracontinental e posteriormente marinha (Renger *et al.* 1995). É composto por três unidades: Grupo Caraça, de deposição siliciclástica basal; Grupo Itabira, de deposição química intermediária e Grupo Piracicaba, de deposição clástica de topo (Marshak & Alkmim 1989).

O Grupo Caraça é composto pela Formação Moeda na base, marcado por uma discordância erosiva com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, e é constituída de quartzitos e conglomerados. Estes, por sua vez, transicionam gradativamente para as rochas pelíticas da Formação Batatal, composta majoritariamente de filitos (Alkmim & Teixeira 2016).

O Grupo Itabira é subdividido entre as Formações Cauê e Gandarela, ambas caracterizadas por sedimentação química em ambiente marinho. A Formação Cauê concentra importante concentração de óxidos de ferro no contexto do Quadrilátero Ferrífero, com depósitos de BIF do tipo Lago Superior (Cabral & Pires 1995). A formação Gandarela é constituída por rochas carbonáticas, como dolomitos ferruginosos, margas e filitos dolomíticos (Endo 1997).

O Grupo Piracicaba é marcado na base por descontinuidade erosiva em relação às unidades anteriores, e é formado por pacotes de sedimentos deltaicos recobertos por pelitos, arenitos e folhelhos (Renger *et al.* 1995).

O Grupo Sabará é constituído por pelitos e grauvacas intercalados por camadas e lentes de diamictitos, conglomerados e arenitos, sendo caracterizado como depósitos de ambiente de sequências turbidíticas (Reis *et al.* 2002).

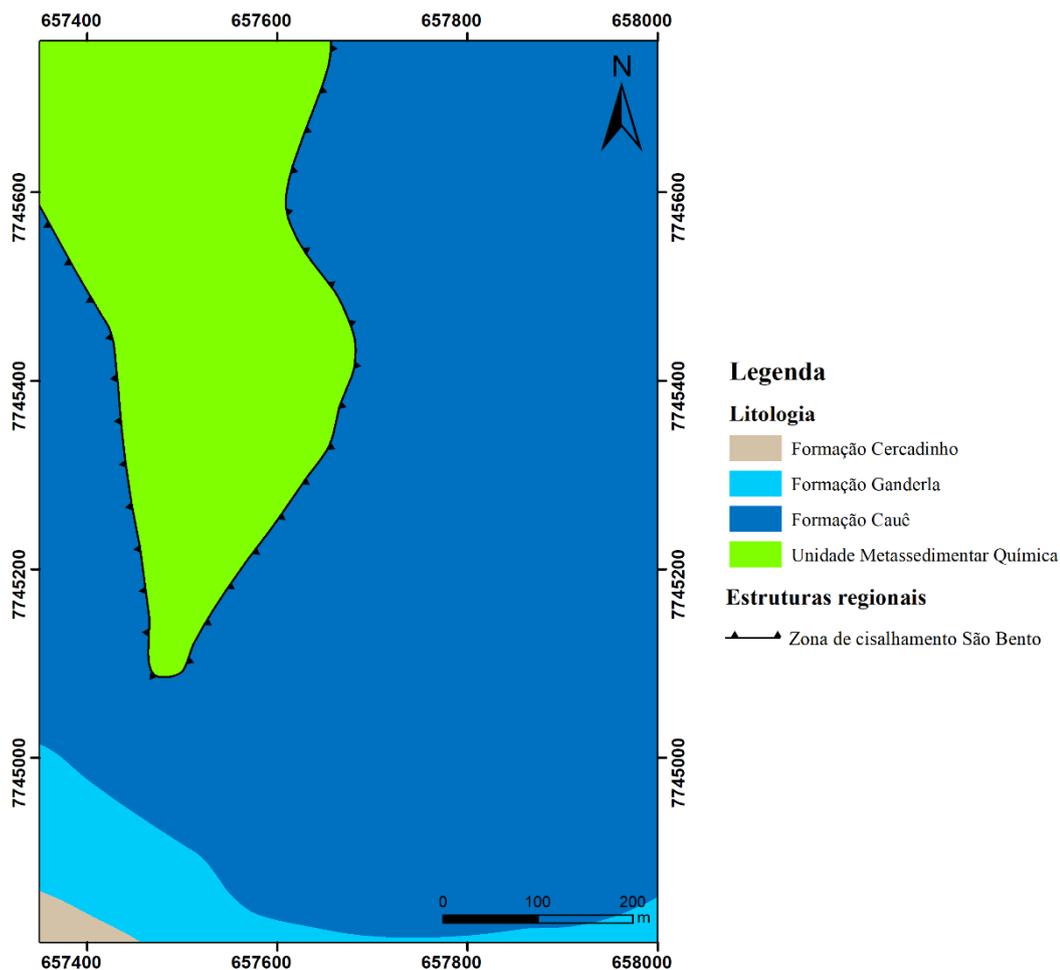
#### **2.2.4 Supergrupo Espinhaço e Coberturas Cenozoicas**

O Supergrupo Espinhaço é formado majoritariamente por quartzitos e metaconglomerados com intercalações de sericita-xisto, desenvolvido em bacia do tipo *rift* (Garcia & Uhlein 1987).

As coberturas cenozoicas são compostas por aluviões, colúvios, canga e laterita (Varajão 1988), distribuídas pelas formações Fonseca, Fazenda do Gandarela e Gongo Soco. As cangas são constituídas de material com alto teor de ferro de origem química ou detrítica (Dorr 1969). Os depósitos elúvio-coluvionares predominam nas regiões de alto topográfico com formações ferríferas e quartzitos que suportam o relevo (Endo *et al.* 2019)

### **2.3 GEOLOGIA LOCAL**

Na área de estudo predominam as rochas do Grupo Nova Lima na porção central setentrional, carbonatos da Formação Gandarela na porção meridional, e os itabiritos da Formação Cauê constituindo a maior parte da área, como mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Mapa geológico da área de estudo (modificado de Endo *et al.* 2019).

Os contatos entre as Formações Cauê e Gandarela ocorrem de forma transicional, enquanto o contato entre a Formação Cauê e as rochas do Grupo Nova Lima (Unidade Metassedimentar Química) é controlado pela Zona de Cisalhamento São Bento.

A Zona de Cisalhamento São Bento é definida por Endo *et al.* (2019) como sendo uma das estruturas que controlam o Sistema de *Nappes* Ouro Preto. Apresenta cinemática de topo dirigido para SSW e vorticidade horária em torno do eixo com caimento para ESE. É caracterizada pela natureza compressiva que coloca em contato discordante as rochas do Supergrupo Minas com as rochas do Grupo Nova Lima, e se estende até a porção norte do município de Santa Bárbara.

# CAPÍTULO 3

## GEOTECNIA

---

Neste capítulo, tratam-se os principais aspectos levados em consideração durante a classificação de risco geológico, os principais tipos de movimentos de massa que acometem a região selecionada para este estudo e os principais fatores físicos e estruturais que condicionam os movimentos de massa. A setorização de áreas de risco geológico é uma ferramenta amplamente utilizada por órgãos públicos de planejamento urbano como forma de identificar e caracterizar porções urbanizadas do terreno sujeitas a perdas materiais e humanas e decorrência de evento adversos de natureza geológica.

### 3.1 RISCO GEOLÓGICO

Risco e perigo são muitas vezes utilizados com diferentes conotações na literatura, sendo, portanto, necessário traçar uma distinção entre ambos os conceitos. A definição utilizada neste trabalho é aquela trazida por Tominaga (2009), que apresenta o risco como sendo expresso pela combinação entre vulnerabilidade, perigo e dano potencial, conforme mostra a Equação 3.1.

$$R = P * V * DP \qquad \text{Equação 3.1}$$

sendo  $R$ , o risco geológico;  $P$ , o perigo;  $V$ , a vulnerabilidade e  $DP$ , o dano potencial. Cada item, a partir de Lana *et al.* (2021), pode ser definido como:

- **Risco:** probabilidade de ocorrência e severidade de um efeito adverso à saúde, propriedade ou meio ambiente.
- **Perigo:** condição com potencial para causar consequência indesejável em um intervalo de tempo. Deve incluir o local, a área de deflagração e atingimento, velocidade e probabilidade de ocorrência em um dado período.
- **Vulnerabilidade:** grau de perda de um dado elemento ou grupo de elementos em uma área afetada por um evento adverso. Reflete condições determinadas por fatores físicos, relacionados à característica da ocupação, resistência das construções, existência de infraestrutura e por fatores humanos, relacionados aos aspectos econômicos, sociais, políticos, técnicos, culturais, educacionais e institucionais.
- **Dano potencial:** estimativa da extensão do dano resultante, expresso pelo número de pessoas ou pelo valor das propriedades e bens sob risco.

Posto estas definições, o perigo é muitas vezes inevitável (como excesso de chuvas, terremotos, etc.). No entanto, com base na investigação dos fenômenos e no entendimento de seus mecanismos de atuação, é possível minimizar o risco de um desastre a partir de medidas tomadas de forma a reduzir tanto a vulnerabilidade quanto os danos potenciais (Lana *et al.* 2021).

No município de Ouro Preto, o processo desordenado de ocupação urbana oriunda das atividades mineradoras do final do século XVIII ocasionaram intensas modificações no relevo original das serras (Pinheiro *et al.* 2004). A partir dos anos 1960, antigas áreas de mineração foram ocupadas devido ao crescimento populacional, o que intensificou ainda mais a ocorrência de movimentos de massa que afetam diretamente a população que reside nestas áreas de alto risco (Sobreira & Fonseca 2001b).

Para que sejam realizadas implementações que visam mitigar e/ou reduzir o risco geológico de uma área, é necessário que antes seja realizada uma avaliação dos fatores que contribuem para o risco. Esta avaliação é realizada através da setorização das áreas de risco geológico, um instrumento de grande importância para o ordenamento territorial e prevenção de desastres (Lana *et al.* 2021). As setorizações são realizadas apenas em áreas onde há permanência humana, como casas, hospitais, escolas ou regiões próximas a estradas e rodovias. As principais aplicabilidades das setorizações de áreas de risco são (Lana *et al. op cit.*):

- seleção de áreas prioritárias a serem contempladas por ações destinadas à prevenção de desastres;
- fornecer informações para elaboração de projetos de intervenção estrutural;
- contribuir com embasamento técnico para a elaboração de planos de contingência;
- fomentar ações de fiscalização cujo objetivo é desincentivar o avanço da ocupação nas áreas mapeadas com alto risco;
- direcionar ações da Defesa Civil.

### **3.2 MOVIMENTOS DE MASSA**

Os movimentos de massa são eventos naturais, que podem ou não ser intensificados ou condicionados por fatores antrópicos, e que acarretam significativos prejuízos financeiros e humanos, além de comprometer parte da infraestrutura urbana como edifícios, rede de saneamento, rede elétrica e estradas (Barella 2016).

Estes consistem no deslocamento de material solto (como blocos de rocha, ou solo) causado pela ação da gravidade combinada com a influência dos demais agentes transportadores, como água, gelo ou ar (Bigarella 2003).

### 3.2.1 Classificações

Os movimentos de massa podem ser classificados em relação ao tipo de material envolvido, ao modo de movimento deste material, velocidade e direção do deslocamento, profundidade e raio de alcance e características da superfície de ruptura (Washburn 1938, Terzaghi 1950, Freire 1965, Varnes 1978, Augusto Filho 1992, Turner & Schuster 1996).

Neste trabalho, serão apresentadas a classificação de Varnes (1978), utilizada pelo serviço geológico dos Estados Unidos, amplamente utilizada no Brasil, o que permite traçar um comparativo internacional dos diferentes tipos de movimentos de massa, e a classificação de Augusto Filho (1992).

A classificação de Varnes (1978) leva em consideração a combinação do tipo de movimento e o tipo de material deslocado, como mostra o Quadro 3.1.

**Quadro 3.1:** Classificação de movimentos de massa segundo Varnes (1978).

Tipo de movimento	Tipo de material		
	Rocha	Solo	
		Grossoiro	Fino
<b>Queda</b>	Queda de rocha	Queda de detrito	Queda de terra
<b>Tombamento</b>	Tombamento de rocha	Tombamento de detrito	Tombamento de terra
<b>Deslizamento</b>	<b>Translacional</b> Deslizamento translacional de rocha	Deslizamento translacional de detrito	Deslizamento translacional de terra
	<b>Rotacional</b> Deslizamento rotacional de rocha	Deslizamento rotacional de detrito	Deslizamento rotacional de terra
<b>Espalhamento</b>	Espalhamento de rocha	Espalhamento de detrito	Espalhamento de terra
<b>Fluxo</b>	Fluxo de rocha	Fluxo de detrito	Fluxo de terra
	Rastejo profundo	Rastejo de solo	
<b>Complexo</b>	Combinação de dois ou mais tipos de movimento		

A classificação elaborada por Augusto Filho (1992) classifica os movimentos de massa de acordo com as características do movimento, como a quantidade de planos de deslocamento e velocidade do movimento, o tipo de material deslocado e a geometria da forma erosiva, como mostra o Quadro 3.2.

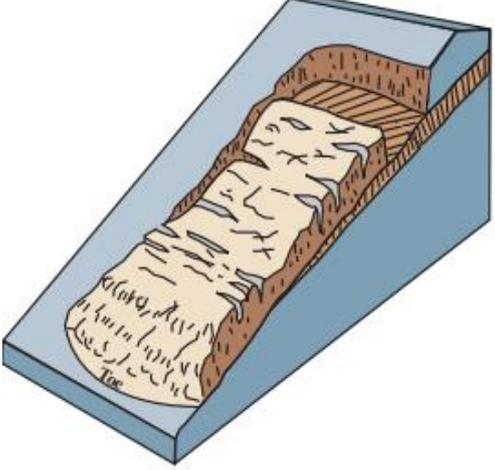
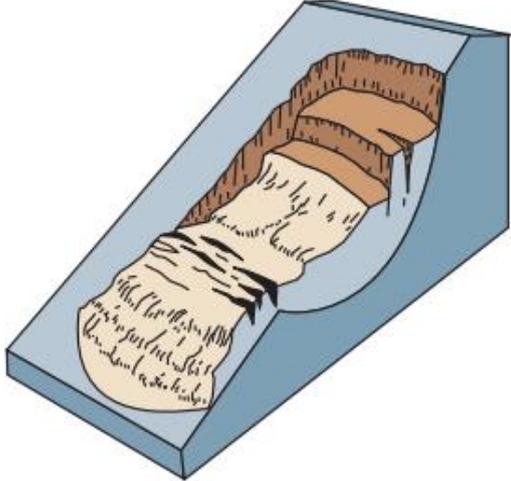
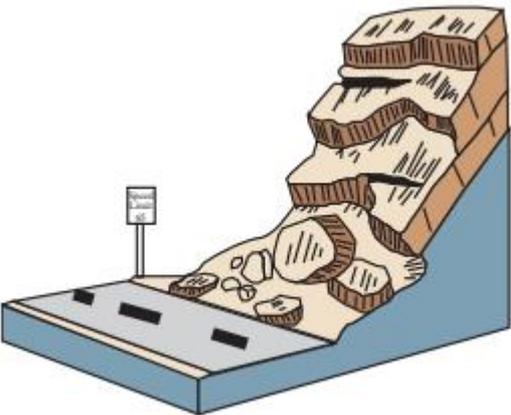
**Quadro 3.2:** Classificação dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (adaptado de, 1992).

<b>Classificação</b>	<b>Superfície</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Volume</b>	<b>Tipo de material</b>	<b>Geometria</b>
<b>Rastejo</b>	Vários planos de deslocamento (internos)	Muito baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade	Pequenos a grandes	Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada	Indefinida
<b>Deslizamentos</b>	Poucos planos de deslocamento (externos)	Médias (m/h) a altas (m/s)	Pequenos a grandes	<b>Planares:</b> solo pouco espesso, solos e rocha com um plano de fraqueza	
				<b>Rotacionais:</b> solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas	
				<b>Em cunha:</b> solos e rochas com dois planos de fraqueza	
<b>Quedas e tombamento</b>	Sem planos de deslocamento	Muito altas (vários m/s)	Pequeno a médio	Rochoso	Lascas, placas, blocos, etc.
<b>Corridas</b>	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas)	Médias (m/h) a altas (m/s)	Grande	Solo, rocha, detritos e água	Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

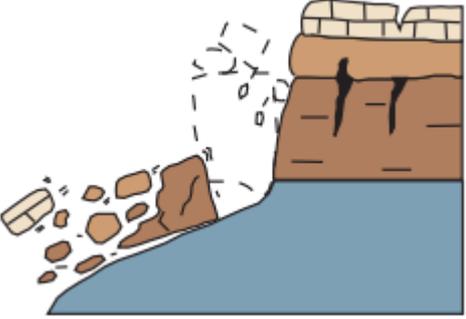
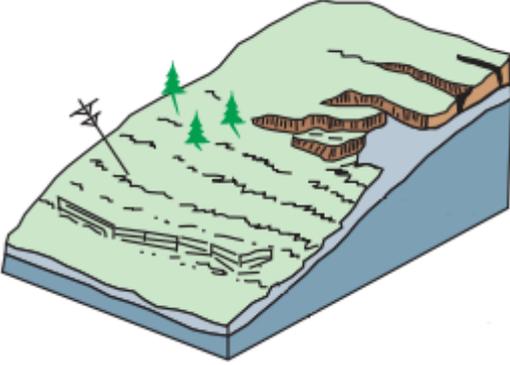
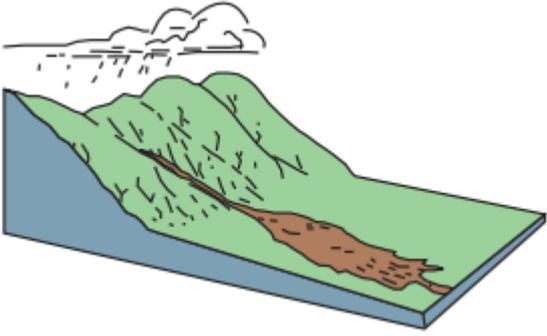
### 3.2.2 Características dos movimentos de massa

Uma breve descrição dos principais movimentos de massa que afetam a região deste estudo está descrita na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Características dos principais movimentos de massa (adaptado de USGS 2016).

Tipo de movimento	Características
 <p data-bbox="395 840 662 873"><b>Deslizamento planar</b></p>	<p>O material deslocado durante o movimento de massa move-se sobre uma superfície plana sem apresentar rotação ou inclinação para montante. A ruptura desenvolve-se a partir de pontos de fraqueza como falhas e/ou fraturas e a superfície de descolamento ocorre preferencialmente em discontinuidades como maciços rochosos foliados que apresentam ângulos desfavoráveis ou no contato solo/rocha.</p>
 <p data-bbox="375 1422 683 1456"><b>Deslizamento rotacional</b></p>	<p>A superfície de ruptura apresenta geometria com curvatura côncava e o movimento do material deslocado apresenta rotação em torno de um eixo paralelo ao plano horizontal. É mais frequente em maciços homogêneos, como solos, sedimentos e rochas alteradas. Tende a ser mais profundo que o deslizamento planar.</p>
 <p data-bbox="422 1937 635 1971"><b>Queda de blocos</b></p>	<p>As quedas de blocos são movimentos abruptos de materiais que se soltam de taludes muito inclinados. Este descolamento ocorre por meio das discontinuidades como fraturas, falhas ou planos de acamamento.</p>

**Tabela 3.1 (continuação):** Características dos principais movimentos de massa (adaptado de USGS 2016).

Tipo de movimento	Características
 <p data-bbox="443 696 616 723"><b>Tombamento</b></p>	<p data-bbox="842 394 1390 674">O tombamento é caracterizado pelo movimento rotacional do material deslocado no sentido contrário do talude. É frequente em maciços rochosos com foliação bastante inclinada e cujo mergulho tenha sentido contrário ao do talude.</p>
 <p data-bbox="480 1133 579 1160"><b>Rastejo</b></p>	<p data-bbox="842 763 1390 1144">O rastejo ocorre por meio de movimentos lentos e contínuos de material na direção de mergulho do talude. É causado pela atuação de forças cisalhantes que deformam permanentemente o material. A deformação é acomodada em vários planos de deslocamento internos e pode ocorrer em movimentos constantes, sazonais ou intermitentes.</p>
 <p data-bbox="419 1574 641 1601"><b>Fluxos / Corridas</b></p>	<p data-bbox="842 1252 1390 1585">Os fluxos ou corridas ocorrem quando o material nas encostas atinge saturação em água e passa a apresentar propriedades de um líquido viscoso. Desenvolve-se preferencialmente ao longo de drenagens e mobilizam diversos materiais, como solo, rocha, detritos e água.</p>

### 3.2.3 Fatores condicionantes dos movimentos de massa

As pesquisas desenvolvidas atualmente para análise e classificação de susceptibilidade a movimentos de massa utilizam como base técnicas de manipulação digital de imagens e informações espaciais, como o GIS, GPS e sensoriamento remoto (Van Western 1993). As informações processadas

consistem em atributos do terreno que são considerados relevantes na identificação e caracterização de futuros movimentos de massa. O Quadro 3.3 resume estes principais atributos.

**Quadro 3.3:** Fatores condicionantes da susceptibilidade a movimentos de massa (adaptado de Van Western *et al.* 2003).

<b>Grupo</b>	<b>Atributo</b>	<b>Relevância</b>
<b>Modelo digital de terreno (DTM)</b>	Declividade	Fator mais importante para movimentos gravitacionais
	Direção da face	Pode indicar diferenças na umidade do solo e vegetação
	Geometria das encostas	Indicador da hidrologia das encostas
	Direção de fluxo	Usado na modelagem hidrológica
	Acumulação de fluxo	Usado na modelagem hidrológica
	Amplitude de elevação	Usado nas escalas de detalhe indicando o tipo do terreno
	Densidade de drenagens	Usado nas escalas de detalhe indicando o tipo do terreno
<b>Geologia</b>	Litologia	Mapa litológico enfocando o comportamento reológico
	Intemperismo	A profundidade do manto de intemperismo é um atributo importante na avaliação de movimentos de massa
	Descontinuidades	A frequência e características das descontinuidades afetam a coesão interna do maciço rochoso
	Aspectos estruturais	Importantes para estabelecer a relação entre face do talude e foliações/descontinuidades internas
	Falhas	O espaçamento e geometria das falhas são fatores importantes na análise do impacto dos movimentos
<b>Solo</b>	Tipos de solo	Classificação de acordo com características mecânicas
	Profundidade de solo	Pode ser obtida por furos de sonda, geofísica e afloramentos
	Propriedades geotécnicas	Distribuição do tamanho de grãos, coesão, ângulo de atrito, peso específico são cruciais para análise de estabilidade
	Propriedades hidrológicas	Volume de poros, condutividade saturada e curva de retenção de água são usados na modelagem de fluxo de água subterrânea
<b>Hidrologia</b>	Nível d'água	Variação espacial e temporal da profundidade do lençol freático
	Saturação do solo	Variação temporal e espacial do grau de saturação do solo
	Componentes hidrológicos	Interceptação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração
	Rede de drenagem	Área de influência de drenagens de primeira ordem, ou área de influência de rios erosivos
<b>Geomorfologia</b>	Unidades fisiográficas	Subdivisão do terreno em zonas, importante para o mapeamento em menor escala
	Unidades mapeáveis do terreno	Unidades homogêneas do ponto de vista da litologia, morfologia e processos erosivos
	Unidades geomorfológicas	Classificação genética dos principais processos de formação de relevo

**Quadro 3.3 (continuação):** Fatores condicionantes da susceptibilidade a movimentos de massa (adaptado de Van Western *et al.* 2003).

Grupo	Atributo	Relevância
Uso do terreno	Mapa de uso e ocupação	O tipo de cobertura do solo é um dos principais atributos que interferem na estabilidade dos solos
	Mapa de variação de uso	Variação temporal do uso e cobertura do solo
	Vegetação	Tipo de vegetação, tipo de copa das árvores, profundidade das raízes, coesão das raízes, peso, etc.
	Estradas	Área de influência ao redor das estradas localizadas em terreno íngreme com corte de taludes
	Construções	Áreas com cortes de talude realizados para áreas de construção podem ser usadas como atributo

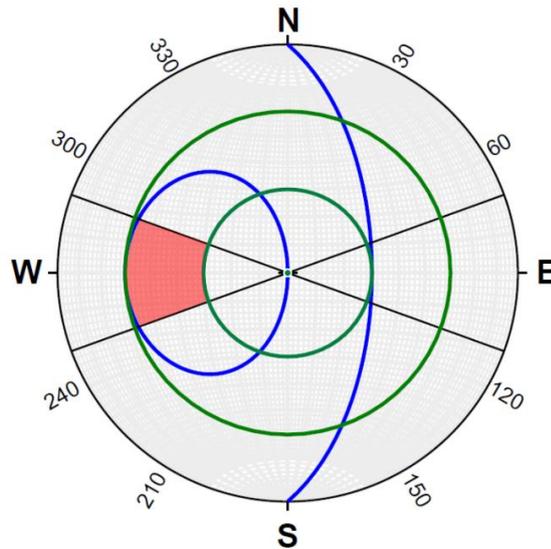
### 3.3 ANÁLISE CINEMÁTICA DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise cinemática examina os possíveis modos de movimentos de massa de uma encosta rochosa com base nas características geométricas que levam em consideração a orientação e inclinação de descontinuidades e do plano da encosta, e o ângulo de atrito da rocha (Kliche 1999).

O teste de Markland (1972) é uma ferramenta de grande utilidade para identificar se o conjunto de descontinuidades de um maciço rochoso apresenta alguma susceptibilidade a tombamento, queda de blocos, ou deslizamento do tipo planar ou em cunha. Estas análises podem ser bem representadas a partir de estereogramas, onde plota-se os planos de descontinuidades, a superfície do talude, e o cone de atrito.

Os deslizamentos do tipo planar são cinematicamente possíveis num contexto em que a inclinação da descontinuidade é mais suave em relação à inclinação do talude, e ambas as inclinações são maiores que o ângulo de atrito.

A Figura 3.1 é uma representação em estereograma da análise de possibilidade cinemática de deslizamento planar a partir das informações de atitude do talude e do ângulo de atrito. Neste caso, os planos de descontinuidade cujos polos incidam sobre a área destacada em vermelho são propícios a deslizamento. É importante destacar que neste caso o mergulho das descontinuidades deve ter direção próxima do mergulho do talude para que exista este tipo de risco. Quanto menor o limite lateral adotado, mais próximas devem ser as direções de ambos os mergulhos. No entanto, usualmente, adota-se valores limites laterais em torno de  $\pm 20^\circ$  a  $\pm 30^\circ$  (Kliche 1999).

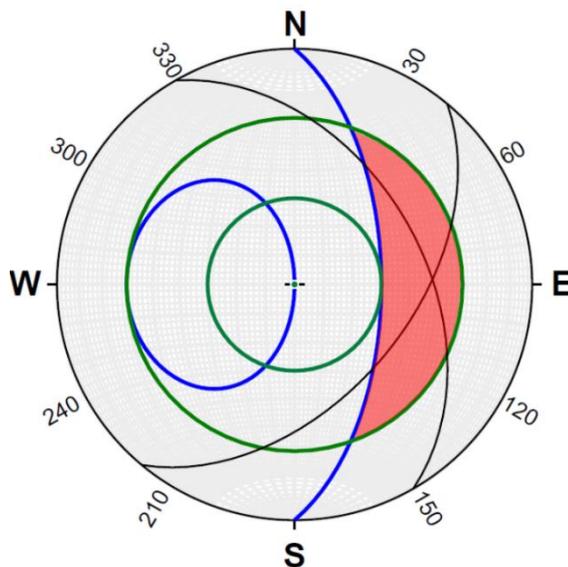


**Figura 3.1:** Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul) e com ângulo de atrito 30° (em verde). Para este exemplo, foram adotados limites laterais de 20° (em preto). As discontinuidades cujos polos incidam sobre a área em vermelho apresentam possibilidade de deslizamento planar.

Cabe ressaltar que o teste de Markland é relativamente conservador, uma vez que adota como verdadeiras as premissas de que todas as discontinuidades são contínuas ao longo de todo o maciço, sendo que muitas vezes isso não é verdade. O fator de uma discontinuidade ser interrompida pode significar um aumento significativo na resistência do maciço. Outro motivo é o fato de que o teste assume que os efeitos da coesão são nulos, e sabe-se que discontinuidades com superfícies coesas apresentam maior resistência ao movimento (Kliche 1999).

Para deslizamentos em cunha, o deslizamento ocorre relacionado à junção de dois planos de discontinuidade. Para que este tipo de movimento de massa seja possível cinematicamente, a linha que representa a interseção entre os dois planos de discontinuidade deve ter mergulho maior que o ângulo de atrito, porém menor que o ângulo de inclinação do talude.

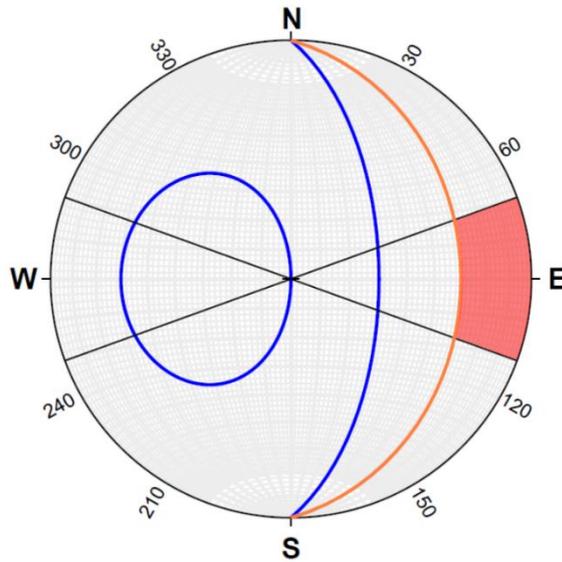
A Figura 3.2 ilustra a representação em estereograma de um teste de Markland para deslizamentos em cunha. Nesta análise, representam-se todos os planos de discontinuidades de modo a determinar todas as diferentes interseções formadas. As interseções que incidirem sobre a área crítica do estereograma são possíveis de apresentarem este tipo de deslizamento.



**Figura 3.2:** Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul) e com ângulo de atrito 30° (em verde). Para este exemplo, foram representados dois planos de descontinuidade com atitudes 60/45 e 130/50 (em preto). As interseções entre dois planos de descontinuidades que incidem sobre a área em vermelho apresentam possibilidade de deslizamento em cunha.

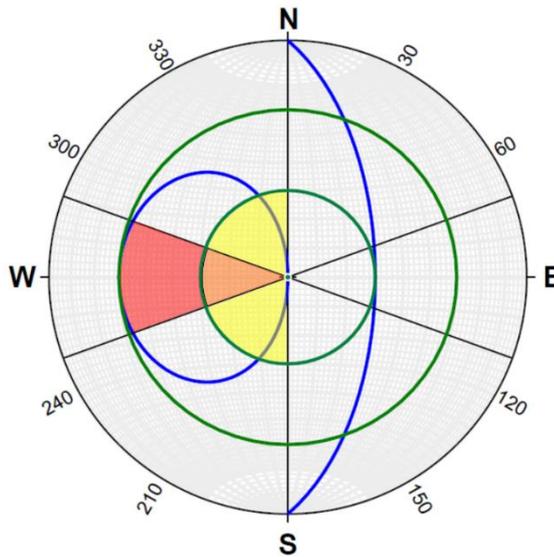
Os tombamentos são cinematicamente possíveis quando o plano da descontinuidade apresenta mergulho na direção oposta do mergulho do talude e cuja inclinação seja mais elevada que a inclinação do ângulo de atrito. Os tombamentos podem ser subdivididos em duas categorias: tombamentos flexurais e tombamentos diretos, cada um apresentando características cinemáticas distintas (Hudson & Harrison 1997).

A Figura 3.3 ilustra um exemplo do teste de Markland para tombamentos flexurais. Os planos cujos polos incidem sobre a área destacada são indicativos de planos que apresentam possibilidade cinemática de movimentação.



**Figura 3.3:** Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul), face de escorregamento 90/30 (em laranja) e limites laterais de 20° (em preto). Os planos cujos polos incidem sobre a área em vermelho apresentam possibilidade de tombamento flexural.

Para análise da possibilidade cinemática de ocorrência de tombamentos diretos, utiliza-se como informações principais a atitude da face da encosta, os limites laterais e o ângulo de atrito, como mostra a Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Representação do teste de Markland para um talude com atitude 90/60 (em azul), ângulo de atrito de 30° (em verde) e limites laterais de 20° (em preto). As interseções entre planos ou planos cujos polos incidem sobre as áreas destacadas apresentam possibilidade cinemática de tombamento direto.

Para análise de tombamento direto, deve-se analisar tanto as interseções críticas quanto os planos críticos de um maciço rochoso. São consideradas interseções críticas todas as linhas plotadas dentro da área em destaque do estereograma da Figura 3.4. As linhas que incidem sobre as áreas vermelho e

laranja encontram-se dentro dos limites laterais e mergulham em direção à face do talude. As linhas localizadas dentro da área laranja, por serem bem verticalizadas, apresentam maior risco de tombamento direto. Já as linhas localizadas na área amarela, são chamadas de interseções de tombamento oblíquo. Estas linhas são caracterizadas por serem subverticalizadas, porém estão fora dos limites laterais, e, portanto, apresentam menor risco.

Em relação aos planos críticos, aqueles cujos polos incidem sobre as áreas laranja e amarela da Figura 3.4 são caracterizados como superfície de descolamento a qual desprende-se o bloco tombado. Aqueles que incidem sobre a área amarela são propícios a tombamentos oblíquos. Caso exista uma quantidade significativa de polos dentro do círculo de atrito, mesmo que na mesma direção de mergulho do talude, existe a possibilidade destes planos também atuarem como superfície de descolamento. Os polos que estão localizados na área vermelha podem atuar tanto como planos de descolamento no caso de tombamento direto, como também planos de deslizamento do tipo planar. Nestes casos, portanto, ambos os tipos de movimentos de massa podem ocorrer simultaneamente.

# CAPÍTULO 4

## MÉTODOS GEOFÍSICOS

---

A geofísica tem como finalidade a investigação do meio subterrâneo por meio de propriedades físicas inerentes das rochas. Neste capítulo discute-se a fundamentação teórica dos métodos geofísicos empregados neste trabalho: gravimetria, magnetometria, radiometria e eletrorresistividade.

### 4.1 MÉTODOS POTENCIAIS

Os métodos potenciais, para a geofísica, correspondem às informações obtidas a partir da leitura de um campo potencial observado em uma determinada localidade, e que não depende, portanto, do tempo. Dessa forma, são classificados como métodos potenciais a gravimetria e a magnetometria.

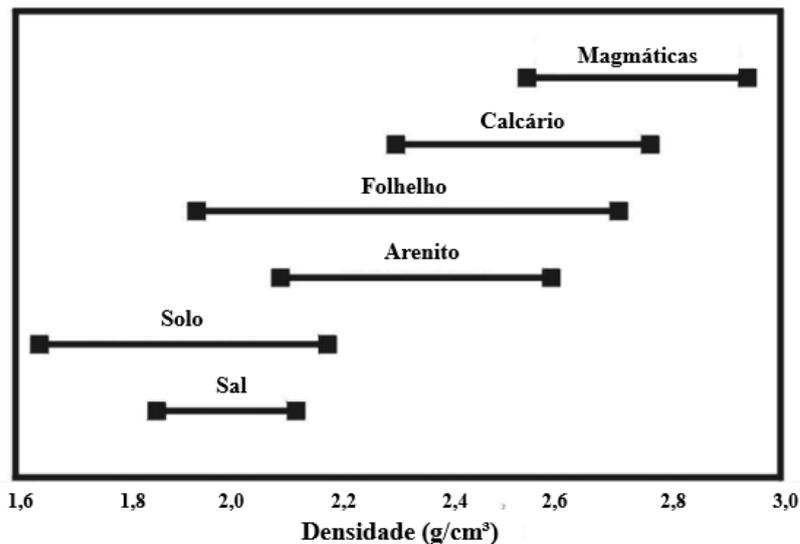
O levantamento gravimétrico identifica diferenças anômalas na distribuição de massa em subsuperfície, sendo proporcional à densidade das rochas, enquanto o levantamento magnetométrico identifica a variação na susceptibilidade magnética dos minerais, variando proporcionalmente ao teor de minerais ferrimagnéticos como a magnetita, pirrotita e ilmenita contidos na rocha (Telford *et al.* 1990).

#### 4.1.1 Gravimetria

O levantamento de gravimetria identifica a mudança no campo gravitacional causada pela variação de massa em subsuperfície. Pela lei da gravitação universal da Equação 4.1:

$$F = \frac{-G * m_1 * m_2}{r^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

Sendo  $F$  a força gravitacional,  $G$  a constante gravitacional universal,  $m_1$  e  $m_2$  os corpos que se atraem e  $r$  a distância entre ambos os corpos. A gravimetria é, portanto, um método sensível aos contrastes de densidade entre as diferentes litologias do substrato rochoso. Esta variação de densidade é exemplificada na Figura 4.1:



**Figura 4.1:** Amplitude de densidades observadas em diferentes tipos de rocha (modificado de Grant & West 1966).

Para que seja obtido o valor de uma anomalia gravimétrica a partir de uma leitura do campo gravitacional total, é necessário que sejam realizadas correções, ou seja, que seja subtraído do sinal obtido todo efeito que não seja decorrente da anomalia. As correções empregadas estão no Quadro 4.1:

**Quadro 4.1:** Correções aplicadas aos levantamentos gravimétricos (modificado de Lines & Newrick 2004).

Correção	Cálculo	Finalidade
<b>Latitude</b>	$g(\varphi) = 978032,7 * (1 + 0,0053024 * \text{sen}^2\varphi + 0,0000059\text{sen}^4\varphi) mGal$ <p>Sendo <math>\varphi</math> a latitude em ângulos</p>	A gravidade em um determinado ponto da Terra varia de acordo com a sua respectiva latitude, sendo mínima na região do Equador.
<b>Free-air</b>	$g(f) = (0,3086 * h) mGal$ <p>Sendo h a elevação do levantamento em metros</p>	A altura do levantamento interfere no campo gravitacional observado. A medida que se aumenta a elevação, mais distante o gravímetro se encontra do centro da Terra, conseqüentemente, menor a gravidade observada.
<b>Bouguer</b>	$g(\rho) = (0,04192 * \rho * h) mGal$ <p>Sendo <math>\rho</math> o contraste de densidade entre os materiais substituídos e h a espessura desta camada</p>	A correção de Free-air não leva em consideração diferença de massa entre o nível do mar e a estação de levantamento. Esta correção, portanto, acrescenta os efeitos desta “fatia”.
<b>Terreno</b>	$g(ter)$	Em áreas muito acidentadas, é recomendável que sejam retiradas ou acrescentadas massas que estejam acima ou abaixo da espessura considerada na correção de Free-air
<b>Anomalia Bouguer</b>	$g(B) = g(\text{medido}) - g(\varphi) + g(f) - g(\rho) + g(ter)$	Corresponde à diferença entre a gravidade teórica e a gravidade medida em um ponto

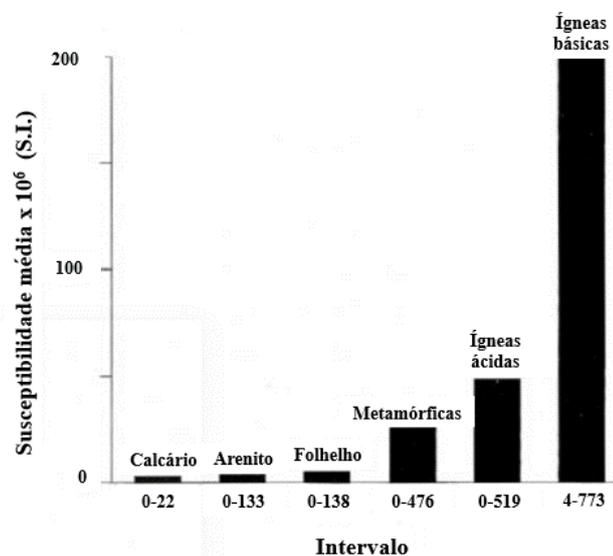
### 4.1.2 Magnetometria

O campo magnético pode ser descrito como sendo um campo vetorial resultante da influência proveniente de uma fonte magnética, e a distância que um determinado objeto se encontra desta fonte, como mostra a Equação 4.2.

$$B = \frac{\mu_0 * m}{4 * \pi * \mu_R * r^2} \quad \text{Equação 4.2}$$

sendo  $\mu_0$  e  $\mu_R$  respectivamente a permeabilidade do vácuo e a permeabilidade relativa do meio,  $m$  a intensidade do polo magnético e  $r$ , a distância entre os polos. Por convenção, é dado que o fluxo magnético originado por qualquer campo magnético, tem origem no polo norte e flui em direção ao polo sul (Kearey *et al.* 2009).

A susceptibilidade magnética é a propriedade que quantifica o campo magnético gerado por um material. No caso das rochas, essa quantidade é proporcional à quantidade e tamanho dos grãos de minerais ferrimagnéticos como a magnetita, pirrotita e ilmenita (Luiz & Silva 1995). A principal finalidade de um levantamento magnético é destacar os contrastes de susceptibilidade magnética entre as rochas, cujos valores médios e intervalo da intensidade de susceptibilidade estão ilustrados na Figura 4.2.



**Figura 4.2:** Valores médios e intervalos de susceptibilidade das rochas (Kearey *et al.* 2009).

Após realizadas as leituras por levantamento terrestre ou aerolevanteamento, algumas correções devem ser feitas para que as informações possam ser interpretadas adequadamente, tais como a correção da variação diurna, correção topográfica e correção geomagnética (Kearey *et al.* 2009).

O principal objetivo de se realizar a redução de observações magnéticas é filtrar do dado obtido em campo todas as componentes magnéticas que não foram produzidas pela fonte anômala. As correções utilizadas para esse fim estão dispostas no Quadro 4.2.

**Quadro 4.2:** Correções de dados magnetométricos (adaptado de Kearey *et al.* 2009).

<b>Correção</b>	<b>Finalidade</b>
<b>Variação diurna</b>	Remover efeitos da variação diurna. Calculada pela diferença entre as leituras feitas nos pontos e uma base fixa.
<b>Geomagnética</b>	Remover efeitos da latitude. Calculada pela subtração do valor de IGRF em cada ponto.
<b>Topográfica</b>	Remover efeitos da altitude. Aplicada apenas em levantamentos terrestres com expressiva variação de altitude.

Após realizadas as devidas correções, os dados magnéticos são interpolados e plotados em mapas coropléticos de forma a possibilitar a interpretação. Existem diversos métodos para a interpolação de dados, sendo o método das mínimas curvaturas aquele que apresenta bons resultados e suavização adequada para a interpretação de dados magnetométricos (O’Connell *et al.* 2005).

A partir da interpolação direta dos dados corrigidos, obtém-se o mapa de campo anômalo, que representa a distribuição da intensidade do campo magnético ao longo da área de estudo. Este tipo de mapa fornece informações importantes para a investigação de estruturas em subsuperfície, uma vez que ressalta apenas o efeito gerado pelas anomalias magnéticas. No entanto, como a natureza do dado provém de uma fonte magnética, que é dipolar, sua interpretação pode ser relativamente complexa (Kearey *et al.* 2009).

Uma forma de filtragem que pode ser aplicada aos dados, consiste no cálculo da amplitude do sinal analítico. Este processamento consiste na determinação do tamanho do vetor do campo magnético anômalo total e pode ser obtido a partir da Equação 4.3.

$$A = \sqrt{\left(\frac{dF}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dF}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dF}{dz}\right)^2} \quad \text{Equação 4.3}$$

Ao calcular a amplitude do sinal analítico, ou o módulo do vetor de magnetização, os dados magnéticos são convertidos de bipolares para monopolares, o que possibilita uma informação mais precisa referente aos limites geológicos e estruturais em profundidade, mas que, no entanto, omitem outras informações como a direção da magnetização da fonte (Roest *et al.* 1992).

Também podem ser aplicados outros filtros para que se destaque alguma estrutura preferencial ou reduzir o ruído de demais fontes sobre uma determinada área específica, ressaltando assim características que sejam importantes para a interpretação (Luiz & Silva 1995). A partir dos dados de campo anômalo, pode-se realizar o cálculo das derivadas nas direções X, Y para destacar estruturas NS

e EW, respectivamente. As derivadas na direção Z (derivada vertical) de primeira e segunda ordem podem ser utilizadas para destacar as estruturas mais superficiais.

Os filtros do tipo passa-banda consistem na redução da intensidade do sinal magnético gerado em um intervalo de frequência definido, a partir de cálculos que se baseiam na transformada de Fourier (Kearey *et al.* 2009). De forma geral, assume-se que altas frequências correspondem a anomalias mais rasas, enquanto frequências mais baixas correspondem a anomalias mais profundas.

O filtro da inclinação do sinal analítico, ou TILT, destaca a relação da primeira derivada vertical com os gradientes verticais. Dessa forma, serão atribuídos valores altos próximos do centro da anomalia que tendem a zero à medida que se aproximam dos limites do corpo anômalo (Cooper & Cowan 2008).

Um resumo dos principais filtros utilizados na magnetometria e suas finalidades geofísicas estão descritos no Quadro 4.3.

**Quadro 4.3:** Filtros aplicados à magnetometria e suas finalidades geofísicas (Barbosa & Oliveira 2020).

	<b>Filtros</b>	<b>Finalidade Geofísica</b>
<b>Derivadas</b>	Gradiente vertical (1ª derivada)	Evidencia estruturas superficiais.
	Gradiente residual (2ª derivada)	Remove anomalias regionais e realça anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia estruturas N-S.
	Gradiente horizontal em Y	Evidencia estruturas E-W.
	Amplitude do sinal analítico	Projeção em superfície das anomalias em profundidade.
	<i>Tilt</i> derivativo	Estimativa da posição de origem da anomalia magnética.
<b>Continuação</b>	Para cima	Retira anomalias superficiais.
	Para baixo	Retira anomalias profundas.
<b>Frequência</b>	Passa banda	Determina intervalo de frequência.
	Passa alta	Retira anomalias de baixa frequência.
	Passa baixa	Retira anomalias de alta frequência.

#### 4.1.3 Deconvolução de Euler

Além da geração de produtos para a análise qualitativa do campo anômalo de uma região, também é possível aplicar métodos de processamento quantitativos capazes de se estimar a profundidade de uma fonte magnética (Reid *et al.* 1990). Uma destas técnicas é conhecida como deconvolução de Euler, que é dada pela Equação 4.4.

$$N(B - T) = (x - x_0) \frac{\delta T}{\delta x} + (y - y_0) \frac{\delta T}{\delta y} + (z - z_0) \frac{\delta T}{\delta z} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  são as coordenadas da fonte magnética que gera um campo anômalo  $T$  no ponto  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .  $B$  é o campo regional e  $N$  é o índice estrutural cujo valor varia a depender da geometria do corpo-fonte, conforme o Quadro 4.4.

**Quadro 4.4:** Relação entre índice estrutural e geometria da fonte de anomalia magnética (Reid *et al.* 2014)

Índice estrutural (N)	Geometria da fonte
0	Contato
1	Camada planar fina
2	Linhas verticais ou horizontais
3	Esfera

A partir do cálculo da deconvolução, é possível estimar a profundidade da fonte de anomalia magnética detectada em superfície. Ao se determinar o posicionamento geográfico das fontes em múltiplos pontos distintos dentro da área de levantamento, é possível ter um reconhecimento tridimensional da estrutura ou corpo mineralizado responsável pelas anomalias.

Uma das vantagens do método é de que não há necessidade de se conhecer a direção do vetor de magnetização, pois o método utiliza apenas as amplitudes do sinal analítico para determinação da posição de um ponto responsável pela anomalia detectada (Barbosa & Silva 2005).

## 4.2 RADIOMETRIA

A radioatividade é uma propriedade de certos elementos químicos primeiramente descrita por Becquerel em 1896, ao observar que sais de urânio emitiam radiações capazes de atravessar materiais opacos à luz. Posteriormente, outros cientistas como Curie e Schmidt, listaram outros materiais que também apresentavam esta mesma propriedade. A origem deste fenômeno se dá pela desintegração do material do núcleo atômico, que pode resultar na emissão de três tipos de radiação distintas: partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  e radiação  $\gamma$  (Telford *et al.* 1990).

Os raios  $\alpha$  consistem na emissão de um átomo de hélio (dois prótons e dois nêutrons) do núcleo pai, os raios  $\beta$  são elétrons emitidos pelo núcleo, enquanto os raios  $\gamma$  são formados apenas por radiação eletromagnética. Por conta da natureza distinta entre estes tipos de radiação, sua penetratividade nos materiais é variada, de forma que os raios  $\alpha$  apresentam baixa penetratividade, enquanto os raios  $\gamma$  apresentam penetratividade mais alta (Kearey *et al.* 2009).

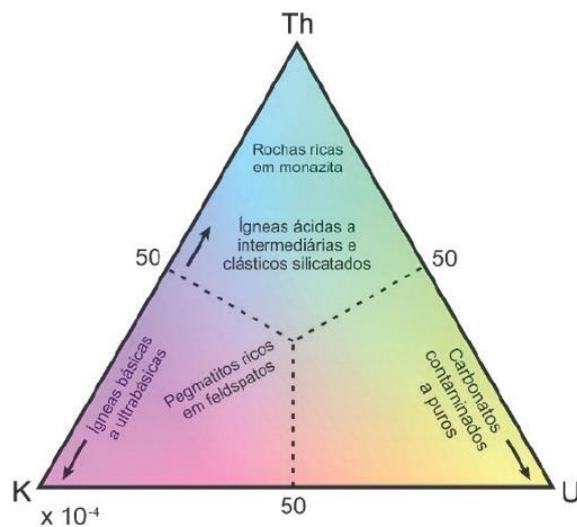
### 4.2.1 Radioatividade de rochas e minerais

Pelo menos 50 isótopos são naturalmente radioativos, no entanto, apenas o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ) são utilizados na investigação geofísica, pelo fato de serem os isótopos radioativos mais abundantes e com atividade radioativa significativa (Kearey *et al.* 2009). Os principais minerais

radioativos, e os tipos de rocha que contém estes minerais estão descritos no Quadro 4.5. e na Figura 4.3, respectivamente.

**Quadro 4.5:** Principais minerais radioativos (modificado de Telford *et al.* 1990).

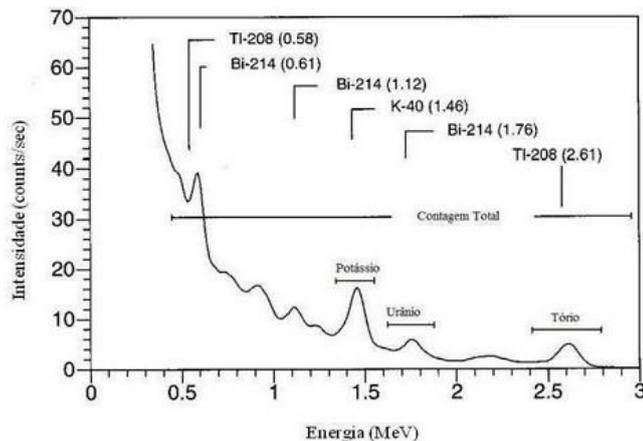
Elemento	Minerais
Potássio (K)	Ortoclásio, microclina, muscovita, alunita e silvita
Tório (Th)	Monazita, torianita, torita e uranotorita
Urânio	Uraninita, carnotita e gumita



**Figura 4.3:** Diagrama ternário representando os litotipos característicos de cada associação entre os elementos radioativos (Barbosa & Oliveira 2020).

#### 4.2.2 Levantamento radiométrico

Os equipamentos que realizam medições com base na radiação consistem em detectores que contabilizam a contagem de emissões em um intervalo de tempo. O espectrômetro de raios gama permite com que além da contagem, seja também identificado o elemento fonte daquela radiação (Kearey *et al.* 2009). Esta é uma qualidade muito útil, uma vez que permite identificar a proporção entre os elementos radioativos de uma unidade, e dessa forma, individualizando-a em relação às demais unidades.



**Figura 4.4:** Janela espectral de radioelementos com destaque para as janelas de potássio, urânio e tório. (Minty 1997).

Os levantamentos radiométricos aéreos são de grande utilidade para o reconhecimento de áreas e mapeamento geológico. Sua desvantagem é o fato de que a radiação  $\gamma$  possui baixa penetrabilidade, portanto, o sinal recebido pelo sensor é proveniente apenas das fontes mais superficiais. A interpretação de dados radiométricos são qualitativas, sendo sua principal finalidade a diferenciação de radiofácies, e, conseqüentemente, dos litotipos presentes em superfície.

#### 4.2.3 Processamento de dados

Os dados obtidos em um levantamento de raios gama podem ser representados em mapa por meio da interpolação dos valores medidos, de forma a ressaltar a distribuição espacial dos radioelementos. A partir dos três valores obtidos (K, eU e eTh) é possível elaborar pelo menos nove mapas temáticos como descrito no Quadro 4.6.

**Quadro 4.6:** Processamento utilizado para a geração dos principais produtos radiométricos

<b>Imagem</b>	<b>Processamento</b>
<b>Canais de U, Th e K</b>	Radiação total emitida na janela espectral correspondente a cada radioelemento.
<b>Contagem total</b>	Somatório dos canais de eU, eTh e K.
<b>Razões U/Th, Th/K e U/K</b>	Razão entre os radioelementos.
<b>Fator F</b>	Produto entre K e eU dividido por eTh.
<b>Imagem Ternária</b>	Associa-se cada radioelemento a uma cor específica pelo sistema RGB ou CMY.

A utilização de cada um destes mapas temáticos dependerá da necessidade de qual informação merece maior destaque. A principal utilização de cada um dos mapas gerados está descrita no Quadro 4.7.

**Quadro 4.7:** Utilização dos mapas temáticos na radiometria (Barbosa & Oliveira 2020).

Mapas temáticos		Utilização
Canal	Urânio	Visualizar rochas sedimentares com presença de uraninita, além de granitos e pegmatitos.
	Potássio	Identificar granitos alcalinos e pegmatitos ricos em mica e feldspatos, além de depósitos evaporíticos.
	Tório	Identificar zonas quimicamente intemperizadas.
	Contagem Total	Delimitar contatos
Razão	U/Th	Correlacionar o tipo de ambiente deposicional de folhelhos negros carbonosos.
	Th/K	Delimitar contatos, com filiação ígnea para baixas razões.
	U/K	Delimitar contatos, com filiação ígnea para baixas razões.
Fator F		Caracterizar zonas hidrotermais.
Imagem ternária		Delimitar contatos a partir de feições com mesma concentração dos isótopos.

### 4.3 ELETRORRESISTIVIDADE

Os métodos elétricos de investigação geofísica consistem na utilização de correntes diretas ou alternadas de baixa frequência para investigação de propriedades elétricas dos minerais em subsuperfície (Kearey *et al.* 2009). Para este fim, diferentes técnicas e procedimentos de levantamento em campo podem ser adotados. Braga (2006) propõe a seguinte classificação dos métodos geoeletricos aplicados com base na propriedade física analisada e na forma como estes dados são obtidos:

- **Método Geoeletrico:** refere-se ao parâmetro físico obtido. Para os parâmetros galvânicos, pode ser eletrorresistividade, polarização induzida ou potencial espontâneo.
- **Técnica de investigação:** refere-se ao tipo de investigação dos parâmetros físicos. Pode ser subdividida em:
  - **Sondagens:** investigações realizadas a partir de um ponto fixo na superfície.
  - **Perfilagens:** investigações no interior de furos de sondagem.
  - **Caminhamentos:** investigações laterais a partir de pontos não fixos em superfície.
- **Arranjo de desenvolvimento:** configuração geométrica dos eletrodos utilizados na investigação.

Um esquema de classificação geral dos métodos elétricos está representado na Figura 4.5.

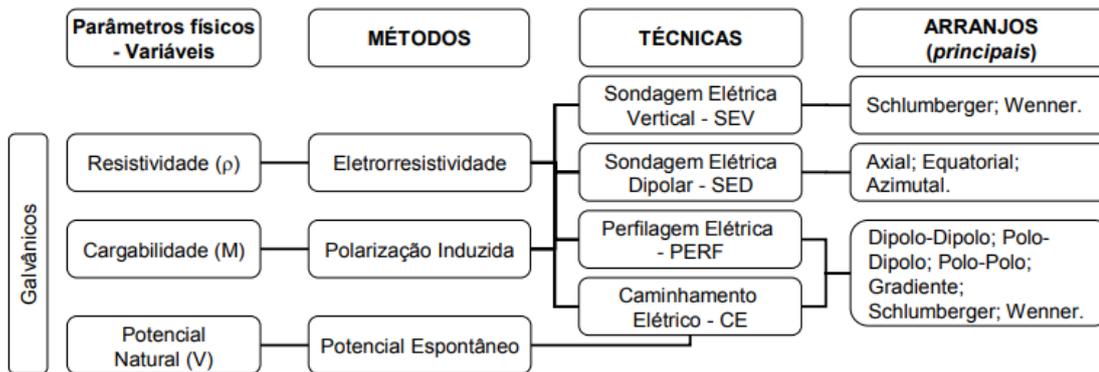


Figura 4.5: Classificação dos métodos geoeletricos galvânicos (Braga 2006).

### 4.3.1 Método da eletrorresistividade

A lei de Ohm define que a corrente elétrica entre dois pontos é diretamente proporcional à diferença de potencial que existe entre estes pontos (Telford *et al.* 1990) e pode ser descrita matematicamente pela Equação 4.5:

$$V = R * I \tag{Equação 4.5}$$

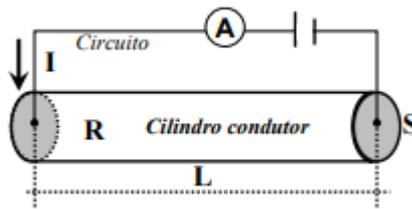
onde  $V$  é a diferença de potencial entre os pontos,  $R$  é o valor de resistência dado em ohms ( $\Omega$ ) e  $I$  é a intensidade da corrente elétrica dada em Amperes (A).

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) pode ser definida como a dificuldade que um determinado material exerce ao fluxo de elétrons quando submetido a uma diferença de potencial (Kearey *et al.* 2009), e também pode ser compreendida como sendo o inverso da condutividade. A unidade da resistividade é dada por ohm-metro ( $\Omega \times m$ ).

A resistência de um meio condutor homogêneo pode ser descrita, portanto, como uma função que depende da resistividade e da geometria do meio (Braga 2006) e é representada pela Equação 4.6.

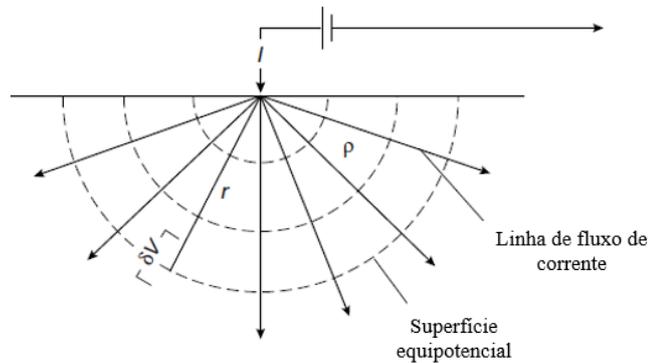
$$R = \frac{\rho * L}{S} \tag{Equação 4.6}$$

onde  $R$  é a resistência,  $\rho$  é a resistividade,  $S$  é a seção transversal do condutor e  $L$  é o comprimento do condutor, representado na Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Esquema ilustrando a relação entre resistência e resistividade (Braga 2006).

A Terra, no entanto, apresenta geometria e propriedades distintas de um cilindro condutor e, portanto, adaptações a partir da Equação 4.6 são necessárias. Considerando um espaço tridimensional homogêneo, a superfície equipotencial elétrica formada a partir de um eletrodo tem formato de casca de uma semiesfera, como mostra a Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Representação de fluxo de corrente gerado a partir de um único eletrodo em espaço tridimensional homogêneo (Kearey *et al.* 2009).

Dessa forma, o valor do comprimento do condutor ( $L$ ) pode ser aproximado pelo valor do raio da semiesfera ( $r$ ), e a seção transversal ( $S$ ) é equivalente à área da superfície de uma semiesfera, como mostram as equações Equação 4.7 e Equação 4.8:

$$L = r \quad \text{Equação 4.7}$$

$$S = 2\pi r^2 \quad \text{Equação 4.8}$$

Substituindo as equações Equação 4.7 e Equação 4.8 em Equação 4.6:

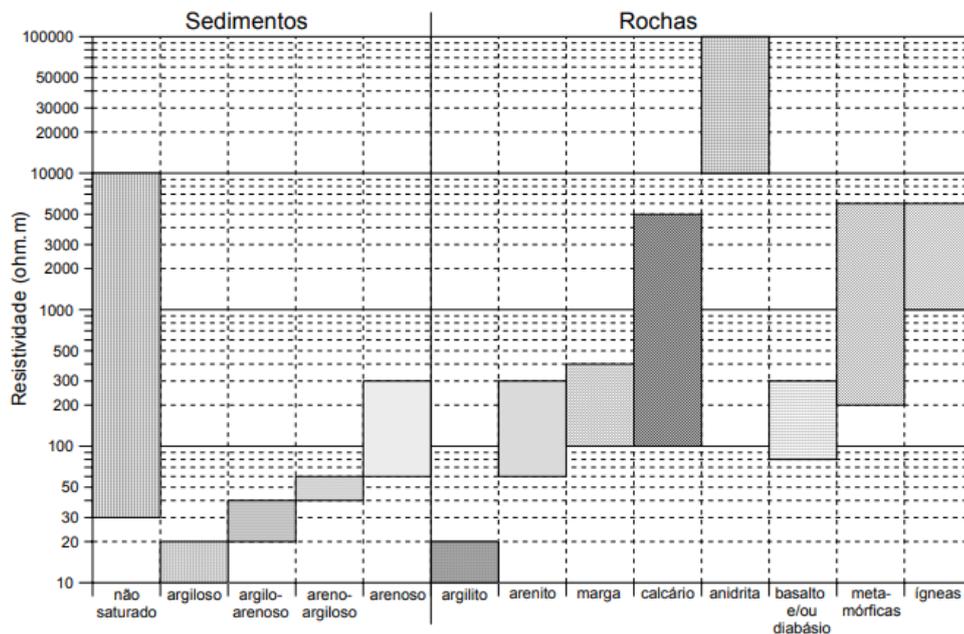
$$R = \frac{\rho * r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad \text{Equação 4.9}$$

Este valor de resistência, quando aplicado à Lei de Ohm (Equação 4.5), nos fornece a relação:

Rearranjando os termos, tem-se:

$$\rho = 2\pi * r * \frac{V}{I} \quad \text{Equação 4.10}$$

O valor de resistividade ( $\rho$ ) para um ponto pode ser calculado, portanto, a partir da determinação da corrente ( $I$ ), voltagem ( $V$ ) e distância do eletrodo de corrente até o ponto ( $r$ ). Apesar de alguns minerais formadores de rocha apresentarem uma baixa resistividade, como é o caso de argilitos (Figura 4.8), a maioria dos minerais atuam como isolantes elétricos (Telford *et al.* 1990). Dessa forma, a análise de eletrresistividade costuma ser aplicada na investigação de discordâncias e fraturas em subsuperfície, possível de observada através do contraste entre regiões com mais alta saturação em água (e, conseqüentemente, sais dissolvidos) que apresentam valores baixos de resistividade, e a rocha maciça que apresenta valores mais altos (Kearey *et al.* 2009).

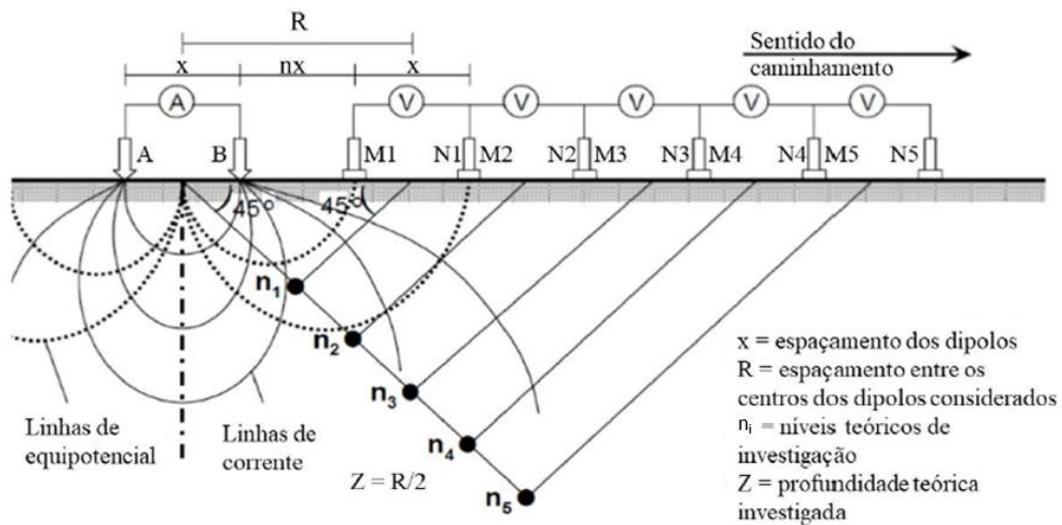


**Figura 4.8:** Valores de resistividade e suas variações em rochas e solos (Braga 2006).

### 4.3.2 Caminhamento elétrico: arranjo dipolo-dipolo

Os principais arranjos de campo utilizados nos métodos geoeletricos consistem na utilização de quatro eletrodos: um par que introduz corrente elétrica no solo (eletrodos A e B), enquanto em outro é utilizado para medir a diferença de potencial entre eles (eletrodos M e N) (Braga 2006).

O arranjo do tipo dipolo-dipolo é caracterizado por manter o espaçamento constante entre os eletrodos AB e MN, como mostra a Figura 4.9. Estes pares de eletrodos são separados por uma distância correspondente à um múltiplo ( $n$ ) da distância entre os eletrodos ( $x$ ).



**Figura 4.9:** Representação de levantamento com arranjo dipolo-dipolo (Braga, 2016).

O valor de potencial elétrico nos eletrodos M e N pode ser expressa através da soma dos potenciais gerados a partir dos eletrodos de corrente A e B ao substituir o valor de  $r$  da Equação 4.10.

$$V_M = V_{AM} + V_{BM} = \frac{I\rho}{2\pi * x(n + 1)} - \frac{I\rho}{2\pi * nx} \quad \text{Equação 4.11}$$

$$V_N = V_{AN} + V_{BN} = \frac{I\rho}{2\pi * x(n + 2)} - \frac{I\rho}{2\pi * x(n + 1)} \quad \text{Equação 4.12}$$

O sinal negativo no segundo termo das equações Equação 4.11 e Equação 4.12 se deve ao fato de que a corrente em cada um dos eletrodos A e B possuem direções opostas (Telford *et al* 1990). A diferença de potencial entre os eletrodos M e N é dada por:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi x} * \left( \frac{1}{n+2} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n} \right) \quad \text{Equação 4.13}$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi x} * \left( \frac{1}{n+2} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n} \right) \quad \text{Equação 4.14}$$

Desenvolvendo os termos, tem-se que:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi x} * \left( \frac{n(n+1) - (n-1)(n+2)}{n(n+1)(n+2)} \right) = \frac{I\rho}{2\pi x} * \left( \frac{2}{n(n+1)(n+2)} \right) \quad \text{Equação 4.15}$$

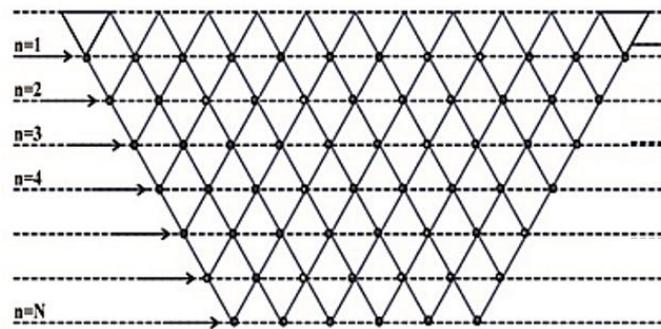
Dessa forma, com o arranjo dipolo-dipolo, o valor da resistividade ( $\rho$ ) em um ponto pode ser calculada por meio da Equação 4.16.

$$\rho = \frac{\Delta V * \pi x}{I} * n(n+1)(n+2) \quad \text{Equação 4.16}$$

A técnica do caminhamento elétrico consiste em realizar diversas leituras de voltagem entre M e N fixados os eletrodos de corrente A e B. O valor de resistividade calculado é atribuído ao ponto localizado no ponto médio entre os dipolos AB e MN, com profundidade R/2 (Telford *et al.* 1990). Alguns outros autores como Braga (2006) ressaltam que este valor teórico nem sempre corresponde à realidade, onde a profundidade real pode se aproximar de R/4.

À medida em que se aumenta o espaçamento entre os dipolos (n), muda-se o nível de investigação teórica correspondente, isto é, maior a profundidade da informação fornecida pelo método. Alguns autores sugerem, no entanto, que não se utilize valores de n acima de 6, uma vez que a qualidade do sinal em níveis de investigação mais altos é de baixa qualidade (Loke 1999).

A distribuição bidimensional dos pontos de resistividade aparente calculados recebe o nome de pseudoseção (Figura 4.10), cujos valores podem ser interpolados para que seja criada uma imagem representativa de um perfil de distribuição de resistividades tanto lateralmente, quanto em profundidade (Rekapalli *et al.* 2019).



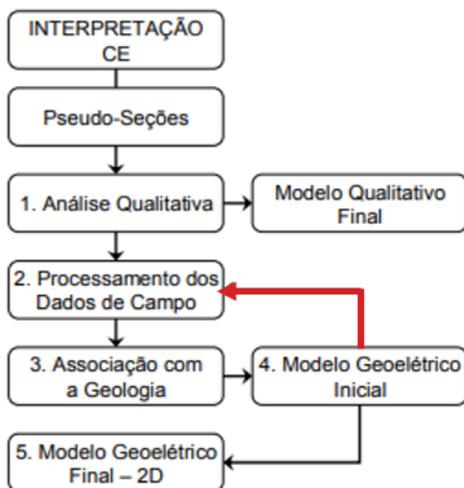
**Figura 4.10:** Distribuição teórica de pontos de uma pseudoseção de caminamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo em N níveis de investigação.

### 4.3.3 Inversão geolétrica

A base teórica para o cálculo da resistividade a partir dos parâmetros de campo considera o meio como sendo isotrópico e homogêneo. No entanto, em condições reais de investigação, dificilmente o meio analisado possui estas características. Se torna necessário, portanto, diferenciar a resistividade aparente (valores obtidos a partir da Equação 4.16) da resistividade real (valores reais da resistividade em um ponto em subsuperfície).

Para que seja criado um modelo coerente com os aspectos reais, aplica-se processos matemáticos que determinam um modelo idealizado da subsuperfície com base em um conjunto finito de dados observados, de forma que a resposta obtida melhor corresponda à realidade e aos valores medidos (Gandolfo 2007).

A inversão consiste na obtenção dos parâmetros que melhor ajustem os dados medidos ao mesmo tempo que satisfaça as condições geológicas disponíveis (Bortolozo *et al.* 2010). No caso de uma distribuição de pontos 2D, o objetivo é determinar a distribuição de resistividade nos elementos discretizadores do meio, ou seja, os pontos amostrados indiretamente (Bortolozo 2016). Esta determinação dos parâmetros que melhor se ajustam é complexa, pois trata-se de um sistema não linear cujo número de variáveis é maior que o número de equações, constituindo, portanto, um sistema indeterminado. Utiliza-se, portanto, uma calibração gradual, onde os dados processados são reajustados a partir de um modelo geolétrico inicial, como mostra a Figura 4.11.



**Figura 4.11:** Etapas na interpretação de dados geoeletricos com destaque para a etapa da inversão (modificado de Braga 2006).

As principais técnicas de inversão bidimensional para dados de eletrorresistividade são a *ridge regression* ou através do método de otimização dos mínimos quadrados, o mais comumente utilizado (Loke & Barker 1996).

Os *softwares* utilizados para inversão 2D podem ser classificados como sendo do tipo *true polygon inversion*, que representa os corpos em subsuperfície como polígonos de resistividade constante, sendo necessário um modelo geológico inicial pré-definido pelo usuário. O método *smooth inversion*, empregado pelo programa RES2DINV, baseia seu algoritmo com base em células discretizadas, o que é capaz de automatizar o processo de imageamento (Olayinka & Yaramanci 2002).

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISE GEOFÍSICA

---

A análise qualitativa de dados geofísicos permite uma compreensão prévia de características específicas um terreno a obtida partir de dados indiretos. Os métodos radiométricos são de grande utilidade no auxílio ao mapeamento geológico, onde a distribuição de radiofácies pode ser associada aos litotipos aflorantes na área. Os métodos magnetométricos permitem uma análise de estruturas em maior profundidade geradoras de anomalias magnéticas, e que podem, portanto, servir como uma ferramenta para identificação de descontinuidades ou outras estruturas geológicas em subsuperfície.

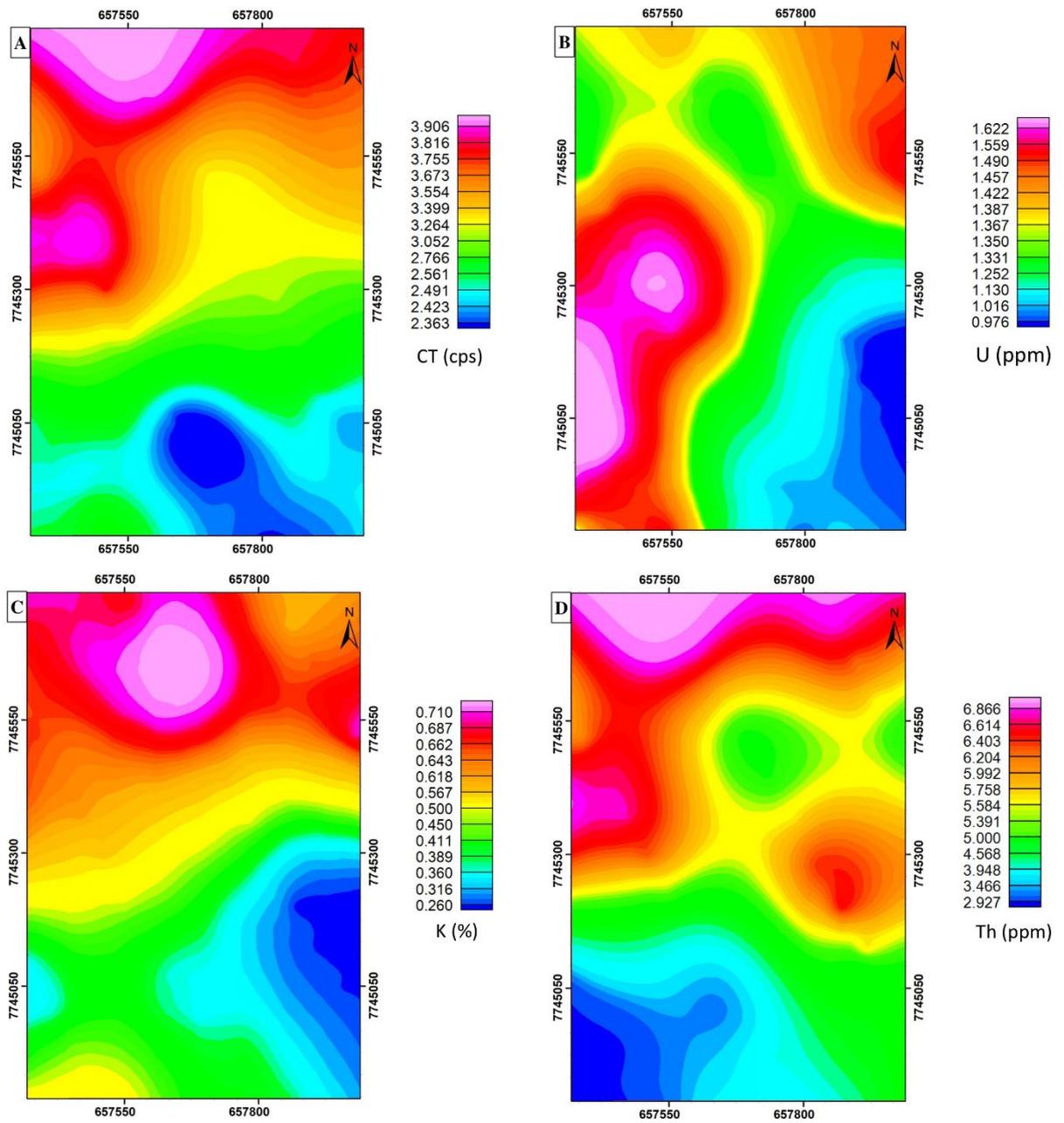
### 5.1 BANCO DE DADOS

As bases de dados de aerolevanteamento geofísico utilizadas neste trabalho de magnetometria e radiometria são provenientes do programa Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 2, bloco leste, conduzido pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) realizado em 2001.

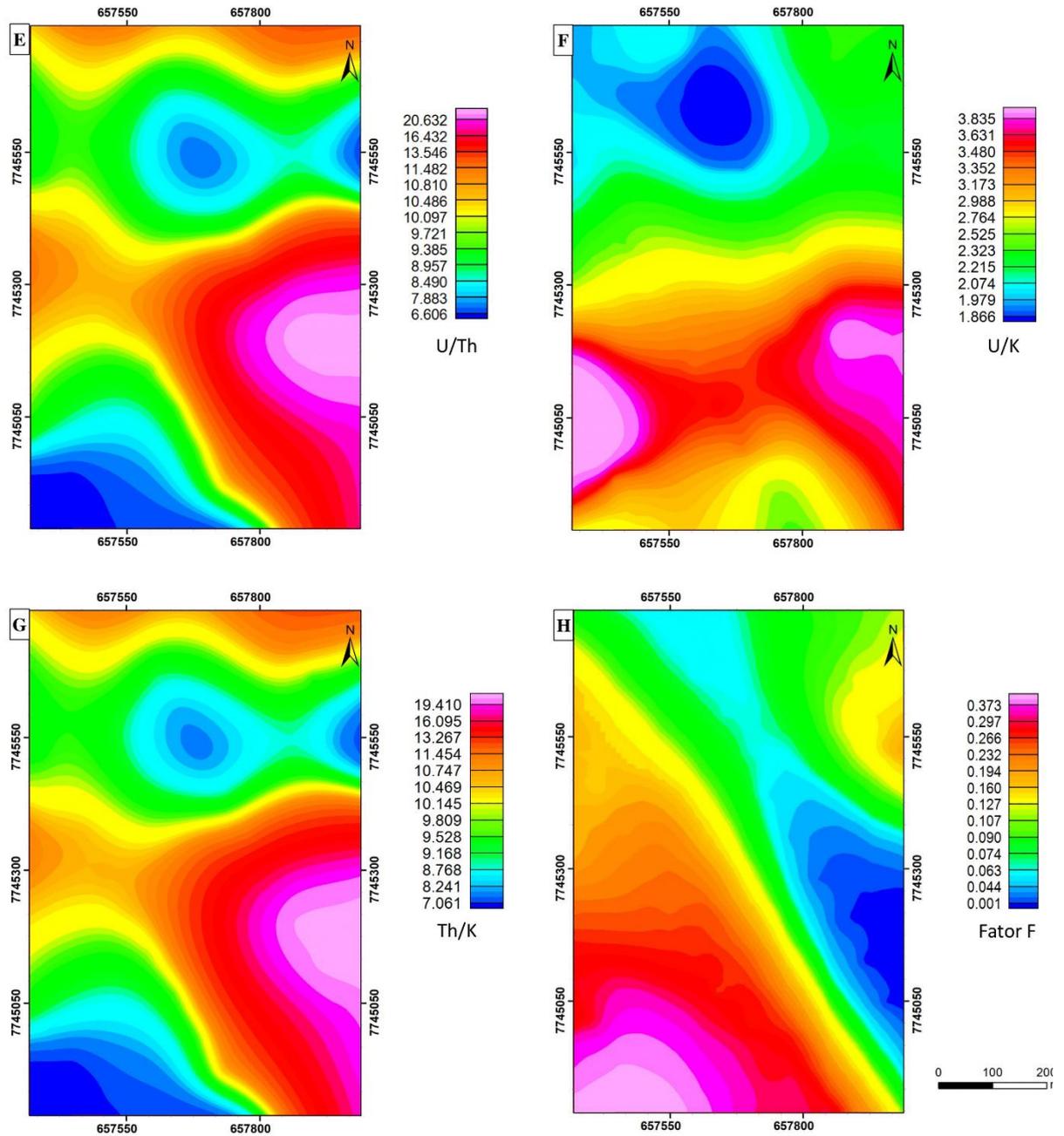
As linhas de produção têm direção N30E e são espaçadas em 250m, enquanto as linhas de controle, perpendiculares a esta, tem direção N60W e são espaçadas em 2500m. A altura do voo foi de 100 em relação ao solo.

### 5.2 ANÁLISE RADIOMÉTRICA

A análise radiométrica foi realizada com base na geração de mapas a partir da interpolação da leitura de pontos do banco de dados da CODEMIG, dos canais de K, U e Th, os quocientes entre os elementos, contagem total e fator F (Figura 5.1). Também foi elaborado mapa ternário CMY atribuindo a cada cor os canais K, U e Th, respectivamente (Figura 5.2). Para a interpolação, foi utilizado o método de mínimas curvaturas e atribuído ao grid um tamanho de célula de 10m x 10m.



**Figura 5.1:** Mapas radiométricos. A) CT: Canal Contagem Total; B) U: Canal Urânio; C) K: Canal Potássio; D) Th: Canal Tório.

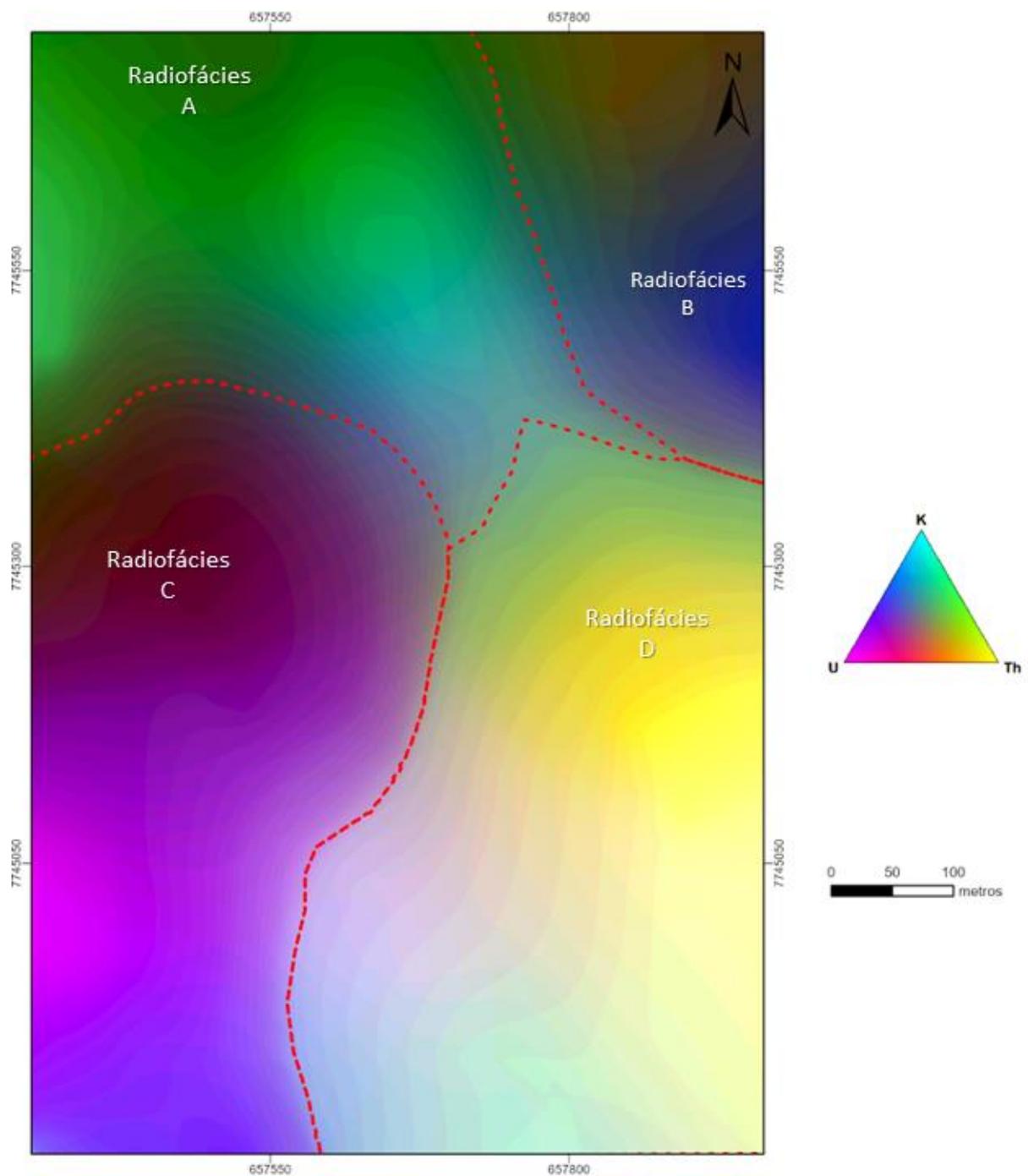


**Figura 5.1(cont.):** Mapas radiométricos. E) U/Th: Canal Razão U/Th. F) U/K: Canal Razão U/K. G) Th/K: Canal Razão Th/K. H) Canal Fator F.

De forma geral, a partir do mapa de contagem total, observa-se uma predominância de elementos radioativos na região norte da área estudada, mais especificamente dos canais de potássio e tório. Este contraste fica evidenciado nos mapas das razões U/K e U/Th, que apresentam valores mais baixos na porção sul. O mapa de Fator F explicita uma clara tendência NW-SE.

A partir dos canais de urânio, tório e potássio, foi gerada uma imagem ternária que permite a classificação da área de estudo em radiofácies, isto é, regiões que apresentam características de

radiatividade semelhantes. Na região de estudo, foram identificadas quatro radiofácies distintas como mostra a Figura 5.2.



**Figura 5.2:** Mapa ternário com destaque para radiofácies.

As quatro radiofácies apresentam as seguintes características:

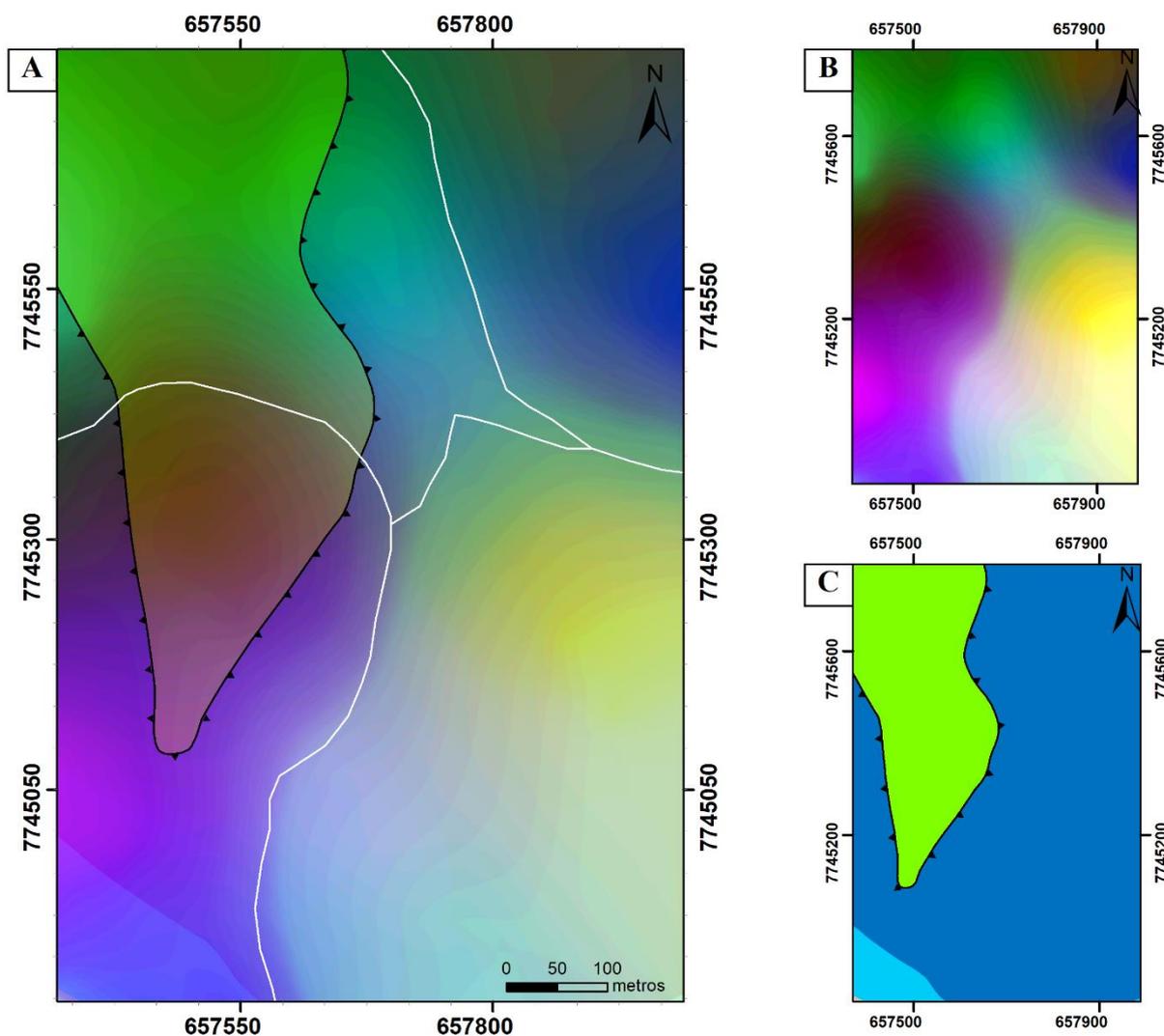
- **Radiofácies A:** Localizada na porção NW da área e caracterizada por teores equivalentes de potássio e tório, com baixa concentração de urânio. Apresenta-se com poucas variações, com uma concentração maior de potássio em direção ao centro da área.
- **Radiofácies B:** Localizada na porção NE da área e caracterizada por baixo teor de tório.
- **Radiofácies C:** Localizada nas porções E e SE da área, e caracterizada por concentração mais alta de urânio.
- **Radiofácies D:** Localizada nas porções W e SW da área e caracterizada pela alta concentração de tório. Nas porções mais a sul, ocorrem regiões que os teores de potássio e tório podem se tornar mais altos, correspondendo à coloração branca da imagem.

Após definidas as radiofácies, foi possível estabelecer uma relação visual entre as informações obtidas pelos métodos radiométricos e o mapeamento geológico da área proposto por Endo et al. (2019), como mostra a Figura 5.3.

A partir da comparação entre ambas as informações, tem-se que a radiofácies A está sobreposta às litologias do Grupo Nova Lima e Formação Cauê. Pela relação estrutural dada entre estas unidades, é possível que a resposta radiométrica desta fácies seja influenciada em partes pela Formação Moeda.

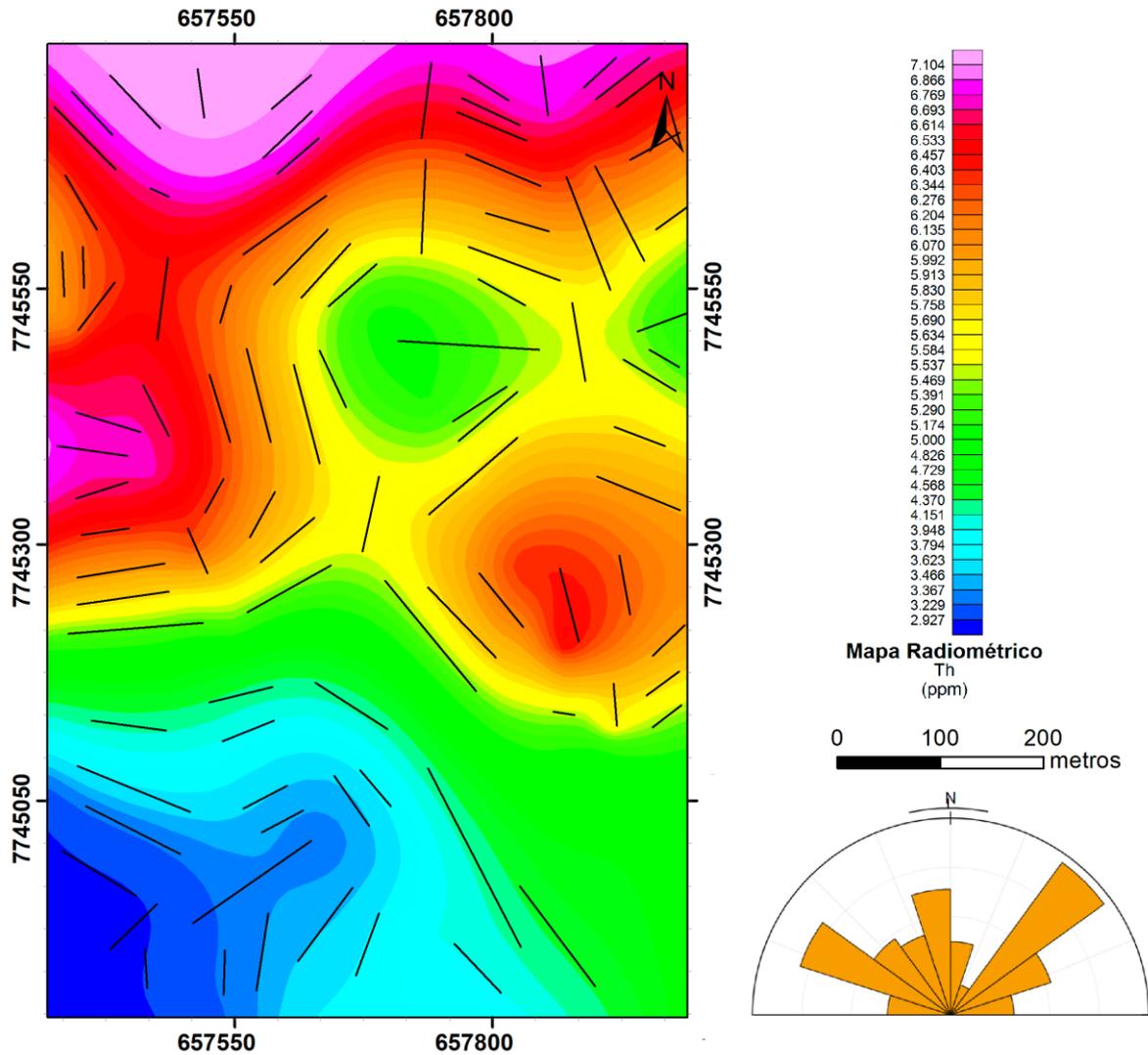
A radiofácies B, por sua vez, encontra-se completamente inserida no domínio da unidade Cauê. A radiofácies C apresenta similaridades de padrão radiométrico com a radiofácies B, sendo que esta também se encontra majoritariamente inserida no domínio da unidade Cauê, no entanto, sob maior influência das unidades do Grupo Nova Lima e da Formação Gandarela. A radiofácies D também corresponde ao domínio da Formação Cauê, no entanto sua resposta radiométrica é significativamente distinta.

Uma outra observação importante que pode ser obtida nesta comparação, é o fato de que o traço da Zona de Cisalhamento São Bento apresentar uma alta relação com a separação das radiofácies A e C (a oeste da falha) e as radiofácies B e D (a leste da falha).



**Figura 5.3:** Comparativo entre as informações regionais de radiometria e mapeamento geológico. A) Sobreposição dos mapas de radiometria e de mapeamento geológico, sendo que as linhas brancas correspondem à subdivisão em radiofácies. B) Mapa ternário construído a partir dos canais de urânio, tório e potássio. C) Mapa geológico (Endo *et al.* 2019). Verde: Unidade metassedimentar química/pelítica do Grupo Nova Lima; Azul escuro: Formação Cauê; Azul claro: Formação Gandarela.

Outra informação importante possível de ser obtida a partir dos dados radiométricos regionais, corresponde aos lineamentos presentes na área. Sobre a imagem do canal de tório, foram definidos os lineamentos radiométricos situados na área de estudo (Figura 5.4) com base nos canais radiométricos distintos. O diagrama de rosetas é representativo dos 95 lineamentos presentes no mapa. Foram observadas duas direções principais de azimute: NE-SW, com direção aproximada de 45° e NW-SE, com azimute aproximado de 300°.



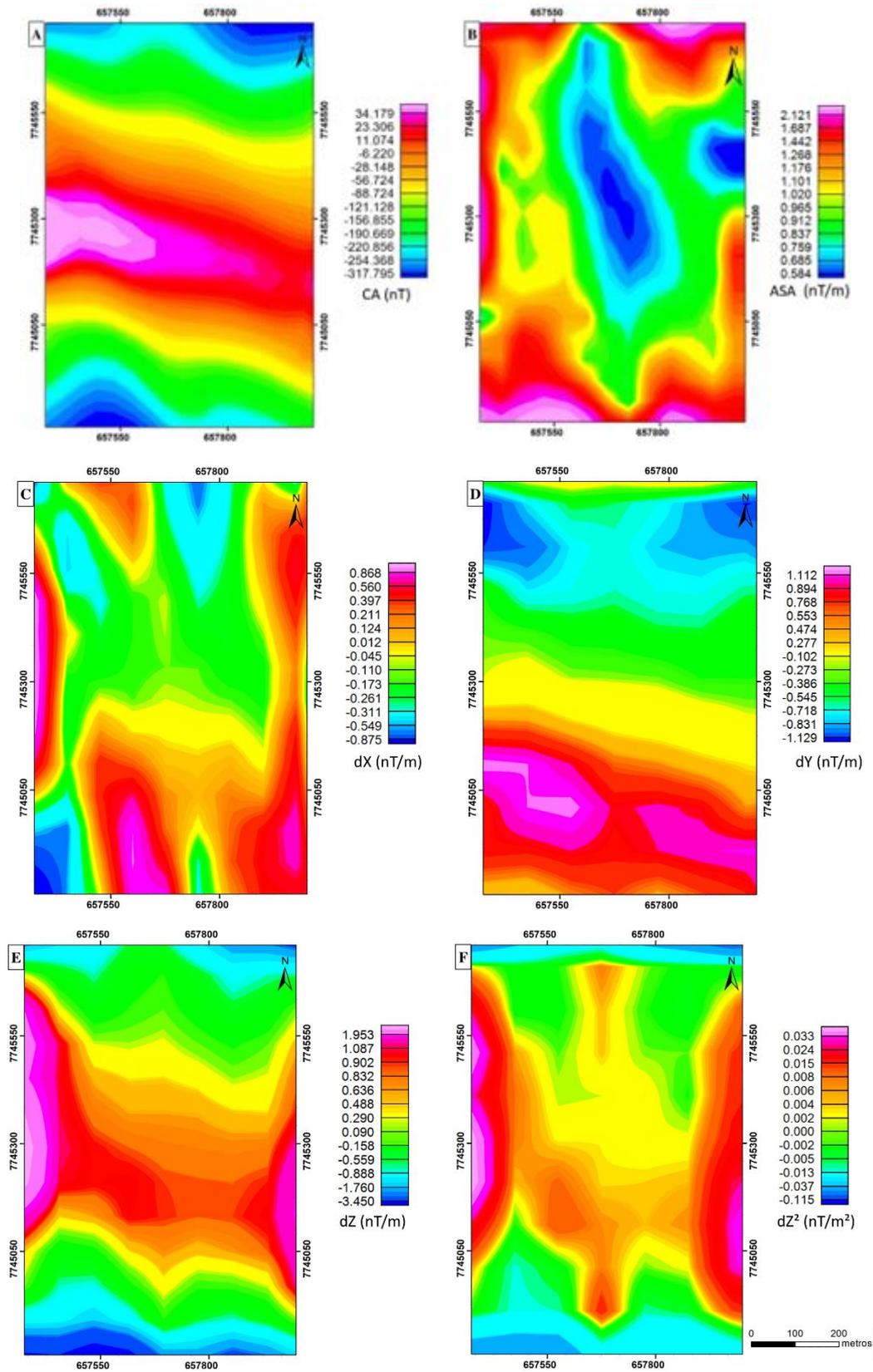
**Figura 5.4:** Lineamentos estruturais traçados a partir do mapa canal de tório. À direita, diagrama de rosetas com valores de azimute dos lineamentos.

### 5.3 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

A análise magnetométrica foi realizada com base na geração de mapas a partir da interpolação da leitura de pontos de campo total de dados da CODEMIG utilizando tamanho de célula de 60m x 60m. Os filtros aplicados utilizam como base a transformada rápida de Fourier para o processamento e tem como finalidade a filtragem do sinal analítico para que sejam destacadas diferentes estruturas (Figura 5.5).

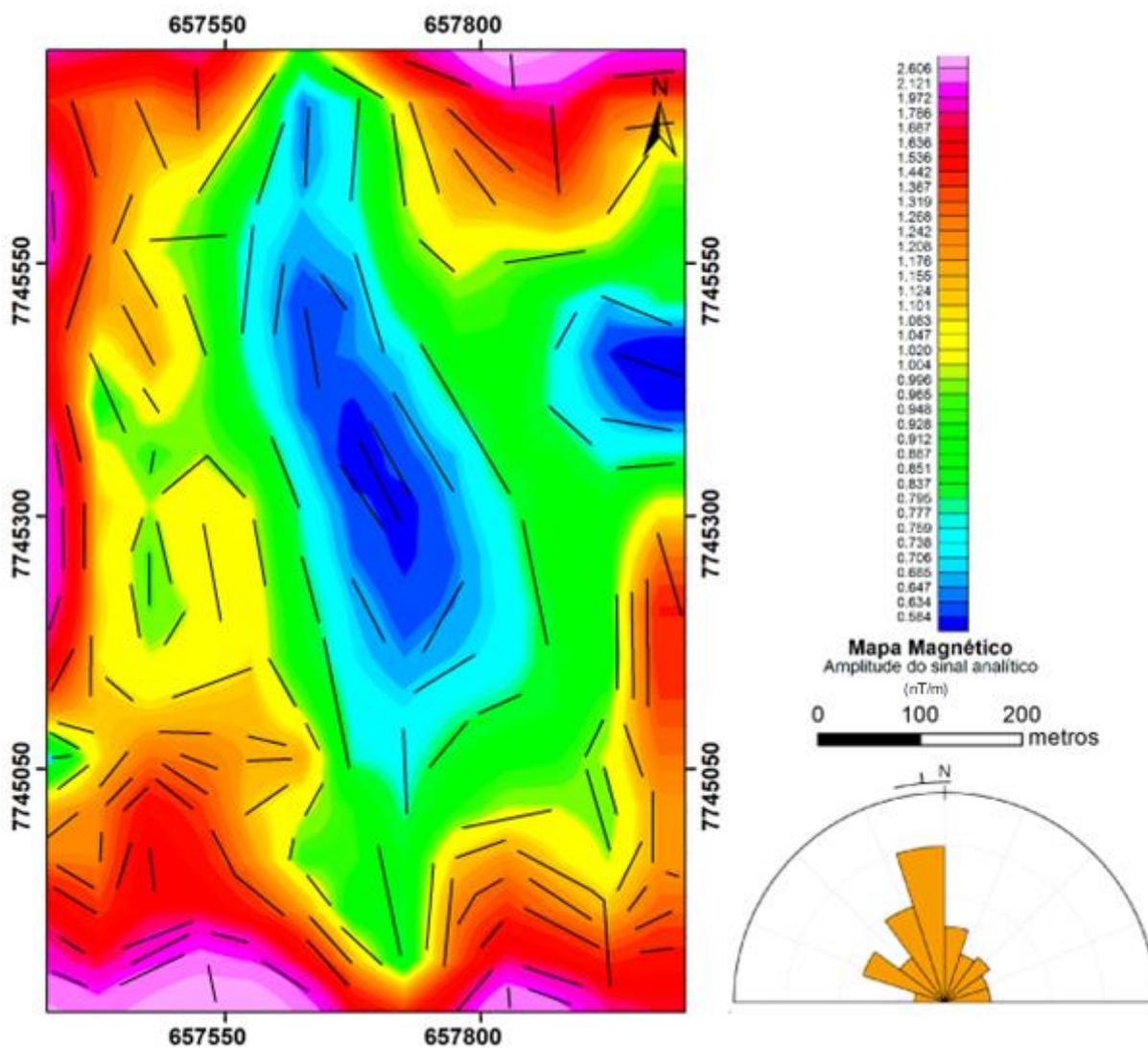
A partir do mapa de campo anômalo total, é perceptível a predominância de uma anomalia positiva na região central da área com direção EW, e anomalias negativas associadas nas porções norte e sul. O mapa de amplitude do sinal analítico indica uma baixa amplitude na região central da área, com as altas amplitudes espaçadas nas regiões periféricas da área de estudo.

Os mapas de derivada vertical de primeira e segunda ordem, que destacam as estruturas mais superficiais, apresentam uma correlação considerável com o mapa de amplitude do sinal analítico, o que indica que as estruturas mais superficiais que causam anomalia magnética estão localizadas as porções periféricas leste e oeste da área.



**Figura 5.5:** Mapas magnetométricos. A) CA: Campo anômalo. B) ASA: Amplitude do Sinal Analítico. C) e D) Primeira Derivada Horizontal EW (dX) e NS (dY), respectivamente. E) Primeira Derivada Vertical (dZ). F) Segunda Derivada Vertical (dZ<sup>2</sup>).

A partir do mapa de amplitude do sinal analítico, foram traçados principais lineamentos observados. O diagrama de rosetas corresponde às direções dos 141 lineamentos traçados (Figura 5.6). O azimute médio dos lineamentos traçados é de 354°, evidenciando o *trend* NS das anomalias magnéticas. Também é possível destacar uma ocorrência relevante de estruturas NW-SE, sendo que estruturas EW são pouco presentes.

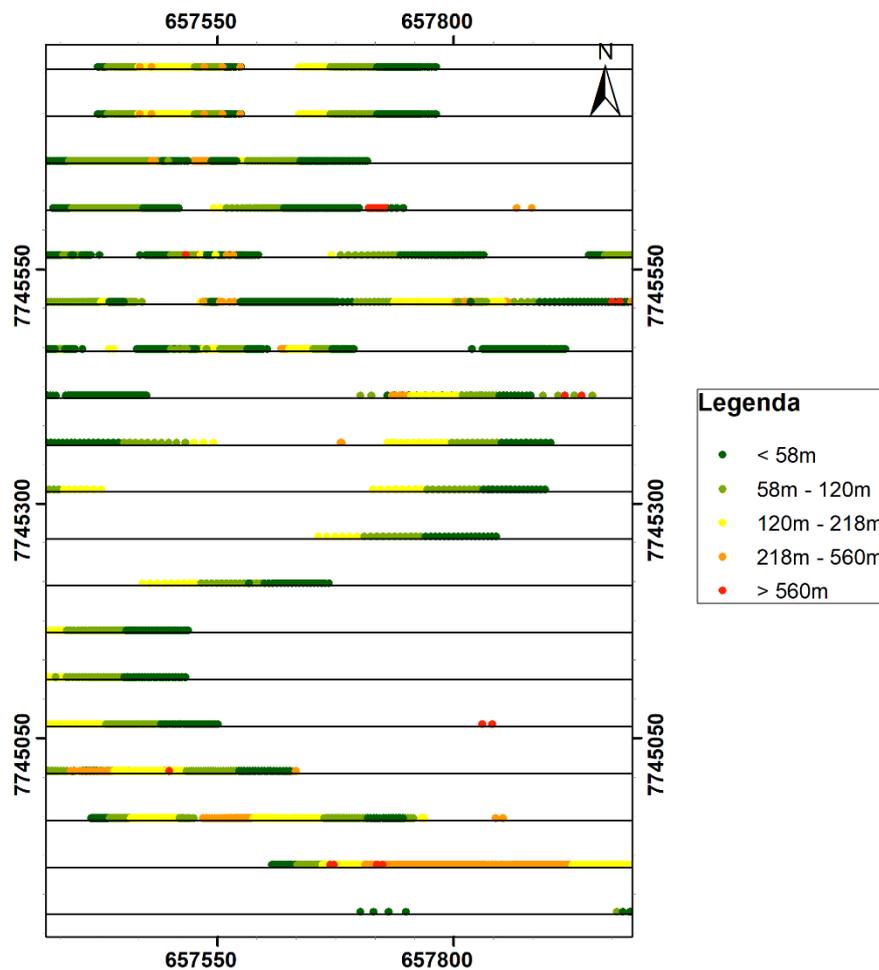


**Figura 5.6:** Lineamentos estruturais traçados a partir do mapa de amplitude do sinal analítico. À direita, diagrama de rosetas com valores de azimute de lineamento.

## 5.4 DECONVOLUÇÃO DE EULER

A partir dos dados de amplitude de sinal analíticos obtidos do aerolevanteamento de magnetometria, foram definidos perfis paralelos nos quais foram realizados os cálculos da posição da fonte de anomalia magnética utilizando o método da deconvolução de Euler com auxílio do *software* livre Euler 1.15 desenvolvido pela University of Witwatersrand.

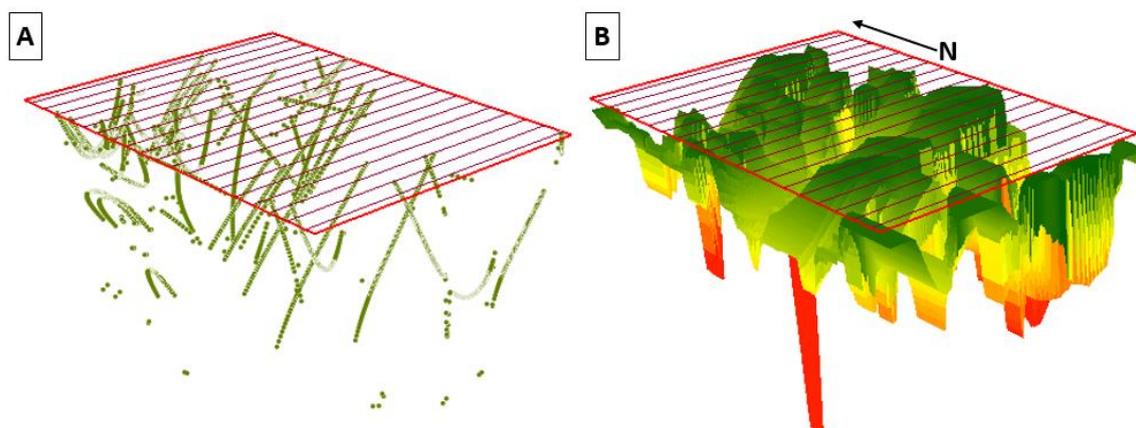
No total, foram definidas 18 linhas na direção EW com 60 metros cada uma e espaçadas entre si por 50 metros. As posições das anomalias fonte foram calculadas por linhas individuais, utilizando o índice estrutural no valor de 1, e janela estrutural com valor 11, como mostra a Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Pontos correspondentes às fontes de anomalia magnética utilizando a deconvolução de Euler a partir da amplitude do sinal analítico de magnetometria. As cores indicam a profundidade da anomalia.

Em seguida, foi realizada uma interpolação dos valores de Z obtidos para cada ponto, de forma gerar um *grid* correspondente às profundidades das anomalias magnéticas ao longo de toda a área analisada. O método de interpolação utilizado foi o método de krigagem, com volume de busca variável de forma que cada estimativa fosse realizada a partir dos 12 pontos mais próximos.

O resultado da visualização tridimensional do processamento está na Figura 5.8:



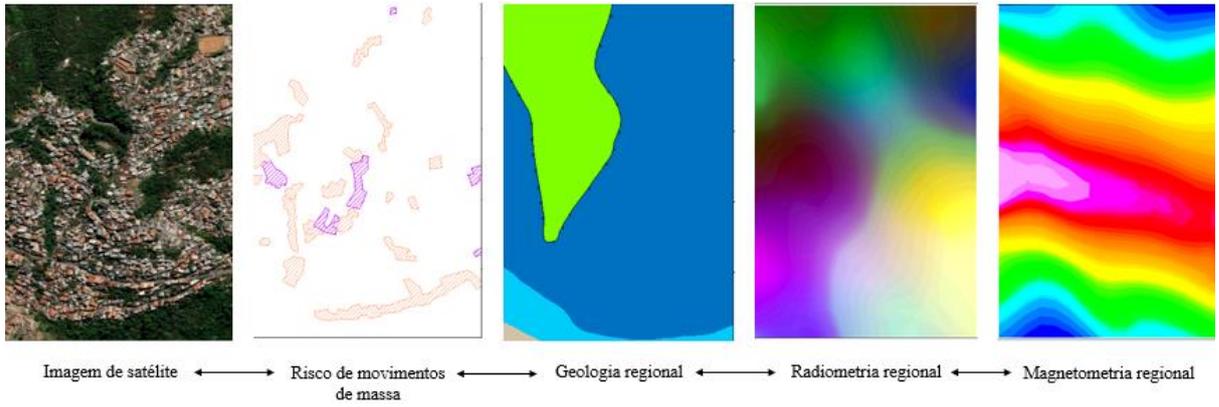
**Figura 5.8:** Resultados da deconvolução de Euler. A) Distribuição das fontes de anomalias magnéticas em 3D. B) Resultado da Krigagem estimando o parâmetro Z.

## 5.5 DEFINIÇÃO DO LEVANTAMENTO TERRESTRE

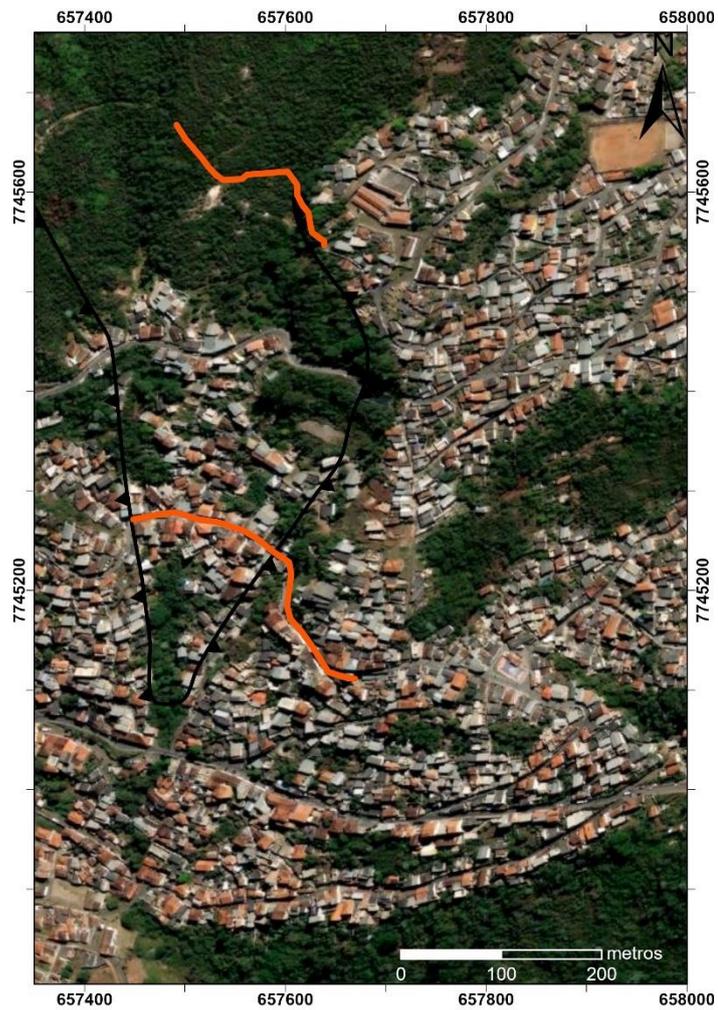
A partir das informações obtidas de uma análise conjunta entre os dados de mapeamento geológico de Endo *et al.* (2019), e dos produtos gerados por meio do processamento dos dados regionais de radiometria e magnetometria (Figura 5.9: Análise integrada dos dados geofísicos regionais.), foram definidas duas linhas pelas quais os levantamentos terrestres de magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade seriam conduzidos de forma a se obter dados geofísicos ainda mais detalhados nas regiões de interesse.

Para esta seleção, foram considerados a proximidade com a zona de cisalhamento São Bento, visto que esta pode ser uma estrutura regional que condiciona possíveis movimentos de massa no interior da área de estudo. Também entre os critérios de escolha, foi levado em consideração os aspectos técnicos dos levantamentos a serem conduzidos, de forma que se priorizou ruas nas direções EW, com pouco trânsito e baixo fluxo de pessoas para minimizar os erros de leitura do gravímetro, com o mínimo de interferência por fios de alta tensão e antenas para não prejudicar as leituras do magnetômetro, assim como as porções de ruas totalmente asfaltadas são inadequadas para o levantamento de eletrorresistividade.

Com todos os critérios citados acima levados em consideração, foram selecionadas duas linhas de 250 metros de extensão e direção preferencial EW, e que passam sobre o traço da zona de cisalhamento São Bento, como mostra a Figura 5.10.



**Figura 5.9:** Análise integrada dos dados geofísicos regionais.



**Figura 5.10:** Posicionamento das duas linhas selecionadas para condução dos levantamentos terrestres.



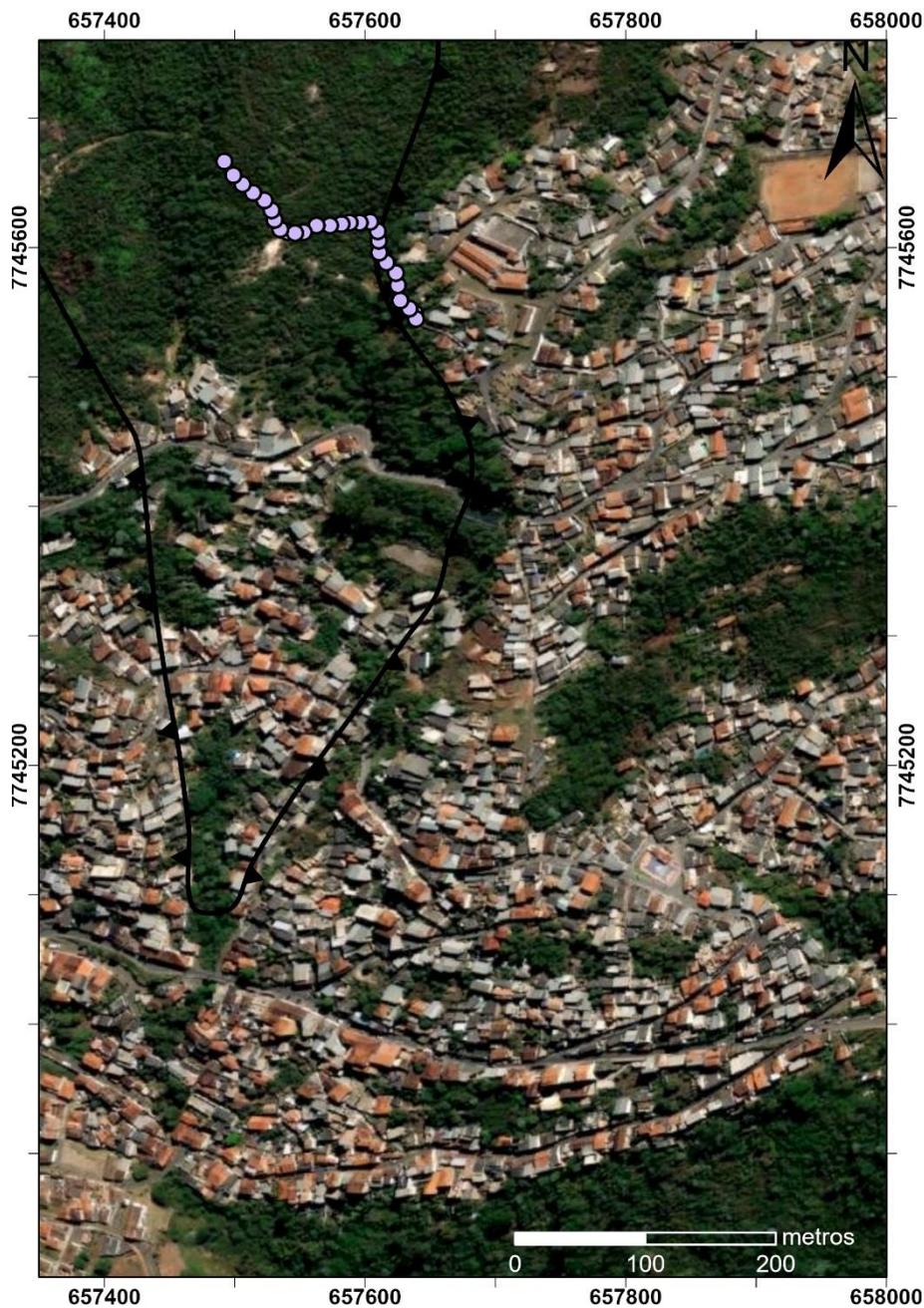
Após definidas as linhas nas quais foram conduzidos os levantamentos geofísicos terrestres de gravimetria, magnetometria e eletrorresistividade, neste capítulo, descrever-se-ão as características da aquisição de cada um destes levantamentos.

#### 6.1 LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO

O equipamento utilizado para o levantamento terrestre de gravimetria foi o gravímetro CG-5 da empresa Scintrex, concedido pela parceria estabelecida com o Observatório Nacional.

As leituras foram realizadas em uma única linha que abrange a porção norte e noroeste da área de estudo. Esta linha foi escolhida por ser a única porção de toda a área que possui as condições mínimas para o levantamento, como um baixo fluxo de veículos e pessoas.

No total, foram levantados 26 pontos distanciados 10 metros entre si, perfazendo uma linha de 250 metros de extensão, como mostra a Figura 6.1. Em cada ponto, as leituras foram realizadas com 1 minuto de duração, para garantir uma melhor precisão dos dados obtidos.



**Figura 6.1:** Localização dos pontos nos quais foram realizados levantamentos gravimétricos. A estrutura exibida corresponde ao traço da Zona de Cisalhamento São Bento.

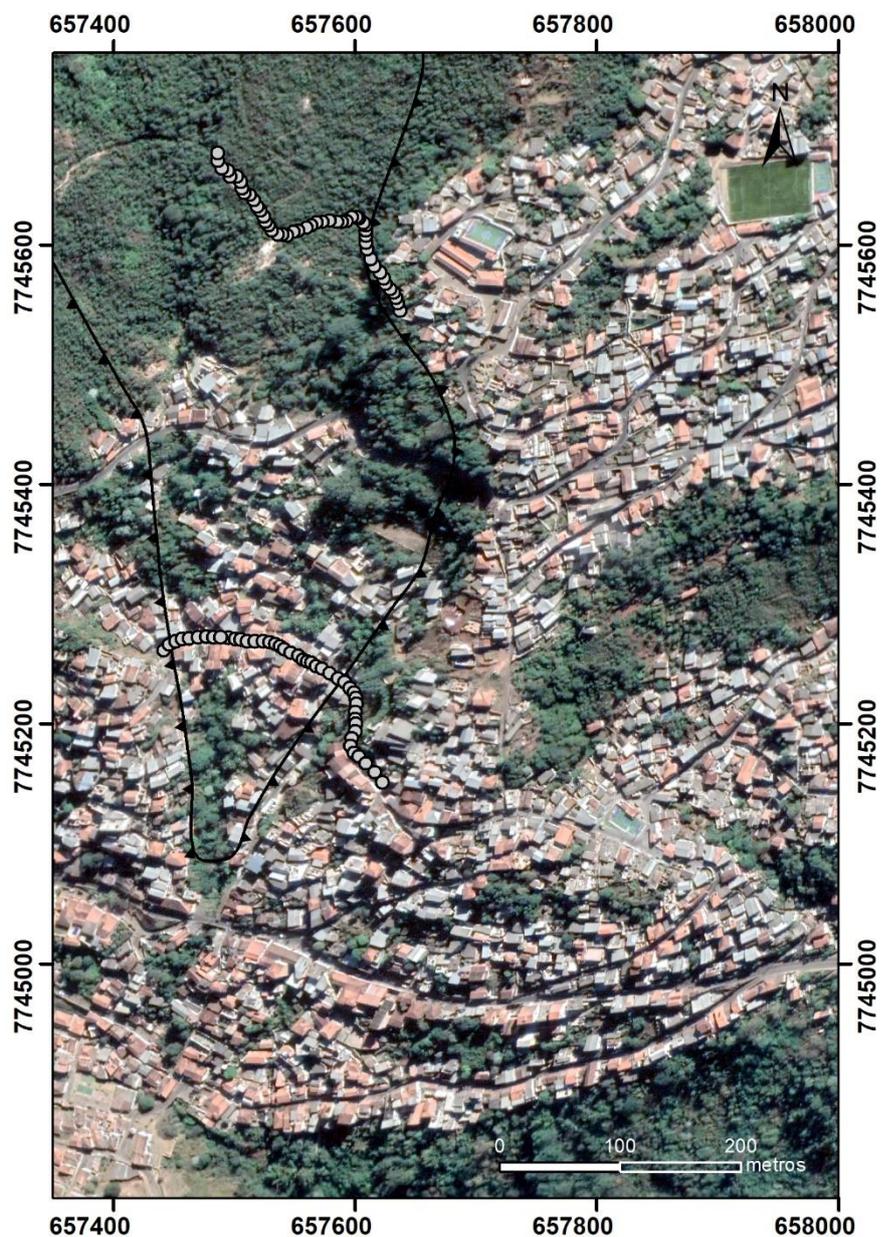
## 6.2 LEVANTAMENTO MAGNETOMÉTRICO

Para o levantamento de magnetometria terrestre, foi utilizado o equipamento GSM-19, da Geometrics.

Para cada dia de levantamento, estabeleceu-se uma localização nas proximidades das linhas a serem levantadas para que fosse alocada a base móvel de forma a se obter leituras da posição fixa com qualidade de sinal consistentemente acima de 95% e com frequência temporal de 3 segundos.

As leituras da base móvel foram realizadas em duas linhas semiparalelas: uma linha localizada na porção norte da área de estudo, percorrendo o mesmo trajeto do levantamento de gravimetria (A), e uma outra linha mais na porção central da área, passando sobre o traço da zona de cisalhamento São Bento (B) (Figura 6.2).

A linha A possui 150m de extensão, com três leituras sendo realizadas para ponto, distantes de 5m entre si. A linha B possui 230m de extensão, sendo que também foram realizadas três leituras para cada ponto distantes entre si em 5m. Por se tratar de um ambiente mais urbanizado, obteve precisão de leitura mais baixa devido à proximidade com postes e demais elementos que podem interferir na leitura do magnetômetro.



**Figura 6.2:** Localização dos pontos nos quais foram realizados levantamentos magnetométricos.

### 6.3 LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

Para o levantamento de eletrorresistividade, foi utilizado o equipamento X5Xtal fabricado pela empresa Auto Energia.

As leituras foram adquiridas ao longo dos 150m de linha por meio da técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, com o espaçamento entre os eletrodos de 5 metros (Figura 6.3). As leituras foram realizadas de forma a se obter até 6 níveis de profundidade. O levantamento foi realizado durante o mês de agosto de 2022, época seca do ano.



Figura 6.3: Linha pela qual foi realizado o levantamento de eletrorresistividade.

## CAPÍTULO 7

### PROCESSAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

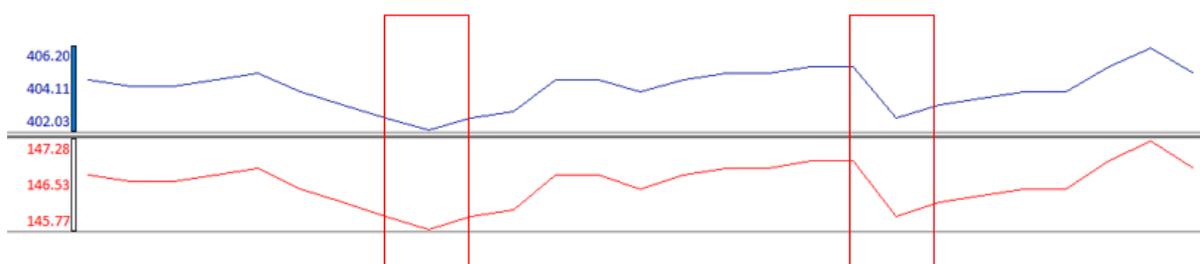
---

Neste capítulo serão tratados os parâmetros e métodos utilizados para o processamento dos dados adquiridos nas etapas de campo anteriores para os métodos geofísicos utilizados. Cada um dos métodos será abordado individualmente, para que, uma vez discutida as particularidades de cada informação, seja realizada a integração dos dados.

#### 7.1. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE GRAVIMETRIA

Para o processamento dos dados de gravimetria levantados em campo, os dados foram primeiramente corrigidos a partir do valor obtido a partir de estação gravimétrica cujo valor de aceleração gravitacional local já é estabelecida. Em seguida, os valores também foram corrigidos de acordo com os dados de latitude do levantamento.

Para as correções do tipo *free-air*, foram utilizados como parâmetros densidade média do terreno de  $2,67 \text{ g/cm}^3$  e método de correção *free-air* com valor de  $0,308596 \text{ mGal/m}$ . Para o cálculo da correção de Bouguer, foi utilizada a metodologia de Telford *et al.* (1990) também considerando a densidade da Terra como  $2,67 \text{ g/cm}^3$ . O resultado do processamento está exibido na Figura 7.1.



**Figura 7.1:** Resultados do processamento de gravimetria. Em azul, a correção de *free air* pelo método de Telford e em vermelho, a correção de Bouguer.

As duas extremidades da linha levantada exibem como resultado uma leitura maior da aceleração da gravidade nestas regiões. Esta informação é correspondente com as regiões onde afloram itabiritos da Formação Cauê de acordo com o que foi observado em campo e em mapeamento. O resultado é, portanto, coerente com o esperado, uma vez que este litotipo apresenta densidade ligeiramente maior que as demais rochas da região.

As porções em destaque correspondem a regiões de baixo gravimétrico, o que é indicativo de regiões com mais baixa densidade, que podem indicar a presença de espaços vazios em subsuperfície, ou podem corresponder a regiões nas quais a presença de itabirito é mais baixa. Os pontos levantados correspondente a estas áreas estão em destaque na Figura 7.2.

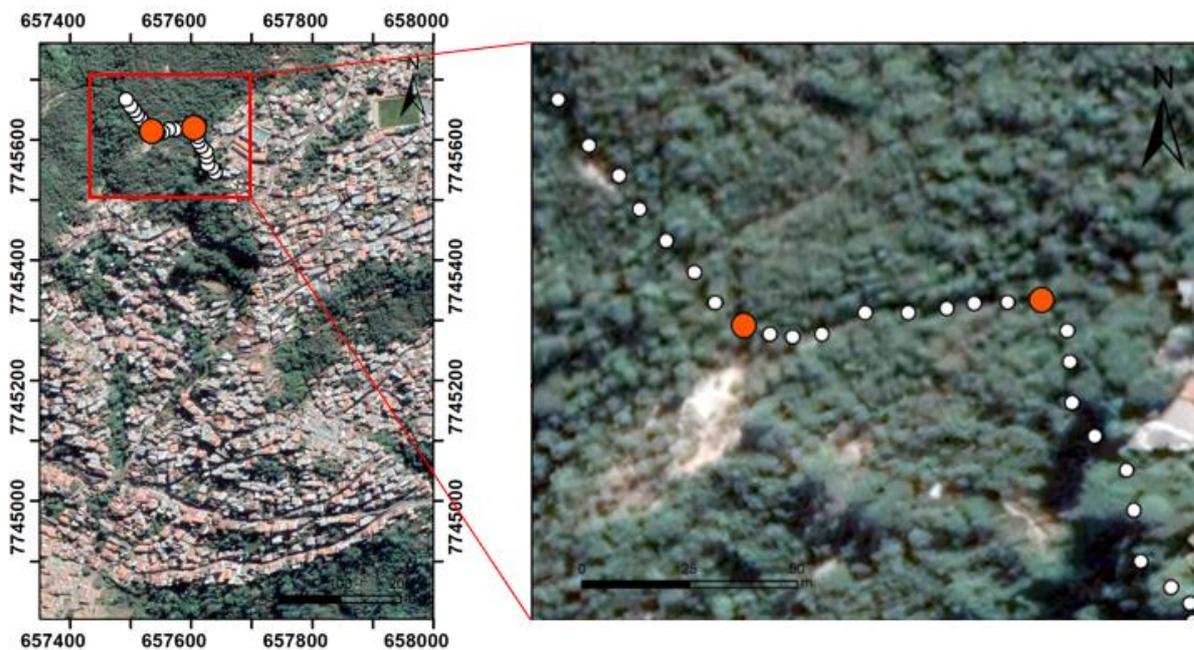
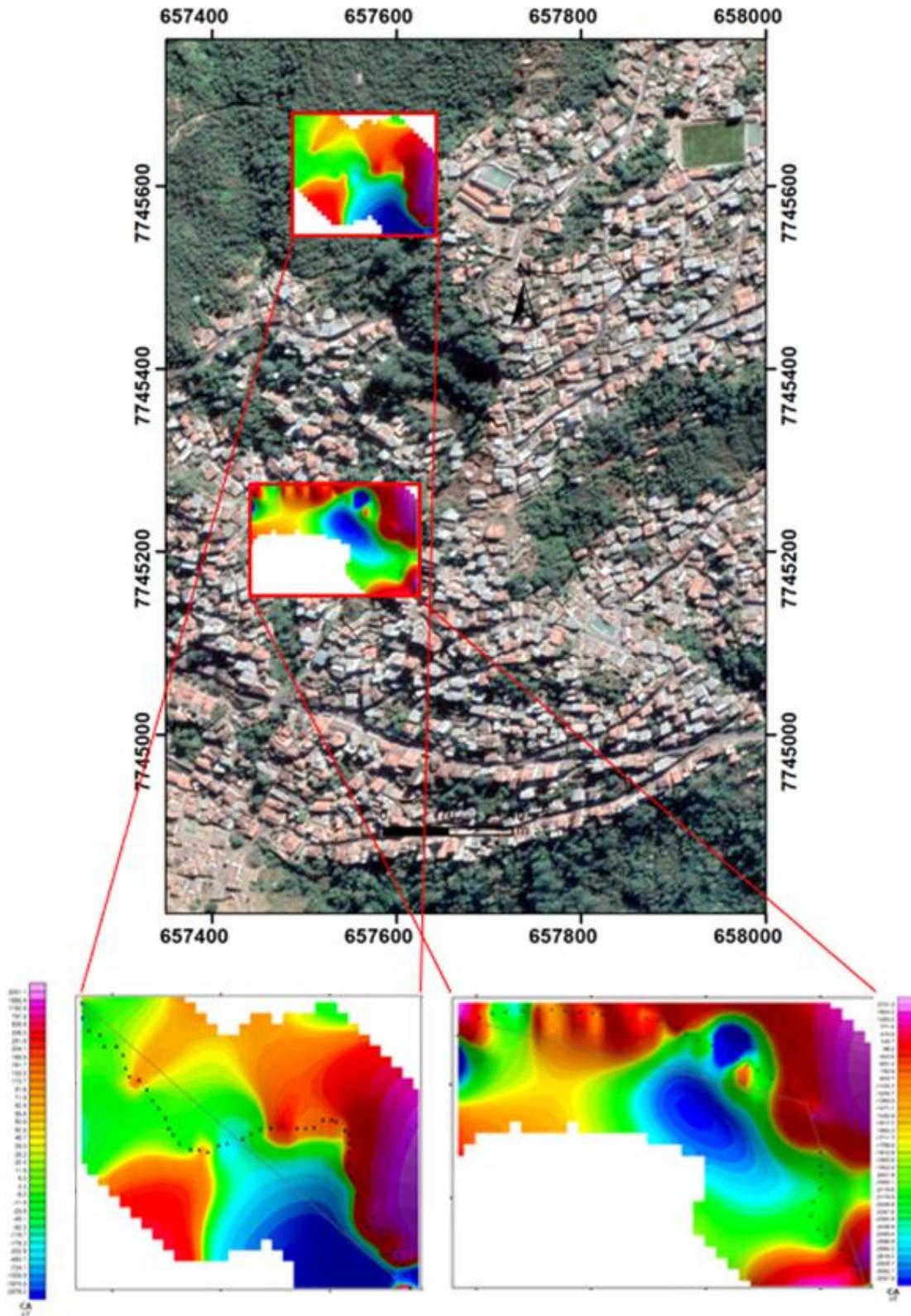


Figura 7.2: Destaque para os pontos de baixo gravimétrico na linha levantada.

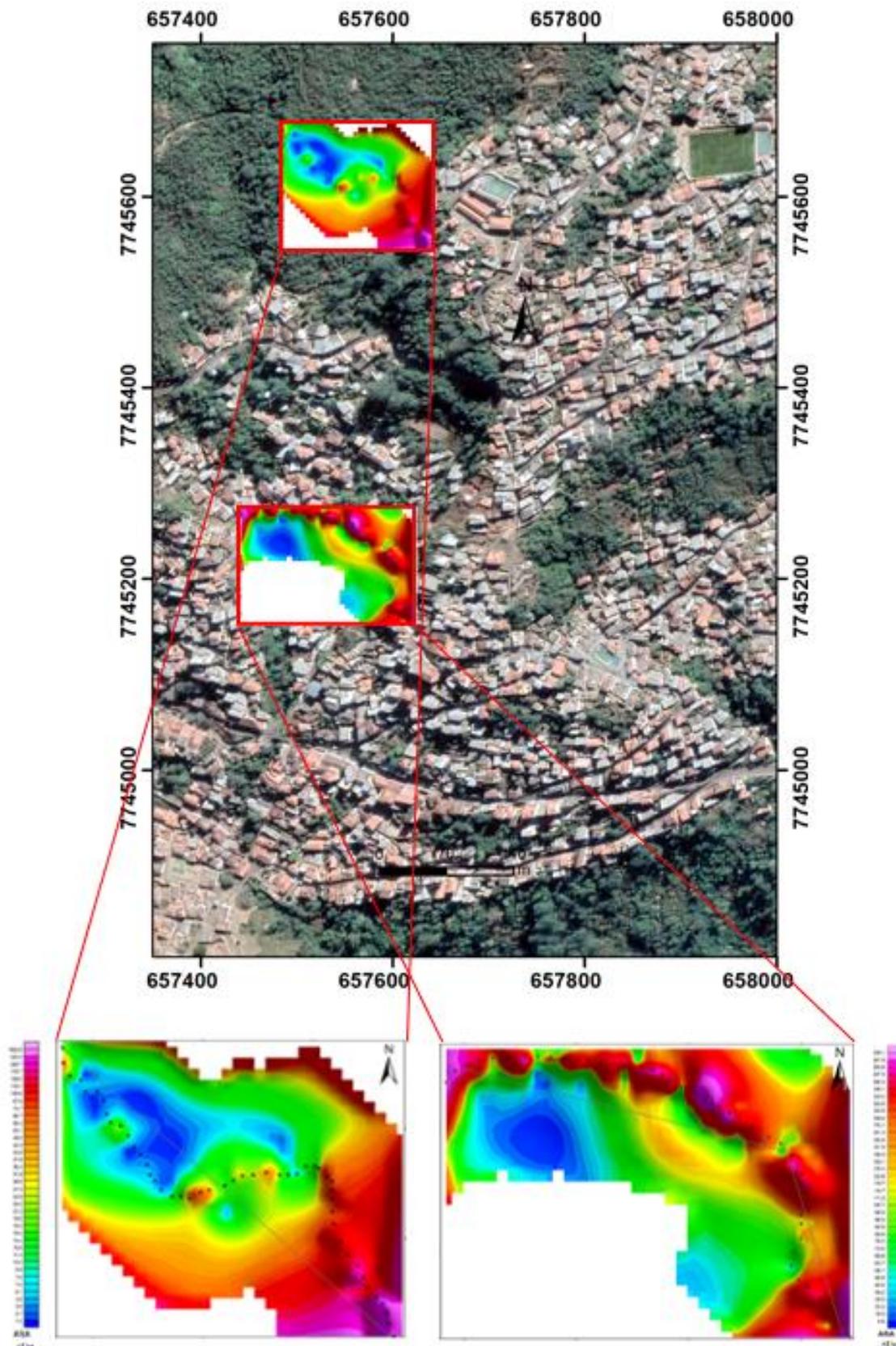
## 7.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE MAGNETOMETRIA

Para ambas as linhas, a partir dos dados brutos obtidos para cada ponto da base móvel, foram realizadas as correções de IGRF a partir das coordenadas de cada ponto e a correção diurna a partir das leituras realizadas na base fixa. As correções e cálculos de grid foram realizadas com o software Oasis Montaj.

Estes valores foram utilizados para o cálculo de um grid com resolução espacial de cinco metros utilizando o método de interpolação por mínimas curvaturas, com volume de busca limitado a 10 células e extrapolação de até 50 metros a partir dos pontos. O grid de campo anômalo produzido foi utilizado como entrada para a criação de um grid de amplitude de sinal analítico (Figuras 7.3 e 7.4).



**Figura 7.3:** Campo anômalo (CA) calculados a partir do levantamento terrestre em ambas as linhas. Os pontos em preto representam as estações nas quais foram realizadas leituras, e o tracejado cinza representa o traço pelo qual foi calculada a deconvolução de Euler.

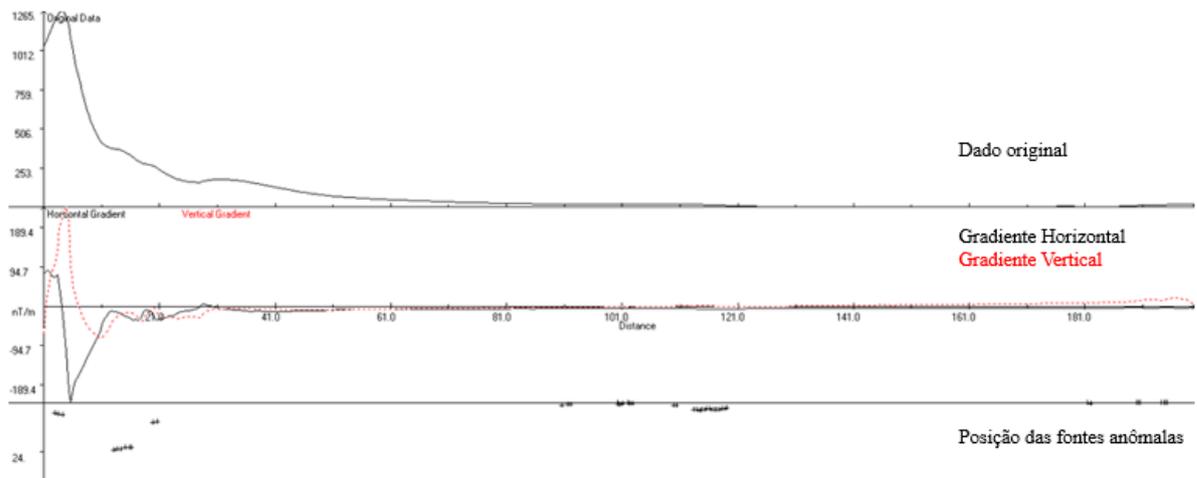


**Figura 7.4:** Amplitude do sinal analítico (ASA) calculada a partir do levantamento terrestre em ambas as linhas. Os pontos em preto representam as estações nas quais foram realizadas leituras, e o tracejado cinza representa o traço pelo qual foi calculada a deconvolução de Euler.

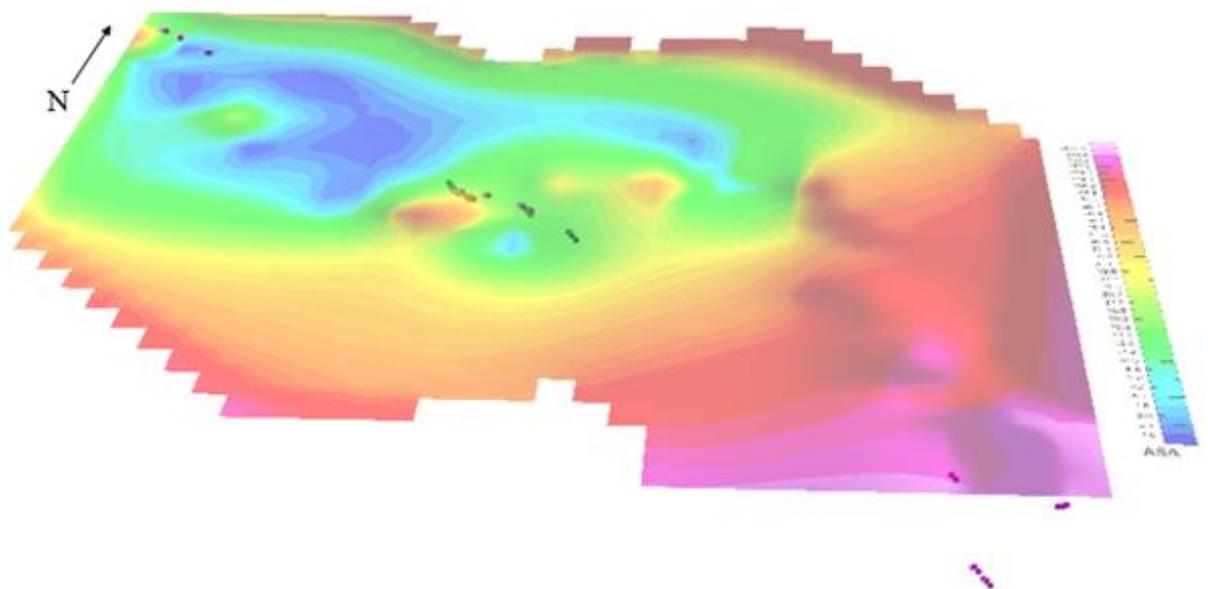
A partir dos valores de amplitude do sinal analítico obtidos em *grid*, foram extraídos os valores colineares com espaçamento de um metro para que fossem utilizadas como *input* para a deconvolução.

A deconvolução de Euler foi realizada por meio do *software* livre Euler 1.15 desenvolvido pela Universidade de Witwatersrand utilizando como parâmetro um índice estrutural igual a 1, tamanho de janela 11, e separações em X e Y sendo respectivamente 1,18 e 0,59.

Para a linha 1, o resultado da deconvolução e do posicionamento dos pontos anômalos no espaço estão representados nas figuras Figura 7.5 e Figura 7.6, respectivamente.



**Figura 7.5:** Resultado da deconvolução de Euler para a linha localizada a norte.



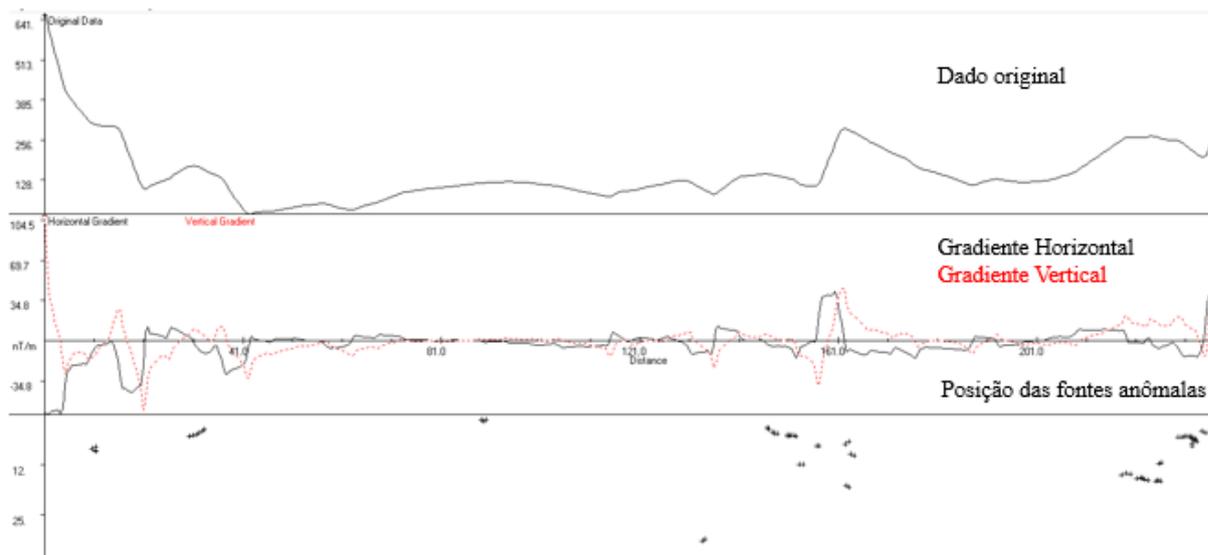
**Figura 7.6:** Integração do resultado de deconvolução com mapa de amplitude do sinal analítico.

Os dados da deconvolução exibidos na Figura 7.5 estão exibidos ilustrando na linha superior o dado magnético original, de forma que quanto maior a anomalia magnética detectada no ponto, maior o valor apresentado no gráfico. Na linha abaixo, este dado original é decomposto entre os gradientes horizontal e vertical. Na última linha, os resultados são mostrados como o posicionamento das fontes anômalas em profundidade responsáveis por originar o sinal recebido.

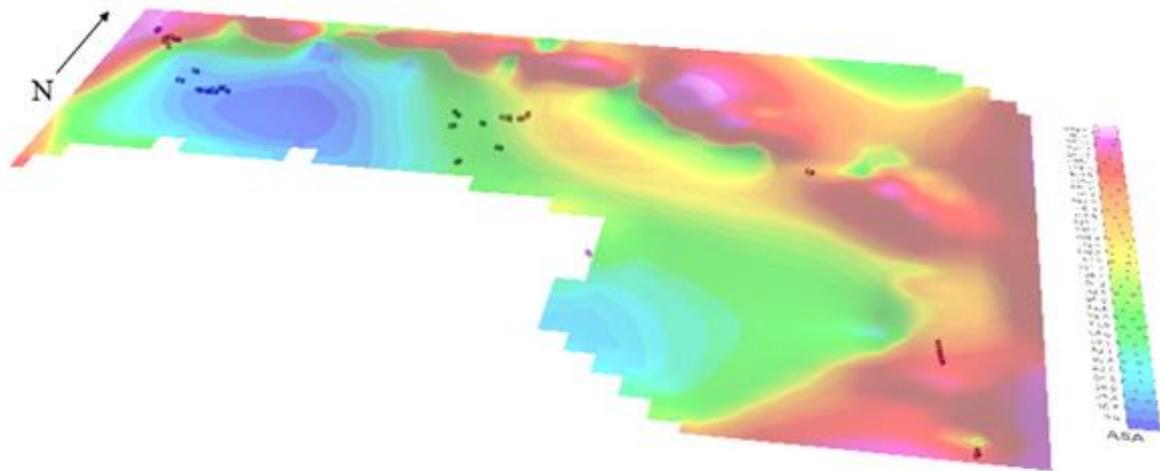
A partir dos resultados obtidos, é possível observar a presença de estruturas superficiais em três porções distintas da linha sobre a qual foi realizada a deconvolução. Na porção sudeste, associado à região de maior amplitude do sinal analítico, as anomalias magnéticas estão localizadas em porção mais profunda e localizadas muito próximo da zona de cisalhamento São Bento. Os resultados obtidos servem para corroborar a direção e mergulho da zona de cisalhamento para leste, de ângulo mais alto e atingindo regiões mais profundas de até 24m de profundidade.

Na porção central, entre ambos os traços da zona de cisalhamento, está encontra-se uma região com múltiplas anomalias detectadas, todas superficiais com profundidade máxima de 3,5m. Na porção noroeste, foram detectadas menos anomalias e mais espaçadas, todas bastante superficiais com a profundidade máxima não ultrapassando 1m.

Para a linha 2, os resultados obtidos pela deconvolução e projetados em ambiente 3D estão ilustrados nas figuras Figura 7.7 e Figura 7.8.



**Figura 7.7:** Resultado da deconvolução de Euler para a linha localizada a sul.



**Figura 7.8:** Integração do resultado de deconvolução com mapa de amplitude do sinal analítico.

Assim como foi discutido para linha 1, a linha 2 também apresenta três porções com resposta mais pronunciada na deconvolução. Na porção a sudeste, a resposta da deconvolução também ocorre aparentemente associada ao traço da zona de cisalhamento, porém com menor inclinação do que à observada na linha 1, e com profundidade também mais rasas, sendo a profundidade máxima de anomalia presente nessa área inferior a 10 metros. Na porção central, também é observado um aglomerado de anomalias mais rasas com profundidade máxima de 16 metros. Na porção noroeste, também apresentam profundidade máxima de 16 metros de profundidade, com muitas delas localizadas em profundidade inferior a 8 metros.

As informações obtidas por meio da deconvolução também estão representadas em ambas as áreas em planta, conforme mostram as figuras 7.9 e 7.10. Os pontos correspondem ao posicionamento das fontes de anomalia, enquanto a legenda de cores é indicativa da profundidade de cada uma destas anomalias. O traço da zona de cisalhamento São Bento também está ilustrado em branco em ambas as imagens.

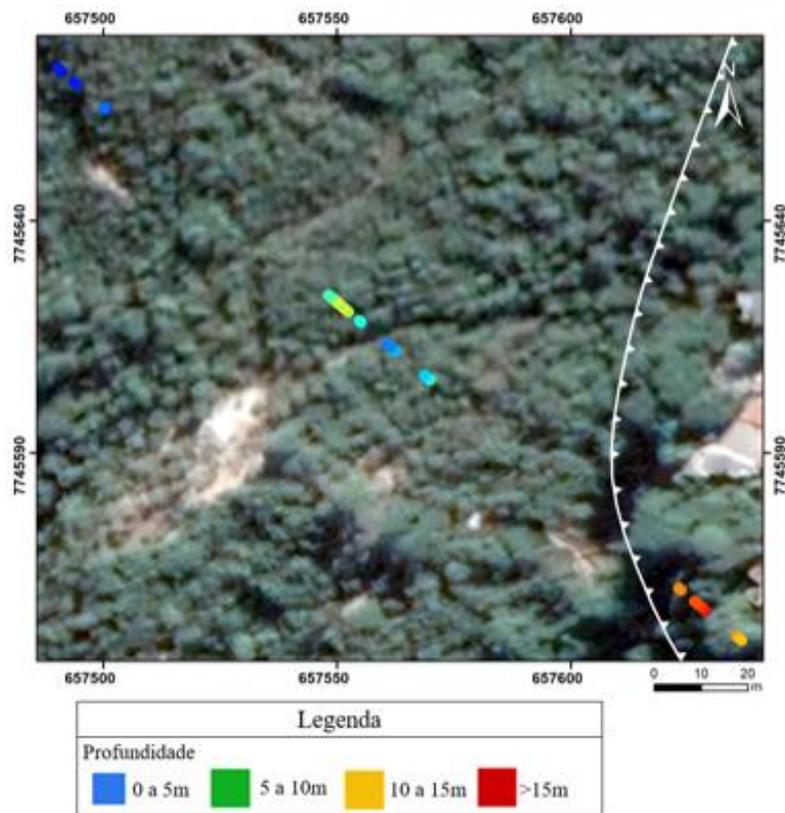


Figura 7.9: Pontos de anomalia magnética e sua profundidade na área norte.



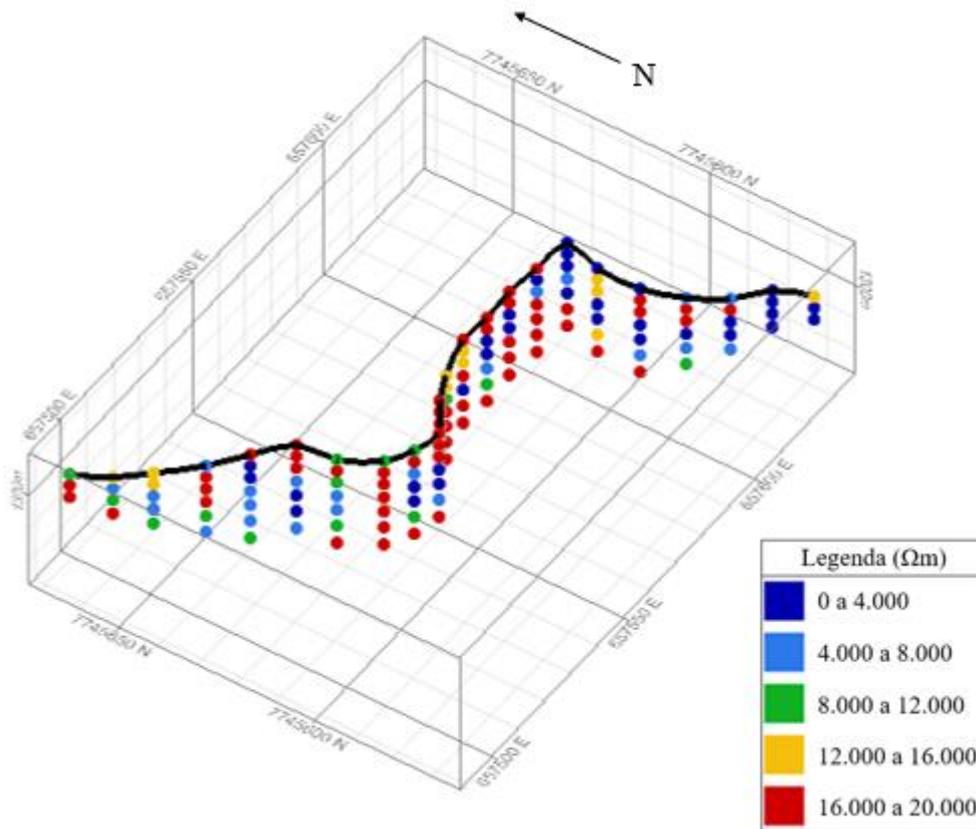
Figura 7.10: Pontos de anomalia magnética e sua profundidade na área sul.

### 7.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

Os dados obtidos em campo foram analisados estatisticamente de forma a retirar valores não representativos do modelo. Como padrão, foi adotado um valor de *cut off* máximo de valores de resistividade de 20.000  $\Omega\text{m}$

A profundidade real das leituras foi calculada a partir de inversão dos dados com auxílio do *software* Res2DInv. Como o levantamento não foi realizado em uma linha reta, os valores invertidos foram reprojitados de acordo com as coordenadas originais de cada eletrodo. A visualização dos dados em ambiente 3D foi realizada com auxílio do *software* de modelagem geológica Studio RM.

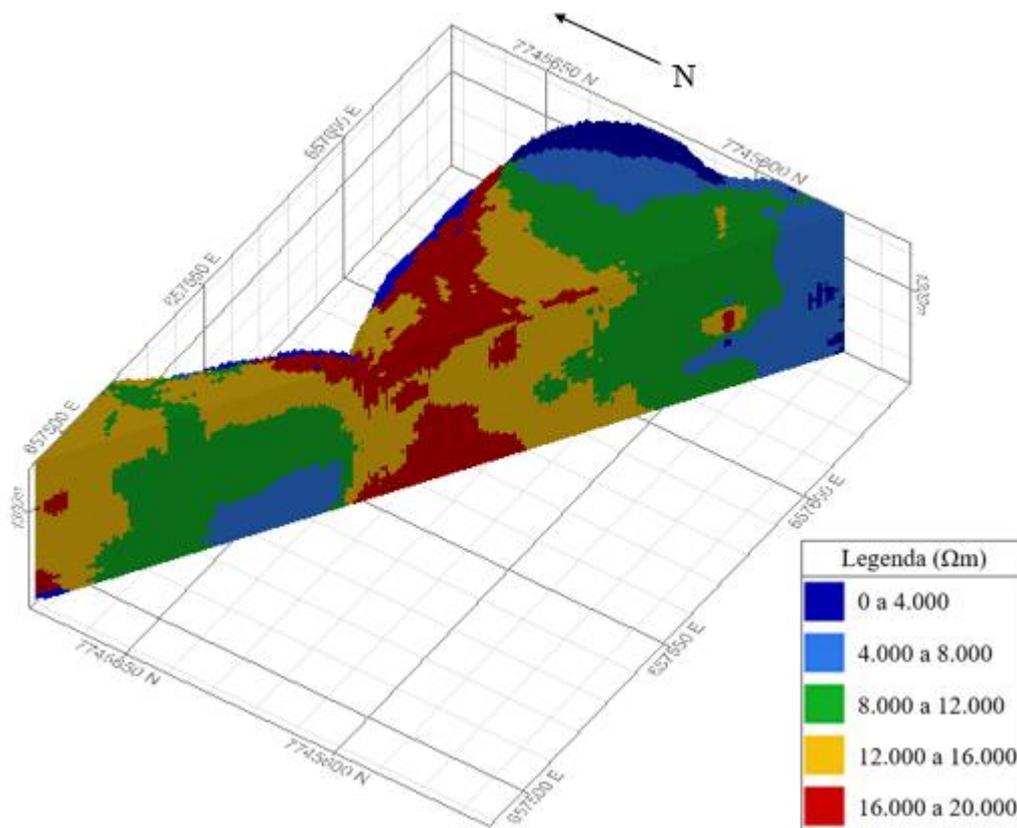
O posicionamento final de cada ponto amostrado, assim como seu respectivo valor de resistividade calculada, está ilustrado na Figura 7.11.



**Figura 7.11:** Posicionamento dos pontos amostrados reprojitados e seus respectivos valores de eletrorresistividade.

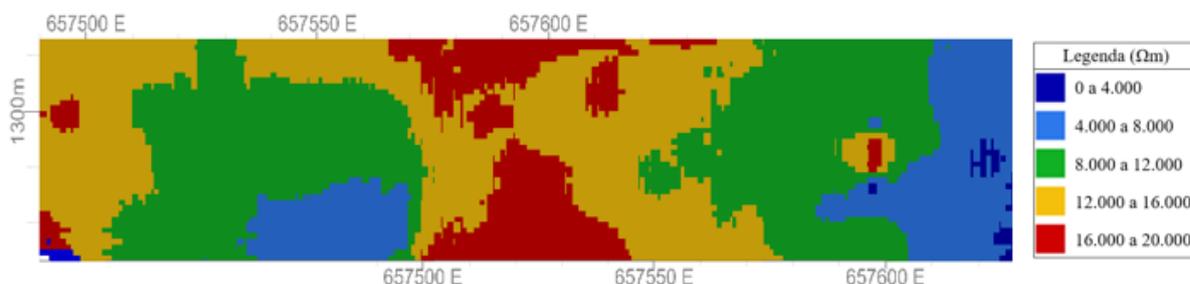
A partir dos pontos posicionados no espaço, foi realizada uma estimativa para o cálculo de um modelo *voxel* com valores de eletrorresistividade. Para tal, foi utilizado como método de estimativa o inverso do quadrado da distância, e como parâmetros, foram configurados um volume de busca esferoidal com raio de 25 metros, com mínimo de 1 e máximo de 20 amostras por bloco. O tamanho de célula foi definido como 1 metro.

O resultado do modelo *voxel* está ilustrado na Figura 7.12.



**Figura 7.12:** Modelo voxel de eletrorresistividade.

A partir do modelo voxel, é possível quem sejam extraídas as seções para análise e interpretação dos resultados. A seção representada na Figura 7.13 representa a vista frontal do corte mostrado na Figura 7.12. Esta seção corresponde ao corte transversal que mais se aproxima da linha levantada, sendo, portanto, a seção mais representativa pois é a que menos dista dos pontos amostrados.

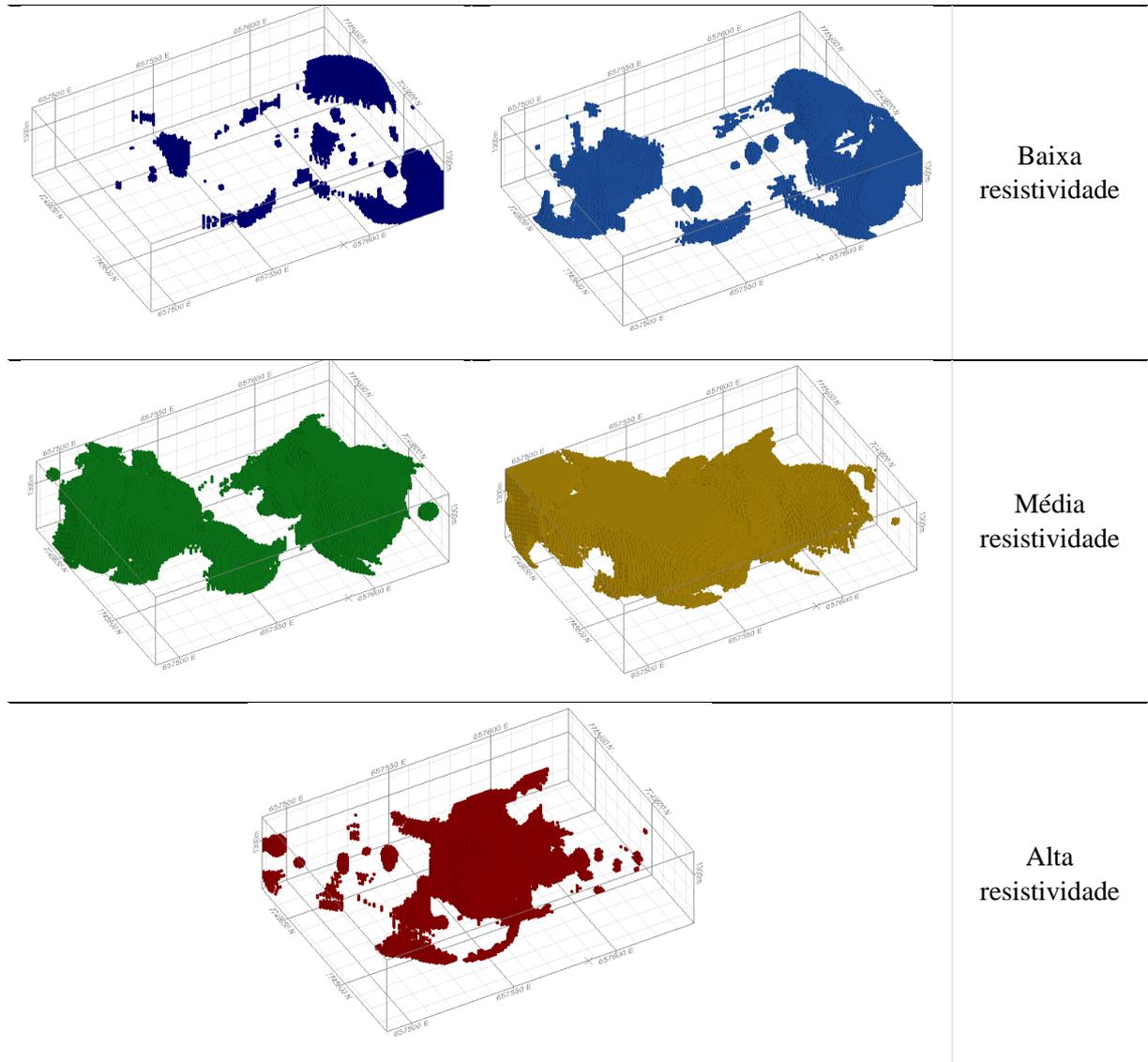


**Figura 7.13:** Seção transversal de eletrorresistividade.

Observa-se de forma geral, que foram obtidos valores maiores eletrorresistividade na porção central da linha, enquanto os valores menores ficaram restritos às regiões mais profundas ou mais

externas da linha. As regiões de alta, média e baixa resistividades estão mostradas de forma isolada no Quadro 7.1.

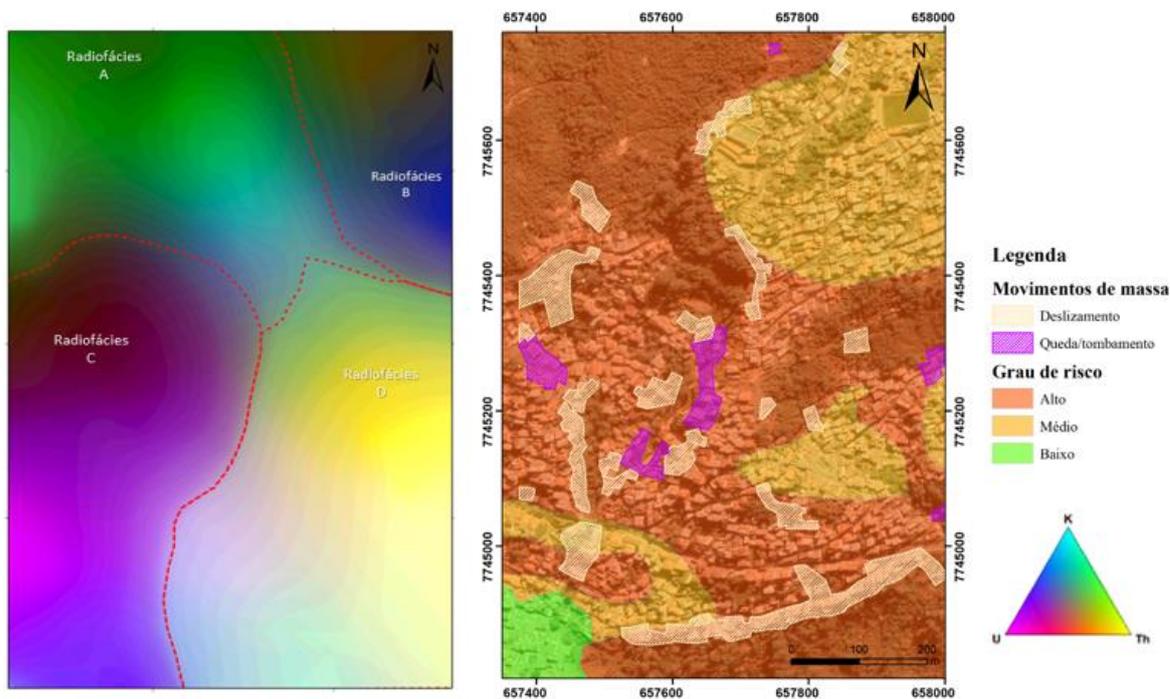
**Quadro 7.1:** Separação das zonas de baixa, média e alta resistividade.



#### 7.4. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

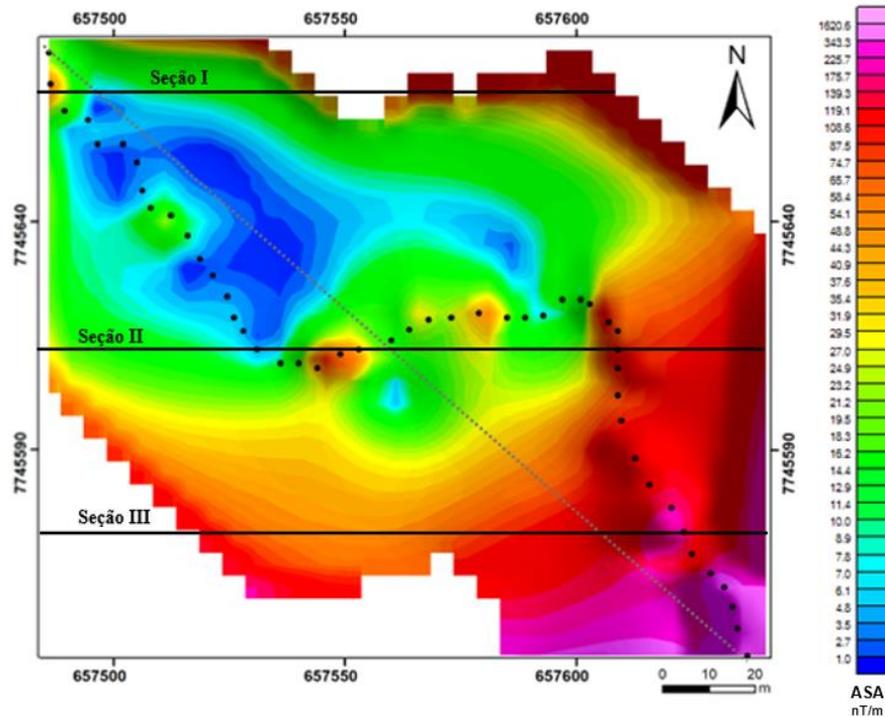
Neste item serão abordados todos os resultados obtidos por meio de levantamentos geofísicos (magnetometria, gravimetria e eleorresistividade) de forma integrada, buscando associar as respostas observadas às regiões de risco geotécnico já identificadas na área do levantamento. Essa discussão trará um enfoque maior na linha localizada na porção norte da área de estudo, uma vez que foi possível realizar os levantamentos utilizando os três métodos geofísicos na mesma linha.

Inicialmente, analisando o mapa de risco geotécnico em conjunto com os dados de radiometria regional (Figura 7.14), podemos identificar que a radiofácies B é aquela que está associada a um grau de risco médio, enquanto as demais corresponde às áreas classificadas como grau de risco alto.



**Figura 7.14:** Comparação entre os resultados de radiometria com o grau de risco.

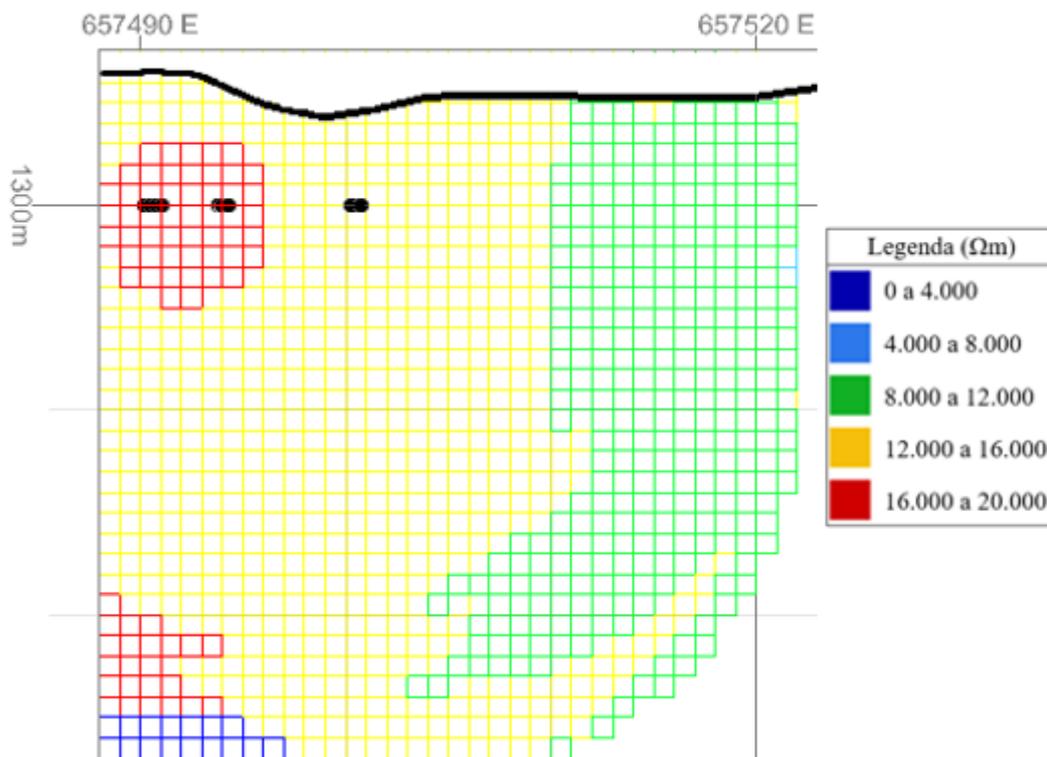
Para facilitar a análise integrada da linha norte, os resultados serão exibidos na forma de três seções verticais EW localizadas na porção norte da área de estudo (seções I, II e III), que foram escolhidas por destacar os aspectos mais relevantes para esta discussão. O posicionamento de cada uma das seções está representado na Figura 7.15.



**Figura 7.15:** Mapa da amplitude do sinal analítico destacando as três seções utilizadas como base para discussão.

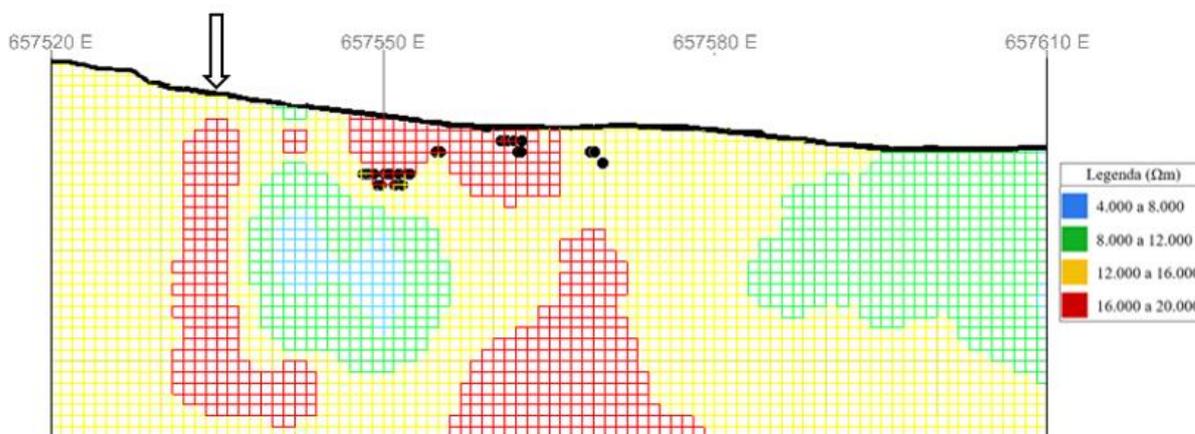
A seção I, ilustrada na Figura 7.16, apresenta informações de eletrorresistividade representada pelo modelo voxel, e das posições das fontes de anomalia magnética obtidas pelo método da deconvolução de Euler, representada pelos pontos escuros. Nesta seção fica em evidência uma correlação da porção de mais alta eletrorresistividade com as posições das fontes anômalas. Uma possível interpretação deste fenômeno advém do fato da presença de itabiritos da formação Cauê aflorantes nesta região com alta susceptibilidade magnética e baixa permeabilidade, o que corrobora para que tais regiões apresentem como característica a presença de fonte de magnetismo concomitante com baixa condutividade elétrica.

Observa-se também que na região mais a leste onde apresenta valores de resistividade mais baixos, não há nenhuma anomalia magnética identificada através do método da deconvolução. Estas regiões por sua vez correspondem a áreas mapeadas como quartzito/filito e apresentam uma resposta levemente mais baixa nas leituras de gravimetria.



**Figura 7.16:** Seção I, localizada na posição 7745669N.

A seção II, ilustrada na Figura 7.17, em sua porção central, também apresenta a mesma correspondência identificada na seção I: regiões nas quais há ocorrência de elevado número de anomalias magnéticas ocorrem nas mesmas regiões de alta eletroresistividade, evidenciando a consistência dos resultados obtidos. Nesta linha também é possível identificar que nas porções mais a leste, onde não há fontes anômalas magnéticas, os valores de eletroresistividade também são mais baixos.

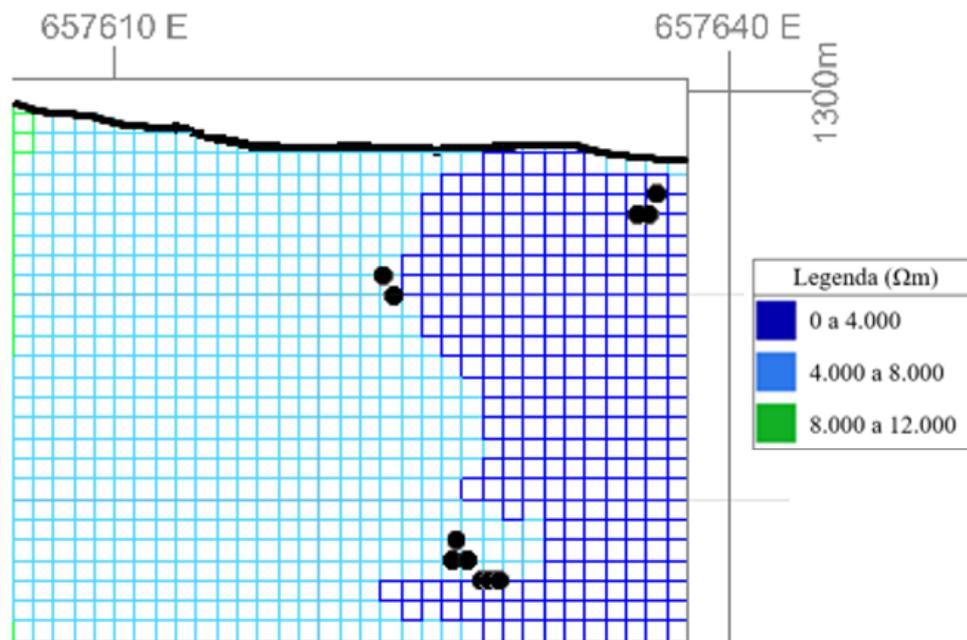


**Figura 7.17:** Seção II, localizada na posição 7745612N.

Nesta seção, no entanto, um outro dado que chama atenção ocorre na região destacada pela seta. A seta está localizada exatamente sobre uma das duas localidades nas quais foram identificadas uma resposta gravimétrica mais baixa que as demais estações do levantamento. Desta forma, fica em evidência nesta seção uma região na qual há alta eletrorresistividade que não está associada a fontes de anomalia magnética, mas relacionada com uma região de baixo gravimétrico. Pela análise em conjunto das respostas geofísicas obtidas pelos três métodos distintos nesta localização específica, é plausível que nesta porção exista alguma galeria subterrânea decorrente de atividades mineradoras abandonadas, que eram muito recorrentes nesta encosta.

Chama atenção, no entanto, a região de mais alta condutividade localizada logo abaixo das fontes de anomalia magnética. Esta porção pode ser interpretada como uma região de mais alta permeabilidade, ou que permita um fluxo maior de água em subsuperfície e que fica restrita a regiões de alta eletrorresistividade. Esta dinâmica pode indicar possíveis regiões que formam pequenos aquíferos suspensos em épocas chuvosas e que são críticas se tratando de risco geotécnico, uma vez que a saturação em água diminui o atrito interno das rochas, o que favorece o desenvolvimento de movimentos de massa. Vale lembrar que os resultados obtidos por meio de métodos geofísicos são indiretos e apresentam ambiguidades inerentes aos métodos, de forma que as discussões e hipóteses levantadas neste tópico são inconclusivas.

A seção III, ilustrada na Figura 7.18, é a que apresenta a região de menores valores para eletrorresistividade. Nesta seção, ao contrário do que foi caracterizado nas outras duas seções, as fontes pontuais de anomalia magnética ocorrem associadas às regiões de baixa eletrorresistividade.



**Figura 7.18:** Seção III localizada na posição 7745571N.

Outra diferença que se pode notar neste caso, é que as fontes anômalas estão presentes em profundidades maiores e ocorrem associadas ao traço da zona de cisalhamento São Bento. Uma similaridade com as demais seções, no entanto, é que nesta porção as fontes anômalas ocorrem associadas às regiões onde afloram itabiritos, que, como mostram os resultados, é o principal litotipo responsável pelas respostas do levantamento de magnetometria.

Nesta região destacada na seção III, considerando o alto mergulho das camadas de itabirito, em conjunto com a alta condutividade identificada pelos métodos elétricos o que, em épocas de chuva, podem apresentar saturação em água e conseqüentemente uma redução do ângulo de atrito interno das camadas da rocha, podem apresentar um alto risco de movimento de massa principalmente aqueles associados à queda de blocos, como mostram os testes de Markland discutidos no capítulo 3.

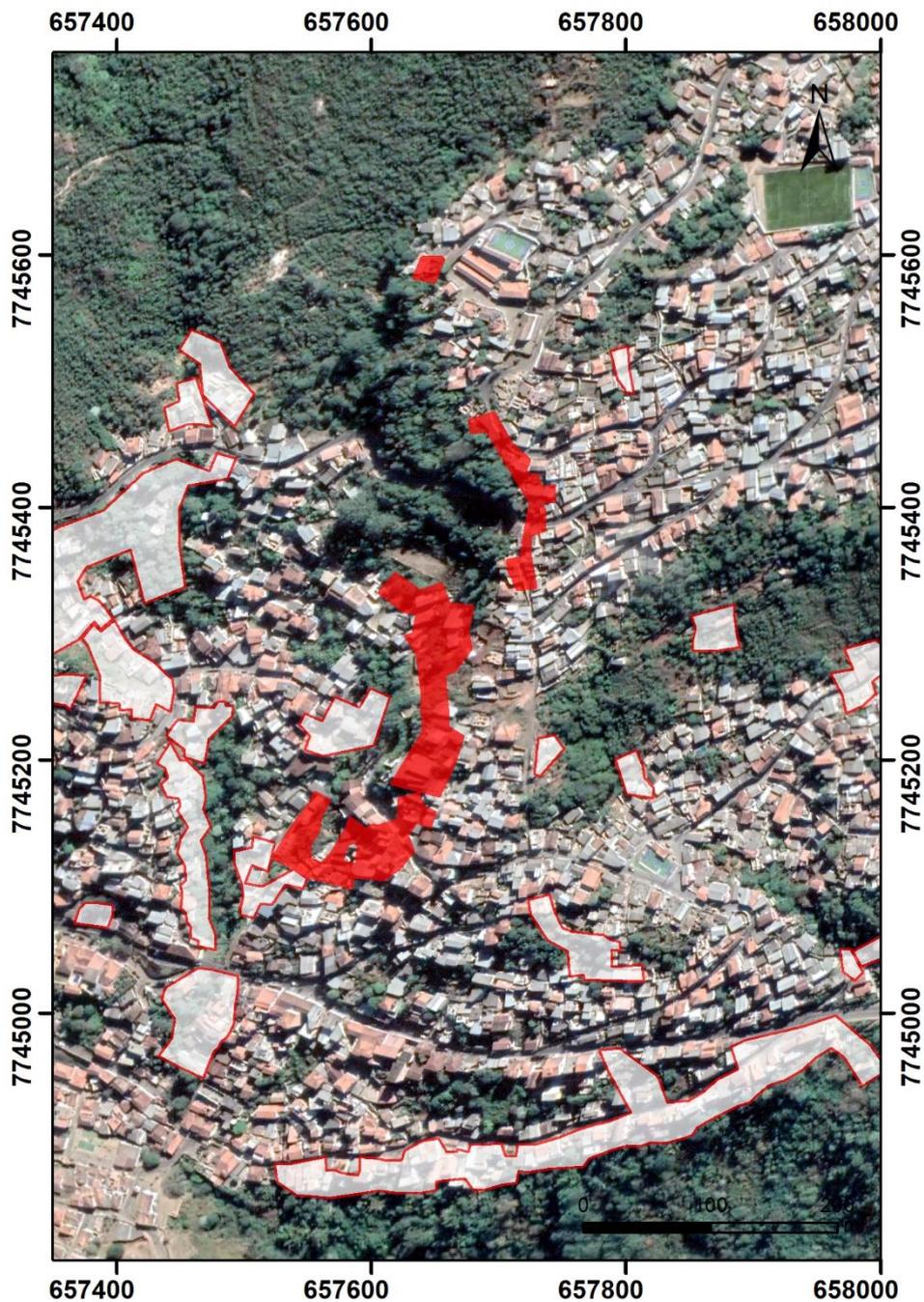
Uma discussão pertinente que pode ser obtida a partir da comparação dos resultados entre as três seções é o fato de que o itabirito, apesar de sempre associado às respostas magnéticas, apresenta valores de eletrorresistividade muito variável: nas seções I e II, corresponde às regiões de mais alta eletrorresistividade, enquanto na seção III corresponde à região de mais baixa eletrorresistividade. Uma das possíveis justificativas para este fenômeno, pode ser decorrente do controle estrutural da região, no qual as estruturas decorrentes da zona de cisalhamento podem facilitar a infiltração de água em profundidades maiores por meio de descontinuidades, o que explicaria o fato de estas regiões apresentarem valores de eletrorresistividade significativamente menores que nas demais áreas.

Para a linha localizada na porção sul da área de estudo, apenas o levantamento de magnetometria foi realizado devido à impossibilidade de realização dos demais levantamentos uma vez que se trata de uma área urbanizada com alta densidade populacional. Dessa forma, a discussão aqui trazida aborda suas diferenças e similaridades com os resultados de magnetometria obtidos na linha norte.

A partir da comparação entre as linhas, fica evidente que em ambas apresentam padrões similares da localização das fontes anômalas entre os perfis. A presença de fontes anômalas associadas à zona de cisalhamento São Bento é notável tanto na parte oeste quanto leste, apesar de haver uma leve diferença em relação à quantidade de anomalias e a profundidade que estas se encontram. O que também chama a atenção é que em ambos os casos, há ocorrência de anomalias superficiais na região localizada entre os traços da zona de cisalhamento. No entanto, como já discutido anteriormente neste capítulo, apesar do posicionamento das fontes anômalas estarem associados de forma geral com os itabiritos da formação Cauê presentes na área, seu potencial como condicionante de movimentos de massa é bastante inconclusivo, uma vez que a análise de eletrorresistividade apresenta variações significativas a depender das demais condições do meio que vão além da litologia aflorante. Os resultados de gravimetria nesta região também complementariam o estudo desta linha em específico para identificação de possíveis galerias que apresentam o risco geotécnico de solapamento.

Sintetizando todas as informações obtidas pelos aerolevantamentos e levantamentos terrestres juntamente com a classificação de risco geológico definida pela CPRM, chega-se a um resultado preliminar de áreas de risco, levando em consideração principalmente os aspectos geofísicos aqui discutidos. As áreas com maior risco, dentro da região de estudo, seriam aquelas associadas ao traço da Zona de Cisalhamento São Bento no flanco leste, que foi identificado como possível facilitador de percolação de água (Figura 7.19). No entanto, para uma maior assertividade desta classificação, aconselha-se a continuidade deste estudo, de forma que o levantamento geofísico abranja uma área maior, e também faz-se necessário uma análise mais aprofundada da relação dos resultados geofísicos com os demais condicionantes de risco, como topografia, pluviosidade, etc.

Fica, portanto, evidente o quanto a utilização de diferentes métodos geofísicos na caracterização de estruturas em subsuperfície enriquece na compreensão das respostas obtidas individualmente, e reduz interpretações equivocadas devido à ambiguidade inerente dos métodos geofísicos. Os dados obtidos neste trabalho podem servir de base de informações para que uma análise mais detalhada das regiões atualmente classificadas com alto risco de movimento de massa possam ser compreendidas e classificadas também a partir de informações de subsuperfície.



**Figura 7.19:** Áreas com maior risco potencial com base nos resultados geofísicos. Os polígonos correspondem às áreas de risco definidas por Goes *et al.* (2016), sendo os que estão em destaque aqueles que correspondem às áreas de maior risco de acordo com os aspectos geofísicos.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

---

A utilização da geofísica como ferramenta para análise de estruturas condicionantes de risco geotécnico em áreas urbanas se mostrou satisfatória nos níveis regional e local. A utilização de múltiplos métodos auxilia ainda mais na investigação, uma vez que permite analisar uma mesma descontinuidade a partir de diferentes contrastes de propriedades físicas. Apesar do desafio de realizar um levantamento de qualidade adequada em áreas densamente povoadas e com muito movimento, é importante destacar que os métodos geofísicos permitiram a caracterização do meio em subsuperfície de forma não invasiva e com relativamente baixo custo.

As aquisições geofísicas de magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade realizadas na região que compreende parte dos bairros Morro da Queimada, Morro Santana, Alto da Cruz, Padre Faria, Taquaral, Nossa Senhora da Piedade e Padre Faria no município de Ouro Preto – MG, possibilitaram uma caracterização mais assertiva de fatores em subsuperfície que possam atuar como potenciais condicionantes de movimentos de massa, eventos que frequentemente afetam e prejudicam a infraestrutura urbana e a população que habita o entorno. A análise integrada de dados utilizando como informação dados geofísicos obtidos a partir de diferentes métodos possibilitou que estas estruturas fossem analisadas de forma complementar, visando reduzir a ambiguidade inerente dos métodos geofísicos, assim como compreender as similaridades e diferenças de resposta que uma mesma estrutura é capaz de produzir em diferentes partes.

A partir do método da gravimetria, foi possível estabelecer que localmente as regiões de baixo gravimétrico podem corresponder às regiões com potencial presença de galerias subterrâneas de minas antigas abandonadas. As informações de eletrorresistividade servem como resposta auxiliar, de forma que nas regiões com cavidades espera-se uma região de resistividade anômala.

Por meio dos resultados do levantamento magnetométrico, foi possível adquirir em maior detalhe as informações de campo anômalo, e partir desta informação, obteve-se a amplitude do sinal analítico, no intuito de se estimar a profundidade das feições magnéticas em subsuperfície pela metodologia da deconvolução de Euler. Pela deconvolução, foi possível identificar estruturas que apresentam correspondência com estruturas regionais já mapeadas como a zona de cisalhamento São Bento.

O posicionamento das fontes anômalas, quando analisados de forma integrada com os dados de eletrorresistividade, indicam que estas estruturas podem atuar impedindo o fluxo de água subterrânea, no caso das regiões com valores mais altos de eletrorresistividade, ou que as estruturas podem facilitar o fluxo de água, no caso das regiões com valores mais baixos de eletrorresistividade. As regiões que apresentam fontes de anomalia magnética associadas a valores de baixa resistividade são aquelas que apresentam o maior potencial de condicionantes de movimentos de massa, uma vez que as descontinuidades propiciam o fluxo de água e conseqüentemente reduzem a resistência interna.

Dessa forma, a análise integrada dos métodos geofísicos, métodos potenciais e eletrorresistividade, constituem uma sistemática eficiente nos estudos geotécnicos por permitir a compreensão das estruturas em subsuperfície em escalas distintas. Posto isto, indica-se esta abordagem em áreas susceptíveis a riscos geotécnicos em terrenos polideformados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alkmim F. F., Neves B. B. B., Alves J. A. C., 1993. Arcabouço tectônico do Cráton São Francisco – uma revisão. In: J.M.L. Dominguez, A. Misi eds. O Cráton do São Francisco, Salvador; SBG, p-45-62.
- Alkmim, F.F., Teixeira, W., 2016. The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: Heilbron, M., Cordani, U., Alkmim, F. (eds) São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews. Springer, Cham.
- 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.
- Augusto Filho, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p.721-733.
- 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. In *Ore Geology Reviews* (Vol. 32, Issues 3–4, pp. 471–499). Elsevier BV.
- Barbosa, M. S. C. & Oliveira, L. A. S., 2020. Geofísica do Quadrilátero Ferrífero. p.114-141. In: *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos /organizado por Paulo de Tarso Amorim Castro, Issamu Endo, Antonio Luciano Gandini.* — Belo Horizonte: 3i Editora. 480p.
- Barbosa, V. C. F. & Silva, J. B. C. 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial. *Rev. Bras. Geof.*, 23(3):243-250.
- Barella C.F., 2016. Abordagens Estatísticas Aplicadas ao Mapeamento de Susceptibilidade a Movimentos de Massa: Análise de Diferentes Técnicas no Contexto do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Mestrado. 276p.
- Bigarella, J. J. 2003. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. v.3. Florianópolis, UFSC, p. 1076-1080.
- Bortolozo, C. A. 2016. Inversão conjunta 1D e 2D de dados de Eletrorresistividade 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.
- Bortolozo, C. A., Porsani, J. L., Santos, F. A. M., 2010. Joint inversion of TEM data: preliminary results. AGU – American Geophysical Union – The meeting of the Americas, Foz do Iguassu, Brazil. Cdrom.
- Braga, A. C. O. 2006. Métodos da eletrorresistividade 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 Geoelétricos em Hidrogeologia. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p.
- Cabral, A. R., & Pires, F. R. M. (1995). Palladium-bearing gold deposit hosted by Proterozoic lake superior-type iron-formation at the Caue iron mine, Itabira District, southern Sao Francisco Craton, Brazil; geologic and structural controls; discussion. In *Economic Geology* (Vol. 90, Issue 8, pp. 2370–2371). Society of Economic Geologists.
- Carvalho E.T. 1982. Carta Geotécnica de Ouro Preto. MS Dissertation. – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 95 p.

Castro J.M.G., Sobreira F.G., Gomes R.C., Gomes G.J.C. 2012. Preposição de programa preventivo de riscos geológicos em Ouro Preto – BR com base em histórico de ocorrências e sua correlação com pluviosidade. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(I):58-66.

CODEMG, 2001. Levantamento Aerogeofísico 2001. Área02. Data set accessed 20 March 2022 at <http://www.codemig.com.br/atuacao/mineracao/levantamento-aerogeofisico/programa-2001>;

Cooper, G. R., & Cowan, D. R. (2008). Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics*, 73(3), H1-H4.

Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil (No. 641-A, pp. A1-A110). US Government Printing Office.

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. 2019. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, 480 p.

Freire, M. E. S. 1965. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. Rio de Janeiro.

Gandolfo, O. C. B. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, 2007.

Garcia A.J.V. & Uhlein A. 1987. Sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço na região de Diamantina (MG). In: Simpósio sobre Sistemas Depositionais no Pré-Cambriano. Ouro Preto, p. 113-135.

Goes H., Ribeiro R.S., Lana J.C., Montandon L., Menezes I., Lopes N., Araújo R.S. 2016. Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: Ouro Preto, MG.

Grant, F., & G. West, 1966, Interpretation theory in applied geophysics: McGrawHill.

Hudson, J.A. and Harrison, J.P. 1997. Engineering Rock Mechanics – An Introduction to the Principles, Pergamon Press.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de exploração. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho, São Paulo, Oficina de Texto, p.438;

Kliche, C.A. 1999. Rock Slope Stability; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME): Littleton, CO, USA.

Lana J.C., Jesus D., Antonelli T. 2021. Guia de procedimentos técnicos do Departamento de Gestão Territorial / Organizado por Julio Cesar Lana et al. [...]– Brasília : CPRM, recurso eletrônico: PDF. Conteúdo: v. 3 - Setorização de áreas de risco geológico (versão 1).

Lines, L. R., & Newrick, R. T. (2004). Fundamentals of Geophysical Interpretation. Society of Exploration Geophysicists.

Lobato L.M., Vieira F.W.R., Ribeiro-Rodrigues L.C., Pereira L.M.M., Menezes M.G., Junqueira P.A., Pereira S.L.N. 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero, Part I. Description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(3):339-354.

Loke, M. H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys.

Loke, M. H.; Barker, R. D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 499–523, 1996.

- Luiz J. G. & Silva L. M. C.. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém, Universidade Federal do Pará/CEJUP. 311p;
- Markland, J.T. 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected: Imperial College Rock Mechanics Research Reprints, n. 19.
- Marshak, S., & Alkmim, F. F. (1989). Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern SÃO Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. In *Tectonics* (Vol. 8, Issue 3, pp. 555–571). American Geophysical Union (AGU)
- Minty, B. R. S. 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*.
- Mussett A. E., Khan M.A.. 2001. Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics. Cambridge University Press.
- Moreira, H., Lana, C., & Nalini, H. A., Jr. (2016). The detrital zircon record of an Archaean convergent basin in the Southern São Francisco Craton, Brazil. In *Precambrian Research* (Vol. 275, pp. 84–99). Elsevier BV.
- O'Connell, M. D., Smith, R. S., & Vallee, M. A. (2005). Gridding aeromagnetic data using longitudinal and transverse horizontal gradients with the minimum curvature operator. In *The Leading Edge* (Vol. 24, Issue 2, pp. 142–145). Society of Exploration Geophysicists.
- Olayinka, A. I.; Yaramanci, U. Smooth and sharp-boundary inversion of two-dimensional pseudosection data in presence of a decrease in resistivity with depth. *European Journal of Environmental and Engineering geophysics*, v. 7, p.139–165, jun 2002.470p;
- Pinheiro A.L., Sobreira F.G., Lana M.S. 2004. Riscos geológicos na cidade histórica de Ouro Preto. In: *I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, Florianópolis*, p. 87-101.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55: 80–91
- Reid, A. B., Thurston, J. B.. 2014. The Structural Index in Gravity and Magnetic Interpretation Errors, Uses, and Abuses. *Geophysics*, 79, 61-66.
- Reis, L.A., Martins-Neto, M.A., Gomes, N.S., Endo, I., 2002. A bacia de antepaís paleoproterzóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, 32, 43–58.
- Rekapalli, R., Kumar, D., & Sarma, V. S. (2019). Resolution Enhancement for Geoelectrical Layer Interpretation of Electrical Resistivity Model from Composite Dataset: Implication from Physical Model Studies. In *Current Science* (Vol. 116, Issue 8, p. 1356). Current Science Association.
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W., & Machado, N. (1995). Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. in *Geonomos*. Geonomos.
- Roest, W. R, Verhoef, J. & Pilkington, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1):116-125.
- Sobreira, F. G., Fonseca, M. A. 2001a. Ação antrópica e processos em encostas em Ouro Preto, Brasil. In: *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia*, 11 p.
- Sobreira, F. G., Fonseca, M. A. 2001b. Impactos Físicos e Sociais de Antigas Atividades de Mineração em Ouro Preto, Brasil. *Revista Geotecnia*. n. 92, p.5-27.
- Souza J.R.G., 2019. Avaliação do comprimento de massa deslocada em deslizamentos em função das características geológico-geotécnicas e geométricas das encostas. Estudo de caso: Estrada de ferro Vitória-Minas (EFVM). Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto. 151 p.

Telford W. M., Geldart L.P., Sheriff R.E.. 1990. Applied Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press. 770p;

Terzaghi, K. Mechanism of landslides. 1950. In: PAIGE, S. (Ed.). Application of geology to engineering practice: Berkey volume. New York: Geological Society of America. p. 83-123.

Tominaga, L. K. 2009. Análise e mapeamento de risco. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org). Desastres Naturais: Conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico. p.147-160.

Turner, A. K.; Schuster, R. L.1996. Landslides-investigation and mitigation: special report 247. In: Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC: Academy Press, p. 525-554.

USGS, United States Geological Survey. 2016. Landslide Types and Processes. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/> . Acesso em 25/05/2022.

Van Westen CJ (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. PhD dissertation, Technical University Delft. ITC-publication number 15, ITC, p 245

Van Westen CJ, Rengers N, Soeters R. (2003) Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment

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.

Varnes, D. J. 1978. Slope movements: types and processes. In: Schuster, R. L. & Krizek, R. J. (eds.) Landslide analysis and control, National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, Washington. p.11-33.

Washburn, A. L. 1938. [Review of] Landslides and related phenomena, by Charles Farquharson Stewart Sharpe, 1938. In: American Journal of Science (Vols. s5-35, Issue 210, p. 455–457).

Xavier M.O., Barella C.F., Corteletti R.C., Ferreira S.P., Souza T.S.A., Tavares V.L.S. 2017. Banco de Dados de Movimentos Gravitacionais de Massa do Distrito Sede da Cidade Histórica de Ouro Preto (MG) para uso em Trabalhos Estatísticos de Mapeamento. In: VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 7 p.