



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA NA ÁREA URBANA DA ENCOSTA ORIENTAL DA SERRA
DE OURO PRETO – MG**

GABRIEL DO NASCIMENTO CARDOSO

MONOGRAFIA nº 508

Ouro Preto, fevereiro de 2024

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA NA ÁREA URBANA DA ENCOSTA ORIENTAL DA
SERRA DE OURO PRETO – MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitor de Graduação

Prof.^a Dr.^a Adilson Pereira dos Santos

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

Vice-Chefe

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves

MONOGRAFIA
Nº 508
CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA NA ÁREA URBANA DA ENCOSTA ORIENTAL DA
SERRA DE OURO PRETO – MG

GABRIEL DO NASCIMENTO CARDOSO

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Co-Orientadores

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão

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, ano 2024

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268c Cardoso, Gabriel do Nascimento.
Cartografia geotécnica na área urbana da encosta oriental da serra de
Ouro Preto - MG. [manuscrito] / Gabriel do Nascimento Cardoso. - 2024.
65 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.

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

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

1. Cartografia. 2. Engenharia geotécnica. 3. Geofísica. 4.
Geoprocessamento. 5. Precepção de riscos. I. Barbosa, Maria Sílvia
Carvalho. II. Leão, Lucas Pereira. III. Oliveira, Luis Artur Souza. IV. Silva,
Joney Justo da. V. Universidade Federal de Ouro Preto. VI. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel do Nascimento Cardoso

Cartografia Geotécnica na Área Urbana da Encosta Oriental da Serra de 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 29 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa - Orientadora (UFOP/Escola de Minas/Departamento de Geologia)
Dr. Claudio Eduardo Lana - (UFOP/Escola de Minas/Departamento de Geologia)
Eng. Geólogo Charles Romazâmu Murta (Defesa Civil - Prefeitura Municipal de Ouro Preto)

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 01/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Maria Sílvia Carvalho Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/03/2024, às 15:47, 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, informando o código verificador **0675737** e o código CRC **68035AE8**.

Agradecimentos

Durante a graduação fiz muitos amigos que irão se perpetuar, agradeço aos meus colegas de turma, que compartilharam comigo inúmeras experiências e conhecimentos, que caminharam comigo desde o início e sempre se mostraram presentes.

Agradeço também ao corpo docente do DEGEO, em especial a meus orientadores, que me guiaram com maestria para a realização deste trabalho. agradeço às entidades que me abriram diversas portas e permitiram experiências engrandecedoras, a SGA, que é o motivo do meu interesse por geofísica, obrigado a todos os membros que estiveram comigo nos vários trabalhos de campo e oportunidades de aprendizado.

Por fim, agradeço a República Área 51, que foi uma peça importantíssima para a construção do meu caráter.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
SUMÁRIO	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 METODOLOGIA	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	5
2.1 GEOLOGIA REGIONAL	5
2.1.1 LITOESTRATIGRAFIA REGIONAL.....	5
2.1.2 CONTEXTO ESTRUTURAL REGIONAL.....	10
2.2 GEOLOGIA LOCAL	10
2.2.1 LITOESTRATIGRAFIA LOCAL	10
2.2.2 CONTEXTO ESTRUTURAL LOCAL.....	13
3 FOTOGRAMETRIA	15
3.1 INTRODUÇÃO.....	15
3.2 AEROFOTOGRAMETRIA	15
4 CONTEXTO GEOTÉCNICO	19
4.1 SUSCETIBILIDADE E RISCO GEOLÓGICO	19
4.2 MOVIMENTOS DE MASSA.....	20
4.2.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	20
4.2.2 FATORES CONDICIONANTES.....	22
4.3 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA	24
4.4 CONTEXTO GEOTÉCNICO LOCAL.....	26
5 MÉTODOS GEOFÍSICOS	29
5.1 GAMAESPECTROMETRIA	29
5.2 GRAVIMETRIA	31
5.3 MAGNETOMETRIA.....	33

5.4 ELETORRESISTIVIDADE.....	36
6 HISTÓRIA DA ARTE	39
7 INTEGRAÇÃO DOS DADOS	49
8 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA	55
9 CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Posicionamento do Quadrilátero Ferrífero no Cráton do São Francisco.....	1
Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	6
Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.	9
Figura 2.3 - Mapa esquemático de articulação do sistema de <i>nappes</i> do Quadrilátero Ferrífero e as principais falhas/zonas de cisalhamento. <i>Nappes</i> : NC- <i>Nappe</i> Curral, NM- <i>Nappe</i> Maquiné, NSR- <i>Nappe</i> Santa Rita, NIRP- <i>Nappe</i> Itabira-Rio Piracicaba, NOP- <i>Nappe</i> Ouro Preto	10
Figura 2.4 - Mapa geológico da área de estudo.....	12
Figura 3.1 - Parâmetros e definições para voo com drone em uma determinada área a partir do <i>software</i> Map Pilot. Na parte superior da imagem é possível ver os critérios utilizados para a atividade, o círculo representa a malha de voo	16
Figura 3.2 - Representação esquemática dos modelos digitais de superfície e terreno.....	17
Figura 3.3 - Comparação entre as imagens sem correção (A) e corrigida (B)..	18
Figura 4.1 - Representação gráfica dos tipos de movimento de massa, com foco naqueles que aparecem na área de estudo.	22
Figura 4.2 - Tipos, níveis e escalas aplicáveis na elaboração de mapas de setorização de risco onde, X = aplicável; (X) = pode ser aplicável; NR = não recomendado; NUC = não utilizado comumente..	25
Figura 4.3 - Metodologia para elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco.	26
Figura 4.4 - Setorização de risco na área de estudo	27
Figura 5.1 - Diagrama ternário mostrando a composição de diferentes tipos de rocha em relação aos elementos radioativos de interesse.	30
Figura 5.2 - Intervalo de valores de densidade em diferentes rochas.....	32
Figura 5.3 - Esquema mostrando a variação das linhas de fluxo do campo magnético terrestre.	34
Figura 5.4 - Valores aproximados de resistividade para diferentes tipos de rocha.	37

Figura 5.5 - Esquema mostrando o espalhamento radial da corrente elétrica no solo.....	38
Figura 6.1 - Modelo digital de terreno.....	40
Figura 6.2 - Mapa de declividade.....	40
Figura 6.3 - Mapa <i>aspect</i>	41
Figura 6.4 - Ortofoto obtida a partir dos voos de drone.....	41
Figura 6.5 - Modelo digital de elevação.....	42
Figura 6.6 - Produtos do processamento dos dados de gamaespectrometria.....	42
Figura 6.7 - Mapas magnetométricos . CA: Campo anômalo. ASA: Amplitude do Sinal Analítico. Primeira Derivada Horizontal EW (dX) e NS (dY), respectivamente. Primeira Derivada Vertical (dZ). Segunda Derivada Vertical (d ² Z).	43
Figura 6.8 - Mapa gravimétrico detalhado. Em laranja, as linhas de levantamento terrestre. 44	
Figura 6.9 - Perfis detalhados de magnetometria. Em vermelho, as linhas de levantamento terrestre.....	44
Figura 6.10 - Perfis de levantamento de eletrorresistividade	45
Figura 6.11 - Perfil de eletrorresistividade 1.	45
Figura 6.12 - Perfil de eletrorresistividade 2.	46
Figura 6.13 - Perfil de eletrorresistividade 3	46
Figura 6.14 - Perfil de eletrorresistividade 4.	47
Figura 7.1 - Mapa radiométrico integrado ao mapa litológico de Oliveira (2023.....	49
Figura 7.2 - Mapa magnetométrico integrado ao mapa geológico de Oliveira (2023).....	50
Figura 7.3 - Produto da deconvolução de Euler, mostrando estruturas profundas mergulhando para W e E, principalmente. (A) Localização estimada das fontes de anomalia magnética e (B) suas profundidades médias.....	51
Figura 7.4 - Resultado da Decovolução de Euler nas linhas ao norte da área, apresentadas na Figura 6.9.....	52
Figura 7.5 - Comparação dos dados de gravimetria (A) e eletrorresistividade (B) no perfil 1.	53

Figura 8.1 - Mapa de pontos classificados de acordo com o tipo de movimento de massa.	55
Figura 8.2 - Mapa de pontos visitados em campo, com exemplos de acidentes geotécnicos.	56
Figura 8.3 - Ocorrência de queda de blocos em meio a área de rastejo no bairro Taquaral. ..	56
Figura 8.4 - (A) Substrato relacionado ao rastejo no Bairro Taquaral e (B) o contato com o quartzito da Formação Moeda.	57
Figura 8.5 - (A) Área original de rastejo no Taquaral e (B) área de expansão sugerida.	57
Figura 8.6 - Blocos soltos observados em algumas partes da área.....	58
Figura 8.7 - Exemplos de deslizamentos observados.	59
Figura 8.8 - Mapa de setorização de risco, com as áreas atualizadas.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Classificação de movimentos de massa	21
Quadro 4.2 - Síntese dos fatores condicionantes dos movimentos de massa.....	23
Quadro 5.1 - Relação de minerais que possuem os elementos radioativos de interesse em sua composição.....	29
Quadro 5.2 - Diferentes produtos do processamento da radiometria.....	30
Quadro 5.3 - Relação entre os diferentes produtos e suas respectivas utilizações.....	31
Quadro 5.4 - Relação entre os cálculos das correções e suas respectivas finalidades.	33
Quadro 5.5 - Relação das correções de dados com suas respectivas finalidades.....	35
Quadro 5.6 - Principais filtros aplicados em dados magnetométricos.....	36

Resumo

Ouro Preto, situada em Minas Gerais, encontra-se em um terreno morfológicamente acidentado devido à complexidade litológica e estrutural. O Ciclo do Ouro (século XVIII) resultou na concentração de residências em áreas de alto risco geotécnico. Movimentos de massa catastróficos com perda de bens e vidas ocorrem principalmente durante períodos chuvosos. Este trabalho visa identificar áreas de risco, integrando dados geológicos, aerofotogramétricos, geotécnicos e geofísicos na região com maior incidência de acidentes. O trabalho teve início com a revisão bibliográfica de dados geológicos (Endo *et al.* 2019a e b, 2020), geofísicos (CODEMIG) e geotécnicos (CPRM) da área em estudo. O reconhecimento da superfície na região foi realizado por meio de aerofotogrametria com drones, e os modelos digitais de elevação (MDE) e de terreno (MDT) foram obtidos, além do ortofotomosaico. A análise dos dados geofísicos obtidos por meio de levantamentos aéreos auxiliou no mapeamento geológico da região, na caracterização e visualização das estruturas em profundidade e áreas críticas. Posteriormente, campanhas em terra foram realizadas para registrar os pontos com problemas geotécnicos, com o auxílio de dados disponíveis de magnetometria, radiometria, gravimetria e eletrorresistividade terrestres, utilizados para oferecer fundamentos para uma caracterização e setorização mais detalhadas, permitindo uma ocupação segura e podendo auxiliar nas decisões governamentais, prevenindo assim novos acidentes. A integração dos dados permitiu definir as áreas com maior risco geotécnico, entendendo também a relação das estruturas em subsuperfície.

Palavras-chave: Risco geotécnico, cartografia geotécnica, geofísica.

Abstract

Ouro Preto, located in Minas Gerais, is situated on morphologically rugged terrain due to lithological and structural complexity. The Gold Cycle (18th century) resulted in the concentration of residences in areas of high geotechnical risk. Catastrophic mass movements with the loss of property and lives occurred mainly during rainy periods. This study aims to identify risk areas by integrating geological, aerial photogrammetric, geotechnical, and geophysical data in the region with a higher incidence of accidents. The work began with a literature review of geological (Endo *et al.* 2019a and b, 2020), geophysical (CODEMIG), and geotechnical (CPRM) data for the study area. Surface reconnaissance in the region was conducted through drone-based aerial photogrammetry, and digital elevation models (DEM) and terrain models (DTM) were obtained, along with the orthophotomosaic. Analysis of geophysical data obtained through aerial surveys assisted in geological mapping of the region, characterizing and visualizing structures in depth and critical areas. Subsequently, ground campaigns were carried out to record points with geotechnical issues, aided by available data from terrestrial magnetometry, radiometry, gravimetry, and resistivity, used to provide foundations for more detailed characterization and zoning, allowing for safe occupation and potentially aiding governmental decisions to prevent new accidents. The integration of data helped define areas with higher geotechnical risk, also understanding the relationship of subsurface structures.

Key words: Geotechnical risk, geotechnical cartography, geophysics.

1.1 APRESENTAÇÃO

A cidade de Ouro Preto, está em uma área de terreno morfologicamente acidentado devido à complexidade litológica e estrutural. Localizada no setor centro sul do Quadrilátero Ferrífero, área que, em termos geotectônicos, situa-se no extremo sul do Cráton São Francisco (Almeida 1977; Figura 1.1), unidade geotectônica consolidada ao final do Ciclo Transamazônico e que permaneceu relativamente preservada das remobilizações orogênicas neoproterozoicas (faixas brasileiras).

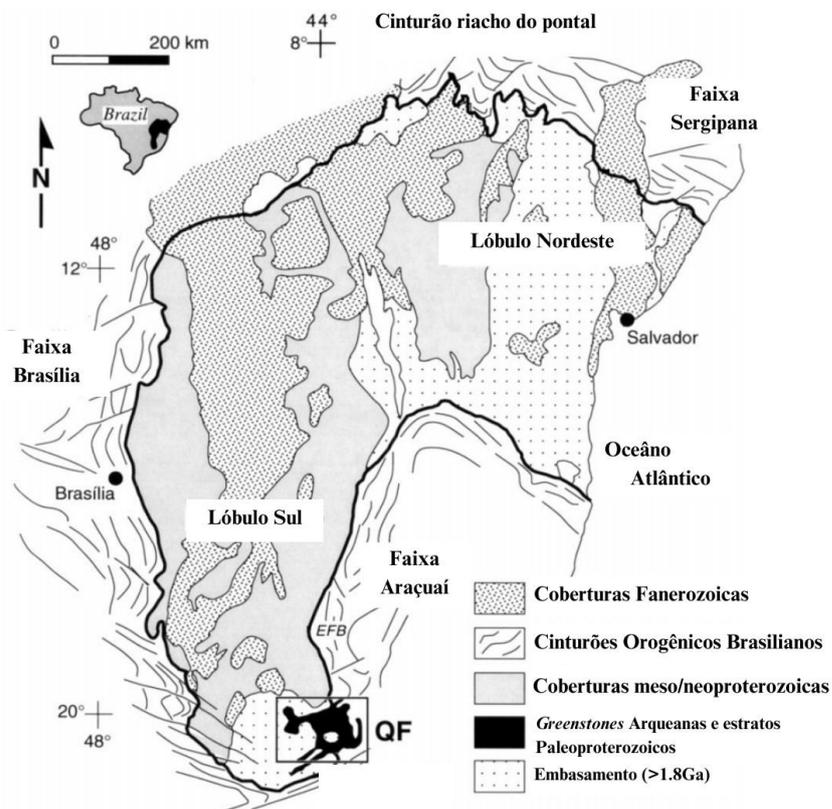


Figura 1.1 - Posicionamento do Quadrilátero Ferrífero no Cráton do São Francisco (mod. de Alkmim & Marshak 1998).

O Ciclo do Ouro (século XVIII) contribuiu significativamente para o avanço de fenômenos geológicos superficiais (Sobreira 2014). Além disso, causou uma urbanização extremamente acelerada e com planejamento inadequado, gerando uma grande concentração de residências em locais de alto risco geotécnico (Pinheiro *et al.* 2004). Movimentos de massa catastróficos, com perda de bens e vidas, ocorrem principalmente em períodos chuvosos.

A área de estudo abrange cinco bairros da cidade, o bairro Taquaral que é suscetível a rastejo, a região do Morro da Queimada, Morro Santana e Piedade que é passível a escorregamento planar e queda de blocos, além do Alto da Cruz que está sujeito a escorregamento planar (Goes *et al.* 2016). Esses bairros foram setorizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) como áreas de risco alto e muito alto (Goes *et al.* 2016).

1.2 LOCALIZAÇÃO

O município de Ouro Preto está localizado a 100 km de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais e pode ser acessada através da BR-356. A área de estudo (Figura 1.1) está localizada na porção leste da cidade, e pode ser acessada, a partir da Praça Tiradentes no centro da cidade, seguindo a Rua Barão de Camargos e em seguida para a Rua conselheiro Quintiliano.

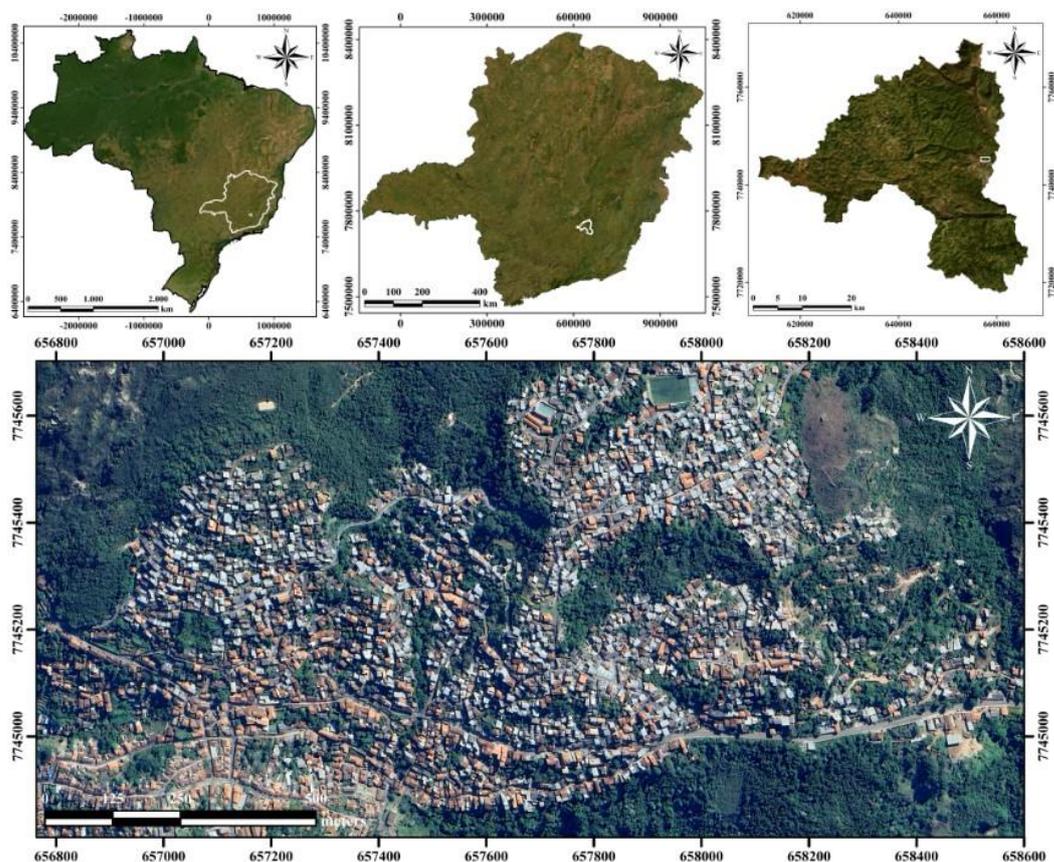


Figura 1.2 – Área de estudo localizada no território da cidade de Ouro Preto (Barbosa & Oliveira 2023)

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral identificar áreas de risco e realizar a cartografia geotécnica da área de estudo, integrando dados geológicos, aerofotogramétricos, geotécnicos e geofísicos na região, a fim de compreender a configuração geológica e geotécnica da área, para refinar a setorização de risco

existente (Goes *et al.* 2016) e fornecer bases para uma ocupação não errática, auxiliando a tomada de decisão do governo, prevenindo assim novos acidentes.

1.4 JUSTIFICATIVA

O município de Ouro Preto enfrenta historicamente problemas com movimentos de massa, desde o século XVIII, com a busca pelo ouro, e novamente em meados do século XX, com a corrida pelo alumínio, a cidade passou por grandes expansões populacionais, sem um planejamento urbano adequado, onde a população se instalou em áreas com características geológico-geotécnicas impróprias (Sobreira & Fonseca 2001a). A região é caracterizada por sua topografia íngreme, litologia particular e estruturas geológicas, que desempenham um papel decisivo na ocorrência de acidentes geotécnicos.

Nesse sentido, foi selecionada junto a Defesa Civil de Ouro Preto uma área de trabalho com potencial risco geotécnico, para entender os movimentos de massa presentes na região e refinar a setorização preexistente. A área selecionada foi baseada no 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), onde foi estimada uma população de 850 pessoas com certo grau de risco a serem atingidas por movimentos de massa, em uma região com 70% da área total classificada com alto grau de risco.

O presente trabalho, com o auxílio de dados geofísicos para entender também as estruturas subsuperficiais, visou refinar a setorização de risco consolidada em estudos anteriores. Assim podendo auxiliar no planejamento urbano e nas tomadas de decisões por parte dos órgãos competentes.

1.5 METODOLOGIA

O presente estudo se fundamenta em uma análise abrangente de diversos conjuntos de dados regionais, buscando uma compreensão aprofundada da área em estudo. Para isso, foram consideradas informações litológicas e estruturais (Endo *et al.* 2019), para entender a configuração geológica da região. Além disso, a investigação se apoiou em dados geofísicos provenientes de levantamentos aéreos de magnetometria e gamaespectrometria conduzidos pela CODEMIG (2001), especialmente na Área 2 (Pitangui-São João Del Rei-Ipatinga-SEME 2001a). Para aprofundar a análise, foram considerados dados de geotecnia oriundos da Carta Geotécnica de Ouro Preto (Carvalho, 1982), juntamente com informações de levantamentos conduzidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e a Defesa Civil de Ouro Preto (Goes *et al.* 2016).

Posteriormente, a análise parte para uma escala local, utilizando voos de drone para obter modelos digitais de elevação (MDE) e de terreno (MDT) e, combinados com os dados locais de magnetometria, gravimetria, eletrorresistividade (Barbosa & Oliveira 2023) e um mapeamento geológico mais detalhado, em escala 1:10.000 (Oliveira 2023), identificar áreas críticas.

Por fim, os trabalhos de campo foram planejados a partir da interpretação dos dados integrados e áreas críticas selecionadas, levando em conta também, a setorização preexistente na área. Os trabalhos foram realizados a fim de caracterizar a área no âmbito dos movimentos de massa e, após a caracterização, novos polígonos foram definidos utilizando o *software* ArcMap 10.8, para fazer uma setorização detalhada da região.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO

Este capítulo consta um panorama regional e local da geologia da área de estudo, discute-se as principais unidades geológicas e sua distribuição temporal bem como o contexto estrutural dos mesmos.

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida no sudeste do Quadrilátero Ferrífero, uma região delimitada por feições geomorfológicas resultantes de eventos tectônicos e de erosão diferencial (Lana 2020). Em termos geotectônicos, situa-se no extremo sul do Cráton São Francisco (Almeida 1977), unidade geotectônica consolidada ao final do Ciclo Transamazônico e que permaneceu relativamente preservada das remobilizações orogênicas neoproterozoicas (faixas brasileiras).

2.1.1 LITOESTRATIGRAFIA REGIONAL

O Quadrilátero Ferrífero abriga unidades do arqueano (complexos metamórficos do embasamento e Supergrupo Rio das Velhas), paleoproterozoico (Supergrupos Minas e Estrada Real), mesoproterozoico (Supergrupo Espinhaço) e coberturas sedimentares do cenozoico (Figura 2.1), distribuídas em uma área de aproximadamente 15.000 quilômetros quadrados (Figura 2.2).

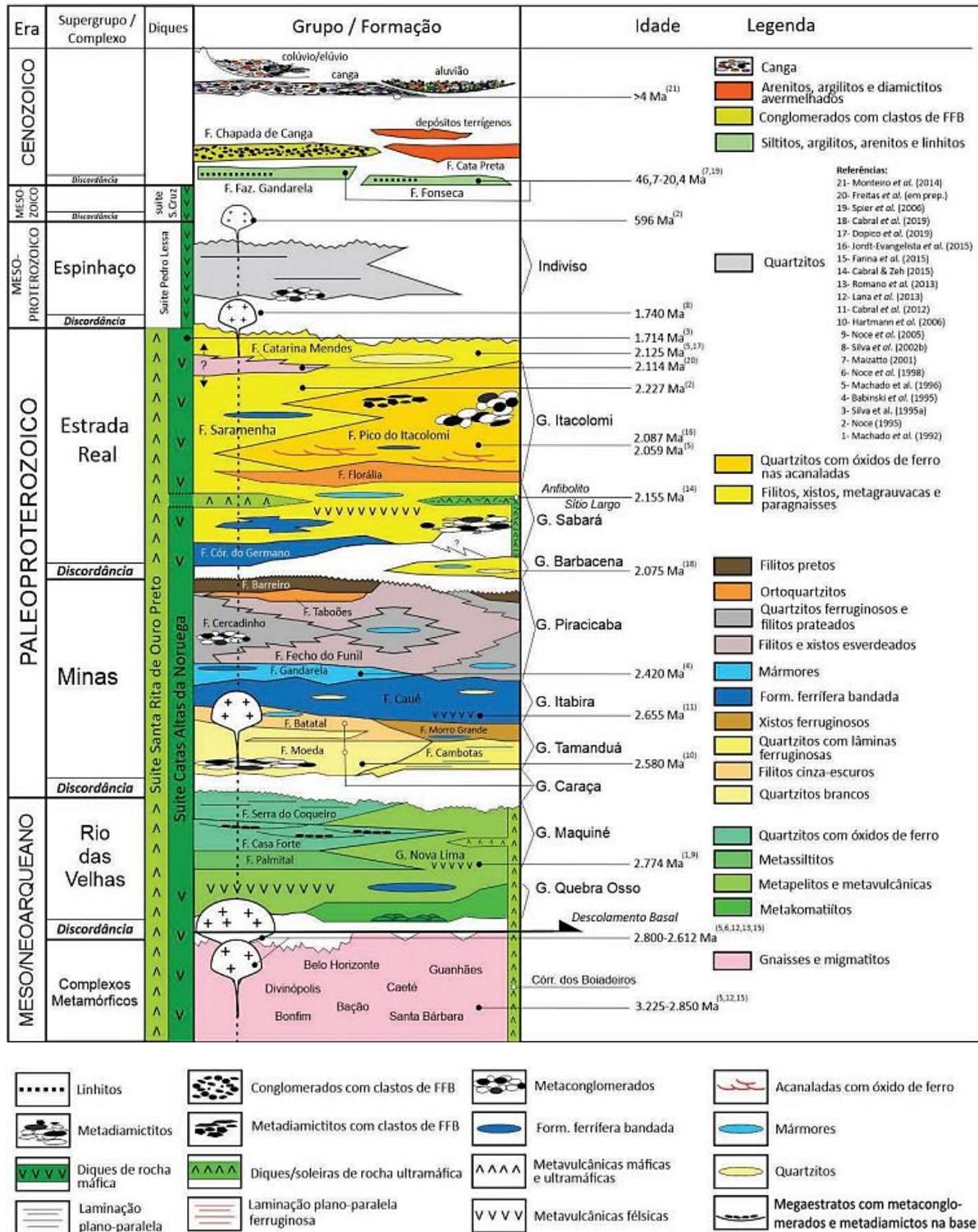


Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019b).

Unidades Arqueanas

O arqueano é representado pelos complexos metamórficos do embasamento compostos por granitos, migmatitos, anfíbolitos localizados, intrusões granitoides, diques máficos e gnaisses do tipo TTG (tonalito-trondhjemito-granodiorito), resultantes de quatro diferentes eventos tectono-magmáticos (Farina *et al.* 2015). Em geral, os gnaisses aparecem dobrados, com a xistosidade alinhando-se ao bandamento gnáissico nas bandas melanocráticas, cuja composição é as vezes anfibolítica. Os migmatitos aparecem especialmente em zonas de charneira antiformais de dobras regionais (Endo *et al.* 2019b). Tais complexos metamórficos são resultado de quatro diferentes eventos tectono-magmáticos: Santa Bárbara, Rio das Velhas (I e II) e Mamona (Lana *et al.* 2013, Romano *et al.* 2013, Farina *et al.* 2015).

Ademais, o arcabouço arqueano é composto também pelo Supergrupo Rio das Velhas, uma sequência típica de rochas do tipo *Greenstone belt*, dividido da base para o topo em: Grupo Quebra Osso, constituído pela associação de rochas metavulcânicas máfica-ultramáficas e félsicas (Schorscher 1979); Grupo Nova Lima, composto pelas associações metavulcanossedimentar química, metavulcanoclásticas, metassedimentar clástica marinha e o Grupo Maquiné, representado pela associação metassedimentar não-marinha (Endo *et al.* 2019a,b).

Unidades Paleoproterozoicas

Disposto em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas, as sequências metassedimentares do Supergrupo Minas são representadas pelos seguintes grupos:

Caraça, composto por quartzitos e metaconglomerados e filitos; O Grupo Caraça consiste de quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados da Formação Moeda (Dorr 1969) e pela Formação Batatal (Dorr 1969), constituída de filitos e, subordinadamente, por formações ferríferas bandadas, *metacherts*, filitos grafitosos e mármore dolomíticos.

Tamanduá, composto por quartzitos, ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos da Formação Cambotas e de xistos filíticos e quartzosos, xistos ferruginosos e formação ferrífera dolomítica da Formação Morro Grande (Endo *et al.* 2019b)

Itabira, que compreende rochas químicas em duas formações: Cauê e Gandarela, as quais apresentam contato gradacional entre si (Dorr 1969). A Formação Cauê é composta por Itabiritos e Itabiritos e, a Formação Gandarela, por mármore dolomíticos. Os Itabiritos da Formação Cauê são produtos de metamorfismo em formações ferríferas bandadas.

Por fim, Piracicaba, representado por quartzitos ferruginosos (Formação Cercadinho), filitos e filitos dolomíticos (Formação Fecho do Funil), quartzitos finos (Formações Taboões) e filitos grafitosos

(Formação Barreiro; Renger *et al.* 1994), composto por quartzitos ferruginosos, filitos prateados, filitos e xistos esverdeados, ortoquartzitos e filitos pretos.

Após uma nova discordância, sobre o Supergrupo Minas, encontra-se o Supergrupo Estrada Real, representado pelos grupos Barbacena, composto grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfibolito e metaultramáficas. Tais unidades são correlatas ao Grupo Sabará, composto da base para o topo por formação ferrífera bandada do tipo granular e quartzitos ferruginosos (Formação Córrego do Germano) (Gair 1958), clorita xistos, mica xistos com intercalações de metagrauvas, quartzitos e formação ferrífera bandada (Formação Saramenha; Almeida *et al.* 2005) e por biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos (Formação Catarina Mendes) que afloram no núcleo da Anticlinal de Mariana (Freitas *et al.* 2019).

Por fim, o Grupo Itacolomi, composto por ortoquartzitos (Formação Florália) quartzitos com estratificação cruzada acanalada, marcada por trilhas de óxido de ferro, metaconglomerados com veios de quartzo (Dorr 1969, Noce 1995).

Unidades Mesoproterozoicas

O mesoproterozoico é representado por uma unidade indivisa do Supergrupo Espinhaço, composta por metarenitos e metaconglomerados, que afloram na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero.

Unidades Cenozoicas

As coberturas cenozoicas ocorrem de certa forma restritas na área do QFe, sendo aluviões, colúvios, canga e laterita (Varajão 1988), compostas por argilitos, siltitos, arenitos, linhitos e conglomerados de origem flúvio-lacustre.

As cangas ocorrem em diferentes teores de ferro, sendo de origem química ou detrítica. Os aluviões ocorrem restritos a lugares onde o gradiente de fluxo dos canais se torna baixos, depositando areia e cascalho nos leitos ativos e terraços antigos (Endo *et al.* 2020). Os depósitos elúvio-coluvionares, ocorrem em várias localidades, principalmente em topografias elevadas, onde unidades quartzíticas e ferríferas permitem a formação de vários depósitos de tálus.

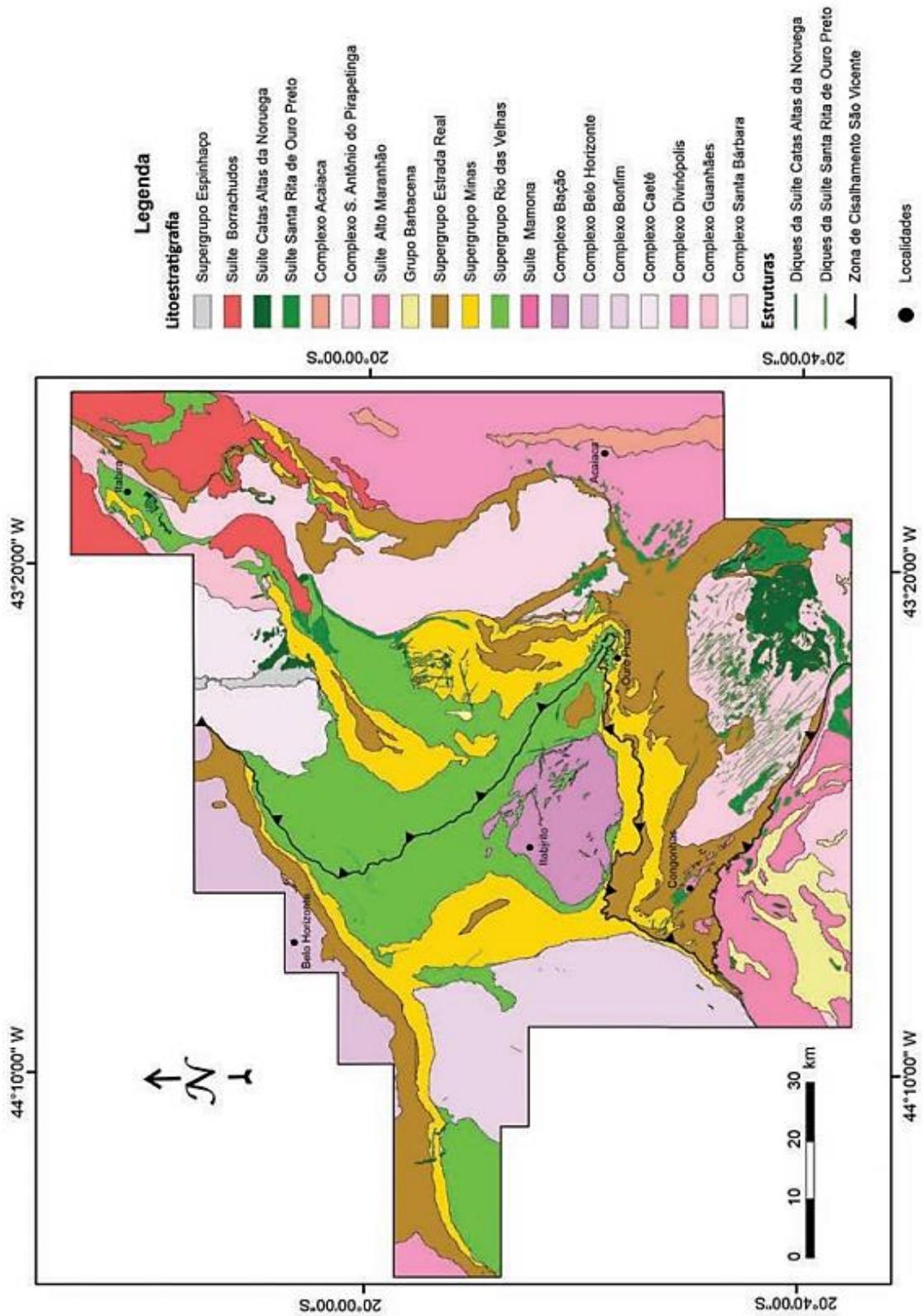


Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.*)

2.1.2 CONTEXTO ESTRUTURAL REGIONAL

A configuração estrutural do Quadrilátero Ferrífero (QFe) é marcada por diversas gerações e estilos de dobras, relacionadas a diferentes fases e eventos tectônicos que ocorreram na região (Almeida *et al.* 2002). As dobras em escala regional (Figura 2.3) incluem a *Nappe* Curral, que apresenta vergência em direção a N-NE, e o Sistema de *Nappes* Ouro Preto, que apresenta vergência para S-SW. Também existem dobras de terceira geração resultantes de amplificação ou redobramento.

A *Nappe* Curral é caracterizada como uma megadobra alóctone que domina o arcabouço estrutural da porção ocidental do QFe (Endo *et al.* 2005). O Sistema de *Nappes* Ouro Preto foi formado por um redobramento coaxial durante o evento Transamazônico, resultando em uma xistosidade plano-axial S2 oblíqua ao acamamento (Almeida 2004).

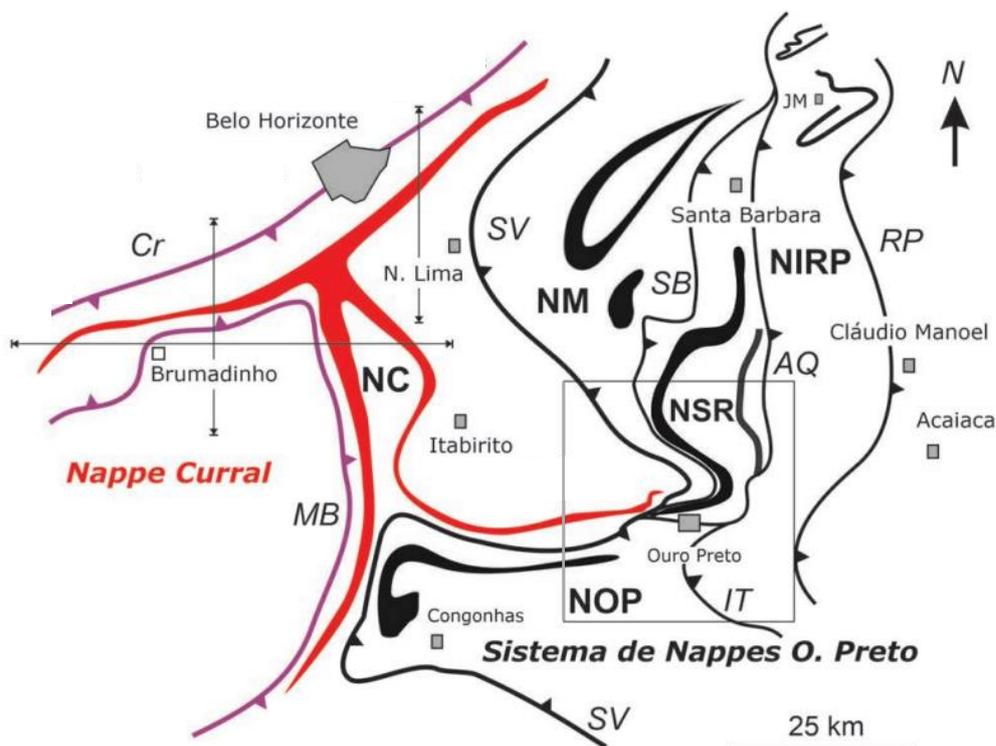


Figura 2.3 - Mapa esquemático de articulação do sistema de *nappes* do Quadrilátero Ferrífero e as principais falhas/zonas de cisalhamento. *Nappes*: NC- *Nappe* Curral, NM- *Nappe* Maquiné, NSR- *Nappe* Santa Rita, NIRP- *Nappe* Itabira-Rio Piracicaba, NOP- *Nappe* Ouro Preto (Endo *et al.* 2020).

2.2 GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo engloba unidades do Supergrupo Minas, no domínio da Falha de São Bento.

2.2.1 LITOESTRATIGRAFIA LOCAL

A área de estudo, conforme representado no mapa geológico da Figura 2.4, abrange rochas dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas. Na região, há a ocorrência de xistos altamente alterados do

Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas), caracterizados por biotita-mica xisto e quartzo-mica-clorita xisto.

Os Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba (Supergrupo Minas) também afloram na área de estudo. O Grupo Caraça é representado pela Formação Moeda, onde há presença de quartzitos sericíticos de granulação fina a média, intercalados com lentes de filito cinzento. O Grupo Itabira é caracterizado pela Formação Cauê, composta por itabiritos laminados com bandas de quartzo e hematita de espessura variada, e pela Formação Gandarela, constituída por mármore dolomíticos. A Formação Cercadinho, que faz parte do Grupo Piracicaba, é composta por quartzitos ferruginosos e filitos prateados.

As coberturas cenozoicas presentes na área são resultado da alteração dos itabiritos da Formação Cauê, formando cangas com capeamentos limoníticos, que se desenvolvem *in situ*. Na região é possível observar diferentes níveis de evolução das cangas, aparecendo, em alguns locais, as laminações dos itabiritos ainda preservadas.

Os altos topográficos da área são sustentados pelos itabiritos da Formação Cauê e quartzitos da Formação Moeda.

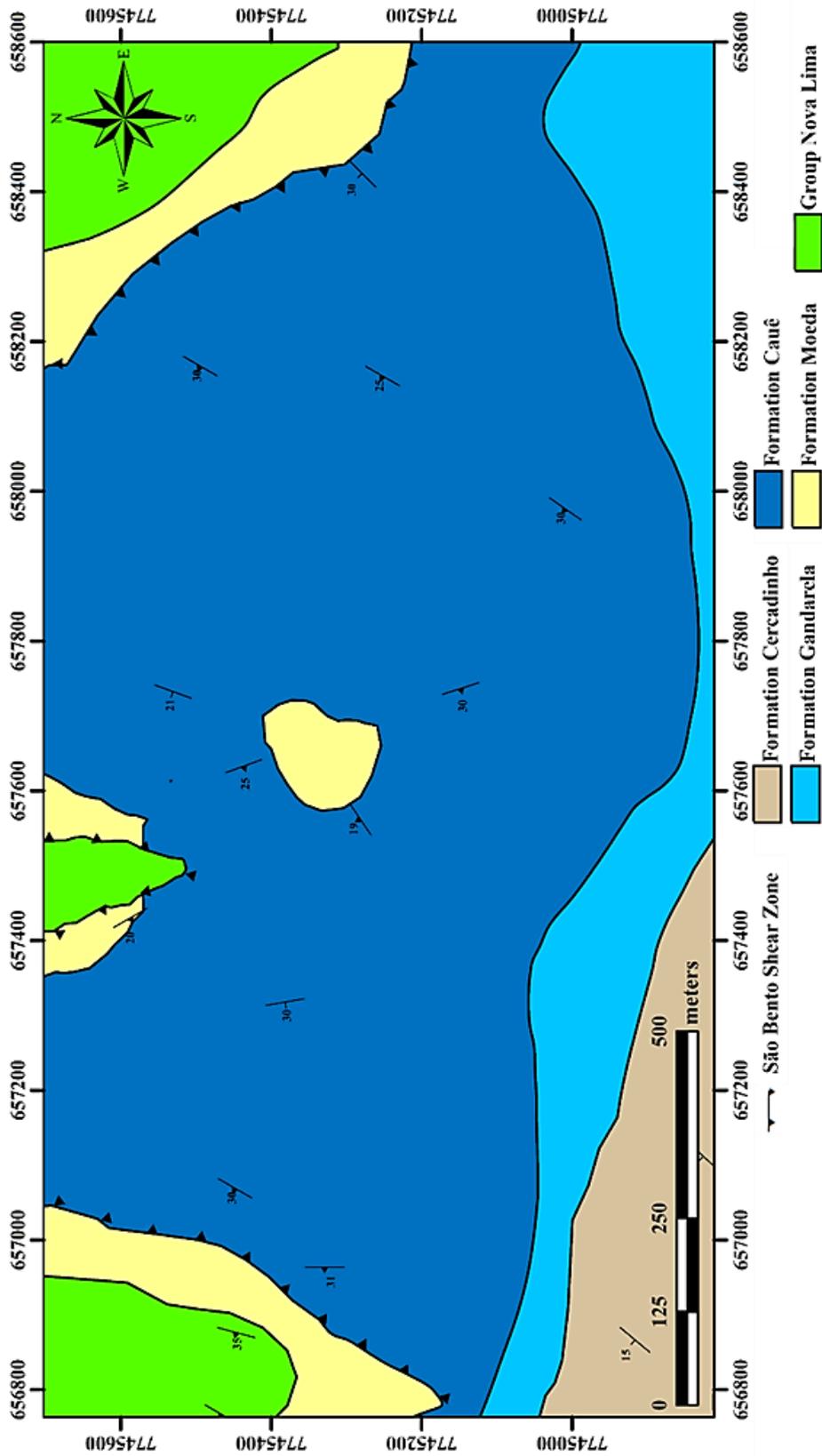


Figura 2.4 - Mapa geológico da área de estudo (Barbosa & Oliveira 2023).

2.2.2 CONTEXTO ESTRUTURAL LOCAL

O Sistema de *Nappes* Ouro Preto representa um segmento crustal alóctone sobre a *Nappe* Curral, vergente para SSW, no qual se articulam quatro *nappes*: *Nappe* Maquiné, inferior; *Nappe* Santa Rita; *Nappe* Ouro Preto e *Nappe* Itabira-Rio Piracicaba, superior (Endo *et al.* 2019a,b). As estruturas geológicas identificadas na área são falhas de empurrão associadas à Falha São Bento, as quais delimitam o contato entre as litologias dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas (Dorr 1969).

A Falha São Bento é a estrutura que delimita as *Nappes* Maquiné e Santa Rita, presentes no sistema de *Nappes* Ouro Preto, com cinemática de topo dirigida para SSW. 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 da porção norte do município de Santa Bárbara até se encontrar com a zona de cisalhamento São Vicente, estrutura que representa o descolamento basal do sistema de *Nappes* Ouro Preto (Endo *et al.* 2019a,b).

3.1 INTRODUÇÃO

Wolf *et al.* (2014) definem fotogrametria como “a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente por meio de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos registrados”.

A Fotogrametria teve suas origens em trabalhos topográficos na França durante o século XIX. A primeira publicação dedicada exclusivamente a essa técnica foi encontrada no Manual de Fotogrametria escrito por C. Koppe (Sant'Ana 2021).

Diversas disciplinas na engenharia e nas geociências têm abraçado a Fotogrametria como uma ferramenta valiosa. Um exemplo notável é o campo do mapeamento geológico, onde imagens aéreas fornecem informações cruciais sobre a geomorfologia e os lineamentos de uma área específica (Lisle *et al.* 2014).

A Fotogrametria abrange três principais categorias: Fotogrametria Terrestre, Aerofotogrametria e Fotogrametria Espacial, conforme delineado por Tomaselli (2009). A Fotogrametria Terrestre envolve a criação de modelos de objetos por meio de fotografias obtidas a partir de posições fixas no terreno. Por outro lado, a Aerofotogrametria é realizada utilizando aviões ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) equipados com sistemas de georreferenciamento (Tomaselli 2009).

Por fim, a Fotogrametria Espacial emprega fotografias provenientes de satélites. Esses satélites têm a capacidade de capturar imagens georreferenciadas de vastas áreas, com resolução considerável, o que é uma característica notável dessa abordagem (Tomaselli 2009).

3.2 AEROFOTOGRAMETRIA

Aerofotogrametria é uma técnica amplamente utilizada na aquisição de informações geoespaciais a partir de fotografias aéreas de alta definição e precisão. A técnica envolve o uso de câmeras aéreas para capturar imagens do terreno a partir de uma perspectiva elevada. Essas fotografias são tiradas a partir de aeronaves e drones, garantindo uma ampla cobertura do território (Tomaselli 2009).

Para garantir produtos de alta qualidade e com resolução elevada por meio de levantamentos de aerofotogrametria, é crucial que esses levantamentos estejam vinculados a parâmetros específicos (Figura 3.1). Isso inclui o planejamento detalhado da malha de voo e a trajetória precisa da aeronave para minimizar potenciais erros. Fatores como controle de velocidade e altitude de voo, taxa de captura de fotos por segundo e ângulo da câmera também desempenham um papel fundamental na determinação da qualidade dos produtos resultantes do levantamento (Gamarra 2020). A etapa de preparação antes do campo envolve a configuração desses parâmetros por meio de softwares dedicados, que auxiliam no planejamento eficaz da atividade.

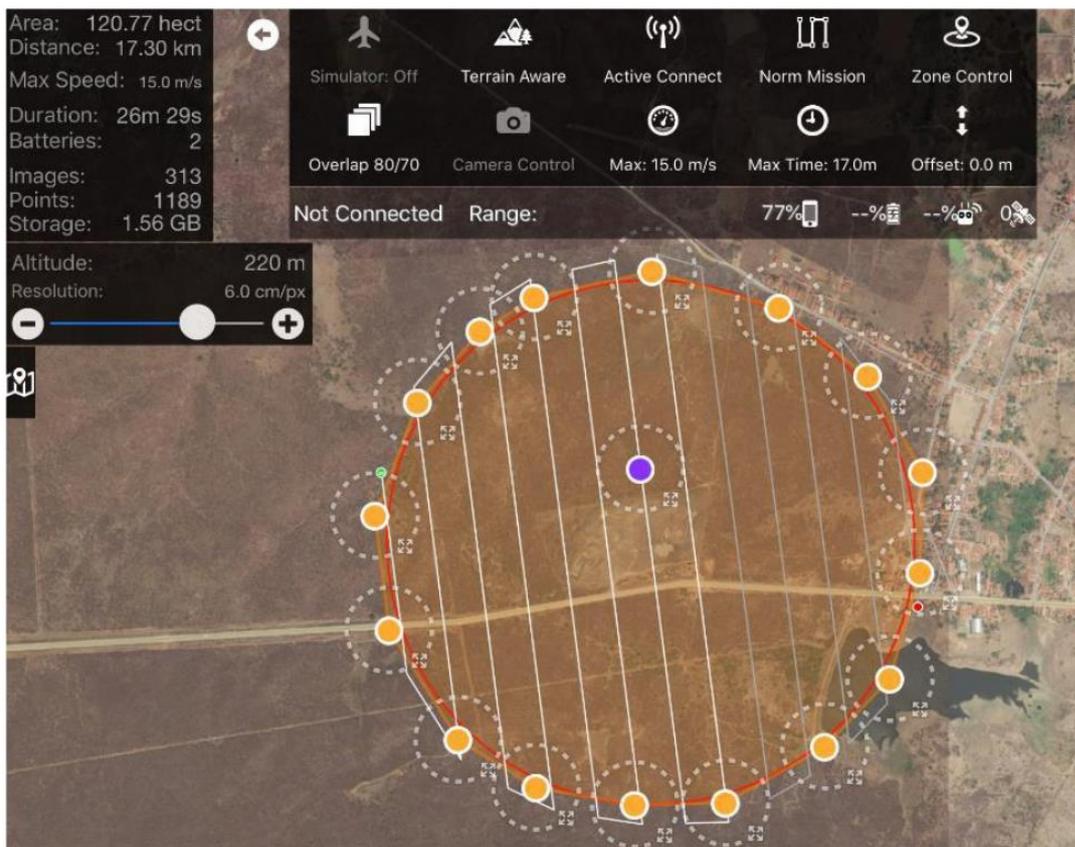


Figura 3.1 - Parâmetros e definições para voo com drone em uma determinada área a partir do software Map Pilot. Na parte superior da imagem é possível ver os critérios utilizados para a atividade, o círculo representa a malha de voo (modificado de Rodrigues & Gallardo 2018).

Ao realizar levantamentos com drones em áreas extensas, é essencial que o operador tenha um número adequado de baterias para garantir a conclusão da atividade, já que a duração da maioria das baterias é limitada a algumas horas. Portanto, é necessário monitorar constantemente a carga das baterias durante o voo, utilizando dispositivos como computadores e smartphones. Quando a carga da bateria estiver se esgotando, a troca da bateria deve ser realizada em pontos pré-determinados de aterrissagem e decolagem (Gamarra 2020). Essas considerações são essenciais para garantir a eficiência e a precisão dos levantamentos aerofotogramétricos, especialmente em áreas extensas.

Uma das principais áreas em que a aerofotogrametria é utilizada, assim como neste trabalho, é a cartografia. A partir das fotografias aéreas, é possível criar modelos digitais (Figura 3.2) tridimensionais que representam a superfície topográfica (MDT – modelo digital de terreno) e também os elementos acima dela, como prédios, vegetação e rodovias (MDS – modelo digital de superfície; Oliveira & Tommaselli 2014).

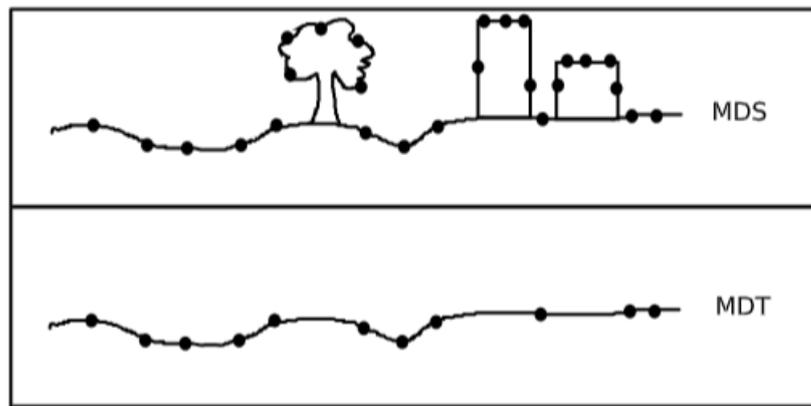


Figura 3.2 - Representação esquemática dos modelos digitais de superfície e terreno (modificado de Santos *et al.* 2018).

Outro produto importante é o ortofoto mosaico ou ortomosaico, que consiste em uma imagem corrigida para que o efeito de perspectiva seja removido (Wolf *et al.* 2014). Tais imagens, quando combinadas com curvas de nível, são comumente utilizadas na confecção de mapas topográficos de detalhe e de alta resolução. A Figura 3.3 exemplifica a correção de perspectiva realizada no ortofoto mosaico

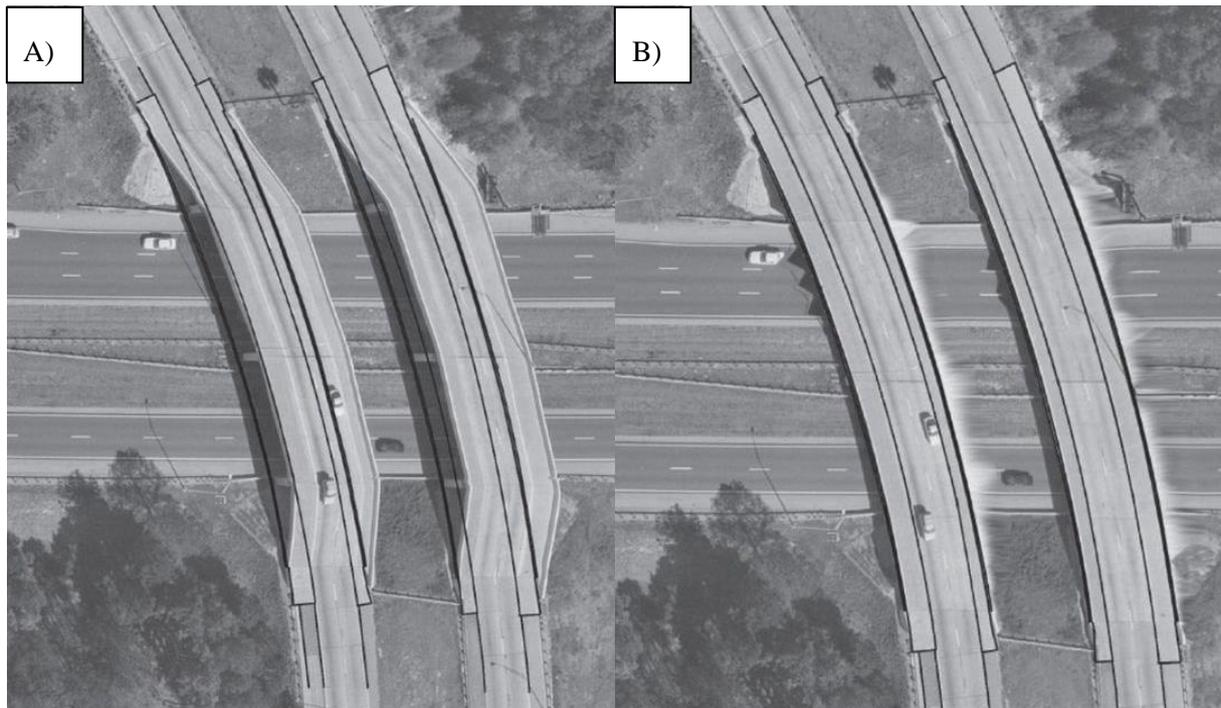


Figura 3.3 - Comparação entre as imagens sem correção (A) e corrigida (B). (Modificado de Wolf *et al.* 2014).

A aerofotogrametria é aplicada em diversas áreas, como agronomia, arqueologia, engenharia, gestão de desastres e monitoramento ambiental. Um exemplo é seu uso na engenharia, onde as imagens aéreas auxiliam no planejamento de obras e na supervisão de locais de difícil acesso (Wolf *et al.*, 2014).

Com os avanços tecnológicos, a aerofotogrametria tem se beneficiado do uso de sistemas de posicionamento global (GPS) e de *softwares* de processamento de imagens. Isso permite uma maior precisão e eficiência na obtenção e análise dos dados (Wolf *et al.* 2014).

Este capítulo apresenta os conceitos básicos relacionados à suscetibilidade e ao risco geológico, além de uma síntese dos tipos de movimentos de massa, assim como fornecer uma visão geral do contexto geotécnico da região, abordando conceitos como suscetibilidade e risco geológico, tipos e condicionantes de movimento de massa e metodologias de cartografia geotécnica. O conhecimento desses aspectos é essencial para o entendimento e a gestão adequada dos riscos geotécnicos, contribuindo para a segurança e o desenvolvimento sustentável das comunidades.

4.1 SUSCETIBILIDADE E RISCO GEOLÓGICO

Suscetibilidade e risco são conceitos amplamente utilizados no âmbito da geologia urbana, são fundamentais na compreensão e gestão dos perigos naturais que afetam áreas vulneráveis. A suscetibilidade refere-se à predisposição de uma determinada região a sofrer eventos geológicos, enquanto o risco envolve a probabilidade de ocorrência desses eventos e os potenciais impactos que podem atingir a população e o ambiente (Tominaga 2009).

Nesse sentido, para definir o risco a que uma região está suscetível, deve-se considerar alguns fatores, correlacionados na Equação 4.1:

$$R = P \times V \times DP \quad \text{Equação 4.1}$$

De acordo com as definições de Lana *et al.* (2021):

Risco (R): Probabilidade de ocorrência de um evento somada aos possíveis riscos associados, função não só dos perigos naturais, como também das decisões e políticas adotadas antes, durante e depois de se ocupar certa área (USGS 2016);

Perigo (P): Condição com potencial de dano, levando em conta a magnitude, duração, dimensão espacial, velocidade de deflagração e a frequência dos eventos passados;

Vulnerabilidade (V): Diz respeito as características de uma comunidade, em relação a suscetibilidade aos danos de um perigo, leva em conta fatores econômicos, sociais, físicos e ambientais. Por exemplo, uma casa de madeira construída na beira de um córrego assoreado é mais vulnerável que um prédio no centro da cidade.

Dano Potencial (DP): É a estimativa dos prejuízos, materiais ou não, associados ao perigo (número de casas e número de famílias sob risco, por exemplo).

A abordagem integrada dos fatores condicionantes do risco geológico permite o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento mais eficazes, com ações preventivas e mitigadoras adequadas.

4.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são fenômenos geológicos que envolvem o deslocamento de materiais sólidos em encostas, colinas ou taludes. Esses movimentos podem ser causados por uma variedade de fatores, como ação da gravidade, instabilidade do solo, mudanças nas condições climáticas e ação antrópica (Filho 1992).

4.2.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Vários estudiosos propuseram caracterizações adequadas para os movimentos de massa, porém, nesse trabalho foi adotada uma das principais classificações difundidas no Brasil, proposta por Augusto Filho (1992), que considera a cinemática, as descontinuidades, o volume e a geometria do movimento, além do tipo de material envolvido (Quadro 4.1).

Os deslizamentos (Figura 4.1A e B) são caracterizados por alta velocidade e ocorrem principalmente em encostas com declividade e amplitude média a alta. Esse fenômeno envolve o deslocamento do material ao longo de uma superfície de ruptura, que pode ser planar (translacional), circular (rotacional) ou em forma de cunha, seguindo os planos de fragilidade estrutural dos maciços terrosos ou rochosos. O escorregamento é geralmente desencadeado por eventos de chuvas intensas ou com grandes volumes acumulados, influenciados por fatores intrínsecos predisponentes presentes no terreno. A magnitude e a velocidade desse fenômeno variam de acordo com as características do terreno e as condições climáticas (Bitar 2014).

O Rastejo (Figura 4.1C) trata-se de um movimento lento, é um fenômeno geológico que ocorre em terrenos com baixas declividades, como colúvios e tálus em depósitos de sopé e/ou meia encosta. Nesse tipo de movimento, a massa se desloca lentamente, permitindo a detecção prévia de sinais de instabilidade, como trincas no solo, degraus de abatimento, deformações na superfície, troncos de árvore que cresceram tortos e surgências de água na base da encosta (USGS 2016).

A queda de blocos (Figura 4.1D) é entendida como o desprendimento abrupto de blocos e matacões rochosos de encostas íngremes, paredões rochosos ou falésias. Esse fenômeno é influenciado principalmente pelas descontinuidades litológico-estruturais dos maciços rochosos e pela ação do intemperismo físico-químico, podendo ser desencadeado por eventos chuvosos. Quando ocorre, o material movimentado pode quebrar com o impacto e rolar pela superfície da encosta até encontrar obstáculos ou atingir terreno plano. A velocidade, trajetória e alcance podem variar consideravelmente, dependendo de fatores como a inclinação da encosta e as características do material mobilizado. Dentre

os principais tipos de movimentos envolvidos estão quedas livres, rolamentos, tombamentos e deslocamentos de rochas (Bitar 2014).

O tombamento (Figura 4.1E) ocorre quando o material se desloca, em um movimento rotacional, no sentido contrário do talude, condicionado por descontinuidades inclinadas em alto ângulo mergulhando na direção oposta a direção de mergulho do talude (Bitar 2014).

O fluxo de detritos (Figura 4.1F) é um tipo de movimento geológico caracterizado pelo deslocamento rápido de uma mistura de rochas, solo, detritos e água, quando ocorre o processo de liquefação. Esse tipo de movimento pode ocorrer em diferentes escalas, desde pequenos fluxos em encostas locais até grandes avalanches de detritos em áreas montanhosas. A velocidade e o alcance do fluxo de detritos podem variar dependendo de vários fatores, como a quantidade de água presente, o volume e a granulometria dos detritos, a inclinação da encosta e a presença de obstáculos ao longo do percurso (USGS 2016).

Quadro 4.1 - Classificação de movimentos de massa (modificado de Augusto Filho 1992).

Classificação	Superfície	Velocidades	Volumes	Tipos de Material	Geometria
Rastejo	Vários planos de deslocamento (internos)	Muito baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade	Pequeno a grande	Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada	Indefinida
Deslizamentos	Poucos planos de deslocamento (externo)	Médias (m/h) a altas (m/s)	Pequenos a grandes	Planares: solo pouco espesso, solos e rocha com um plano de fraqueza	
				Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas	
				Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza	
Quedas e Tombamentos	Sem planos de deslocamento	Muito altas (vários m/s)	Pequenos a médios	Rochoso	Lascas, placas, blocos etc.
Corridas/Fluxos	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas)	Médias (m/h) a altas (m/s)	Médios	Solo, rocha, detritos e água	Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

A Figura 4.1 mostra uma síntese dos tipos de movimentos de massa:

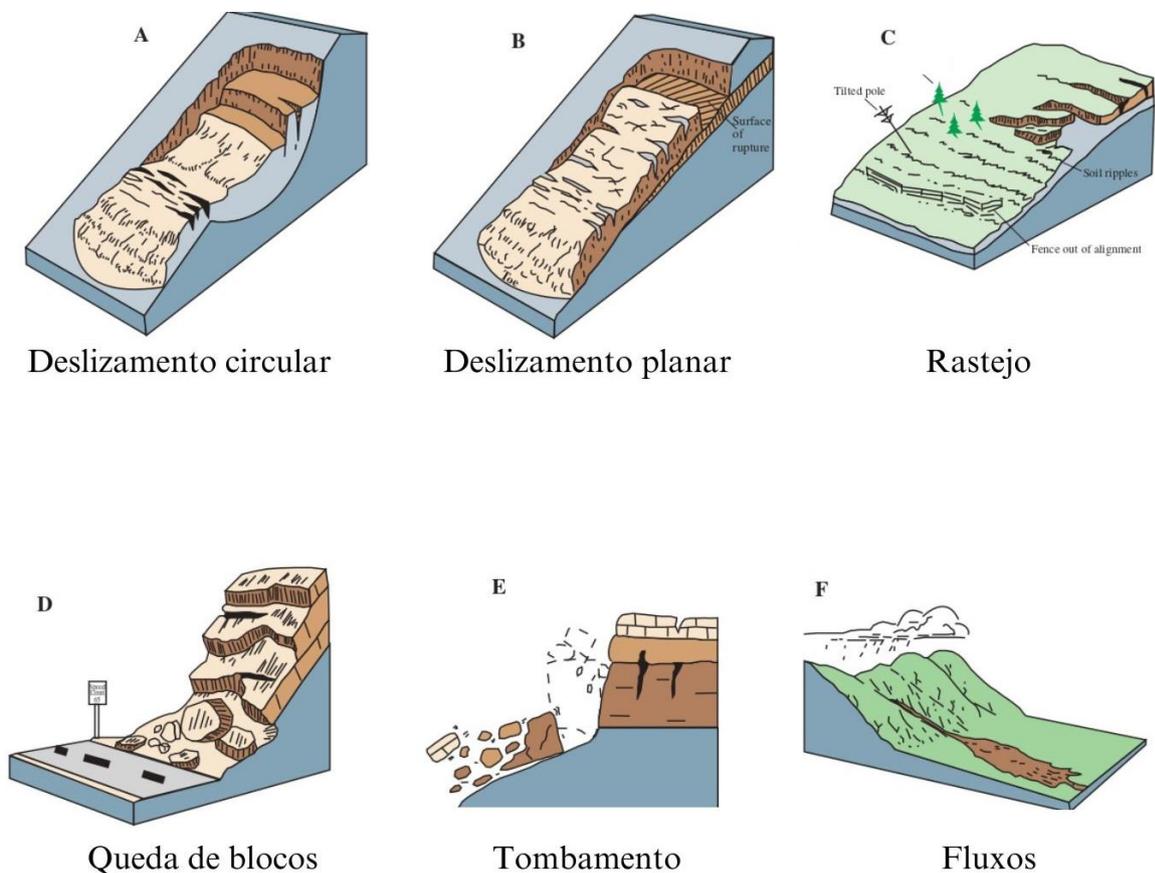


Figura 4.1 - Representação gráfica dos tipos de movimento de massa, com foco naqueles que aparecem na área de estudo (modificado de USGS 2016).

4.2.2 FATORES CONDICIONANTES

A partir dos estudos de movimentos de massa que já ocorreram, além das contribuições do sensoriamento remoto, foram definidos parâmetros (Quadro 4.2) que são considerados relevantes na identificação e caracterização de futuros movimentos de massa (Van Western 1993).

Os modelos digitais permitem uma análise prévia do terreno, a partir de modelagens de fluxo e declividade, por exemplo. A geologia e a pedologia dão informações sobre a composição, grau de alteração e configuração estrutural do terreno. A hidrologia possibilita um entendimento da dinâmica da bacia hidrológica a qual a área está inserida, como por exemplo, o aporte hídrico, nível freático, controle de drenagens e infiltração. A geomorfologia permite entender os processos de formação do relevo e a separação da área em domínios, importante para o mapeamento em diferentes escalas. Por

fim, o uso do terreno mostra a relação direta da ação antrópica com a condição geotécnica local (Van Western 1993).

Quadro 4.2 - Síntese dos fatores condicionantes dos movimentos de massa (Reis 2022).

Grupo	Atributo	Relevância
Modelo Digital de Terreno (MDT)	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
Geologia	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
Solo	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
Hidrologia	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

Grupo	Atributo	Relevância
Geomorfologia	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
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

4.3 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

O mapeamento geotécnico é uma técnica utilizada para representar em formato cartográfico os elementos geotécnicos relevantes para o uso e ocupação do solo e subsolo em projetos, construções e questões ambientais. Essa abordagem permite a visualização das unidades geotécnicas específicas de cada localidade, fornecendo informações sobre o tipo de solo, substrato e relevo predominante (Costa & Alves 2006).

De acordo com Zuquette (1993), o objetivo principal do mapeamento geotécnico é coletar, avaliar e analisar os atributos que compõem o ambiente físico. Por sua vez, a *International Association of Engineering Geology and the Environment* (IAEG) define o mapa geotécnico como a classificação e representação dos componentes do ambiente geológico que possuem grande importância para todas as atividades de engenharia, planejamento, construção, exploração e preservação do ambiente.

Dessa forma, o mapeamento geotécnico desempenha um papel crucial na tomada de decisões relacionadas a projetos e construções, fornecendo subsídios importantes para a seleção de áreas adequadas para diferentes tipos de empreendimentos. Além disso, essa técnica auxilia na identificação e avaliação de potenciais riscos geotécnicos, contribuindo para a mitigação de problemas relacionados a instabilidades e movimentos de massa.

Nesse sentido, existem diferentes tipos de cartas geotécnicas, de acordo com a classificação da Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais – CPRM – (2019), são elas:

- **Carta de atributos ou parâmetros** – apresentam a distribuição espacial de uma ou mais características do terreno;
- **Cartas geotécnicas** propriamente ditas, que expõem limitações e potencialidades dos terrenos e definem diretrizes de ocupação para um ou vários tipos de uso do solo – cartas de aptidão à ocupação, cartas para projetos de engenharia, etc.;
- **Cartas de suscetibilidade** – apresentam a propensão à ocorrência de um evento em uma escala de médio detalhe, em áreas ocupadas ou não;
- **Cartas de perigo** – Indicam a possibilidade de ocorrência de um evento, apresentando a trajetória e o raio de alcance dos materiais mobilizados, em uma escala de maior detalhe que a anterior;
- **Carta de setorização de risco** – apresenta a possibilidade de ocorrência de um evento *versus* as consequências associadas.

Ademais, Fell *et al.* (2008) elaboraram uma relação entre o tipo de setorização (zoneamento) e a aplicabilidade em diferentes escalas (Figura 4.2), que é utilizada como referência em diversos trabalhos e manuais de cartografia geotécnica.

Objetivo	Tipo de zoneamento				Nível de zoneamento			Escala
	Inventário	Suscetibilidade	Perigo	Risco	Básico	Intermediário	Avançado	
Zoneamento Regional								
Informativo	X	X	-	-	X	-	-	1:25.000
Consultivo	X	X	(X)	-	X	(X)	-	1:250.000
Legal	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Zoneamento Local								
Informativo	X	X	X	(X)	X	(X)	-	1:5.000
Consultivo	(X)	X	X	X	X	X	X	1:25.000
Legal	-	(X)	X	(X)	-	X	X	
Zoneamento pontual								
Informativo	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	1:5.000
Consultivo	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	até
Legal	-	(X)	X	X	-	X	X	1:1.000
Projeto	-	(X)	(X)	X	-	(X)	X	

Figura 4.2 - Tipos, níveis e escalas aplicáveis na elaboração de mapas de setorização de risco onde, X = aplicável; (X) = pode ser aplicável; NR = não recomendado; NUC = não utilizado comumente. (fonte: Bitar 2014; modificado de Fell *et al.* 2008).

Vallejo & Ferrer (2011) definem uma metodologia sistemática para a elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco, sintetizando as etapas de escritório e de campo (Figura 4.3).

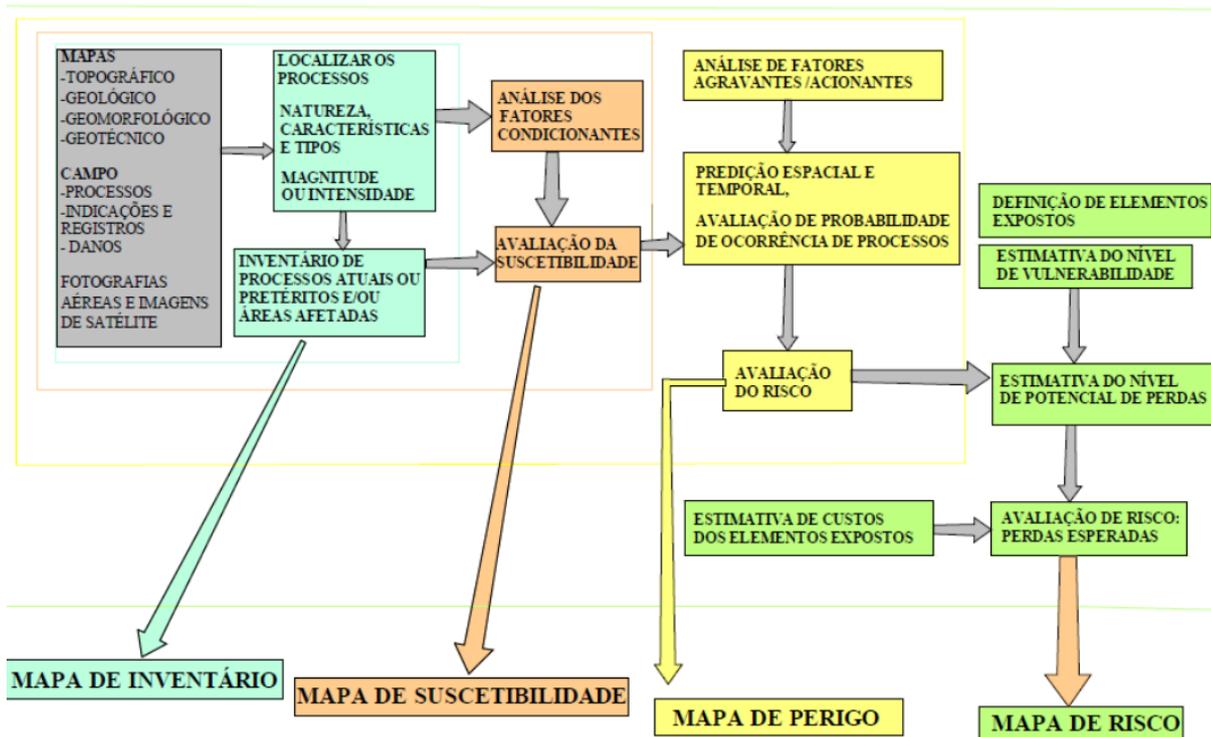


Figura 4.3 - Metodologia para elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco (Vallejo & Ferrer 2011).

4.4 CONTEXTO GEOTÉCNICO LOCAL

Os bairros localizados na encosta oriental da Serra de Ouro Preto estão sujeitos a diferentes tipos de movimentos de massa, como rastejo, quedas de blocos e escorregamentos. Isso se deve principalmente à ocupação desordenada de áreas com topografia acidentada e à interferência humana nas encostas, o que resulta em instabilidade geológica-geotécnica (Goes *et al.* 2016).

As características geológicas da região também contribuem para a instabilidade das encostas. Um exemplo é a relação estratigráfica entre os itabiritos e metapelitos, que apresentam comportamentos hidrológicos e geotécnicos diferentes (Carvalho 1982). Enquanto os itabiritos e as cangas possuem boa permeabilidade, os metapelitos são pouco permeáveis. Isso leva à acumulação de água no contato entre essas camadas, aumentando as tensões e reduzindo a coesão entre os grãos, podendo desencadear movimentos de massa (Goes *et al.* 2016).

A configuração estrutural das litologias nas encostas também desempenha um papel importante na ocorrência de acidentes geotécnicos. A maioria das encostas da região apresenta uma inclinação na mesma direção de mergulho da foliação, muitas vezes com ângulos semelhantes de inclinação. Isso faz com que a foliação não fique confinada, potencializando os movimentos de massa (Goes *et al.* 2016).

Além disso, o fluxo subterrâneo de água é outra variável que contribui para a ocorrência de movimentos de massa. Nas exposições dos itabiritos da Formação Cauê em cortes de estrada, é

possível observar um gotejamento constante, mesmo durante períodos de estiagem. Isso indica que o fluxo de água segue a direção da foliação do itabirito (Carvalho 1982).

Em 2016, a CPRM elaborou uma setorização de risco para a cidade de Ouro Preto (Goes *et al.* 2016; Figura 4.4), a qual está sendo usada como base para o desenvolvimento do presente trabalho. Vale ressaltar que, para esse mapa, foram consideradas zonas de perigo alto e muito alto.

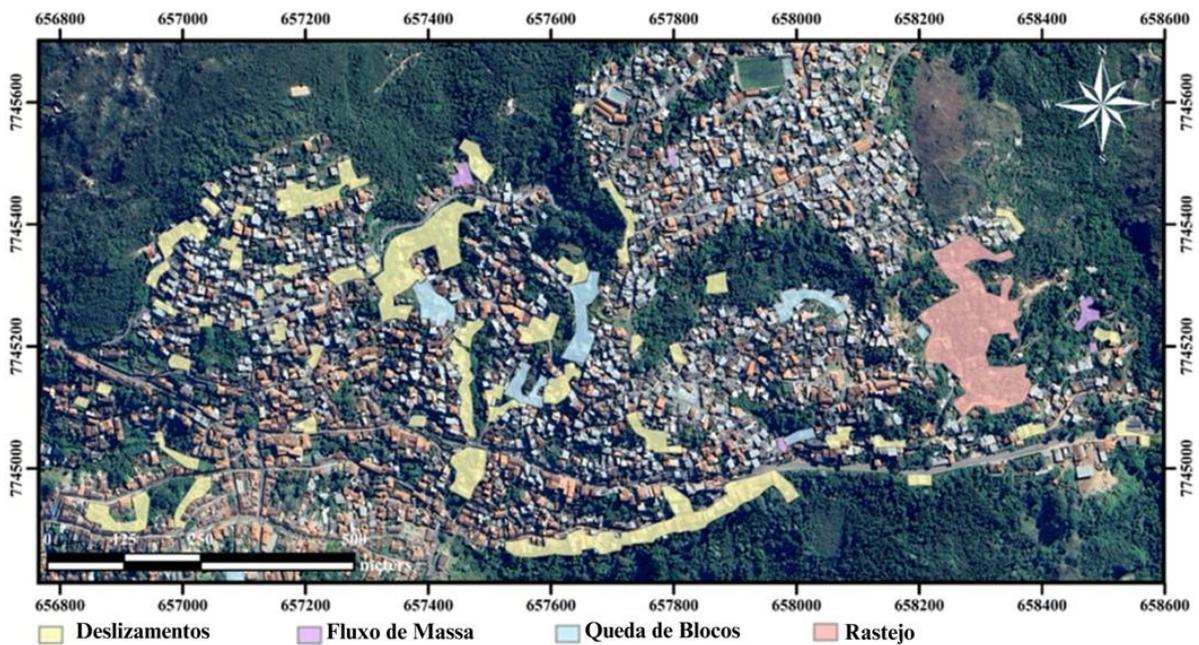


Figura 4.4 - Setorização de risco na área de estudo (Barbosa & Oliveira 2023, modificado de Goes *et al.* 2016; dados disponíveis em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20723>).

Com base nesses dados, a Defesa Civil de Ouro Preto disponibiliza em seu aplicativo – Defesa Civil Ouro Preto – uma visualização prática. O aplicativo, disponível para *Iphone* e *Android*, permite ao cidadão verificar as áreas de risco mapeadas no município, acompanhar a quantidade de chuva e contribuir relatando possíveis incidentes através de fotos.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos são poderosas ferramentas utilizadas para investigar e compreender os processos geológicos que ocorrem no planeta. Essas técnicas fornecem informações valiosas sobre a estrutura interna da Terra, a distribuição de materiais em subsuperfície e os fenômenos físicos que influenciam a dinâmica da Terra. Este capítulo aborda os principais métodos utilizados na realização do presente trabalho.

5.1 GAMAESPECTROMETRIA

O método da gamaespectrometria baseia-se na medição do decaimento radioativo de certos elementos presentes nos minerais. Esse fenômeno ocorre devido a desintegração do núcleo atômico, podendo ocorrer a emissão de três partículas radioativas diferentes, partículas α , β e radiação γ (Telford *et al.* 1990). A radiação gama, devido à sua capacidade de penetrar em materiais, é utilizada nesse método. Dessa forma, a radiometria é capaz de fornecer informações sobre os materiais expostos na superfície (Kearey *et al.* 2009).

Existem vários isótopos radioativos de ocorrência natural, porém, os mais comumente utilizados na gamaespectrometria são o urânio (^{238}U), o tório (^{232}Th) e o potássio (^{40}K). Esses elementos são escolhidos devido à sua abundância em diferentes tipos de rochas e ao caráter litófilo (Kearey *et al.* 2009). A distribuição desses elementos nos minerais (Quadro 5.1) e rochas (Figura 5.1) é resumida a seguir:

Quadro 5.1 - Relação de minerais que possuem os elementos radioativos de interesse em sua composição. (Reis 2022).

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

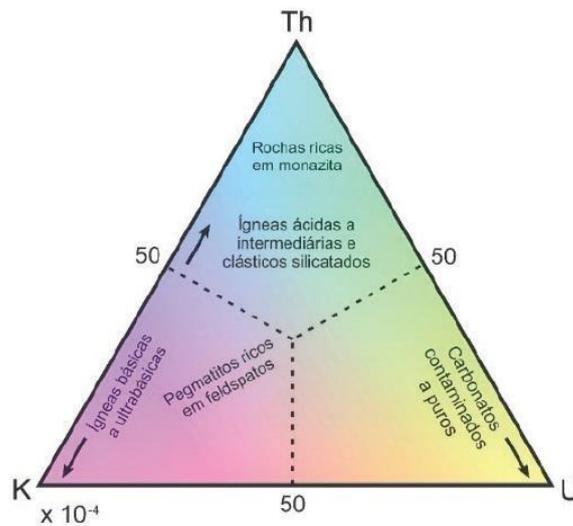


Figura 5.1 - Diagrama ternário mostrando a composição de diferentes tipos de rocha em relação aos elementos radioativos de interesse (modificado de Kearey *et al.* 2009).

Tendo em vista a relação de proporcionalidade inversa entre frequência e profundidade, presente em todos os métodos geofísicos, a gamaespectrometria, devido a alta frequência das ondas *gamma* (10^{16} Hz; Kearey *et al.* 2009), atinge profundidades muito rasas, sendo extremamente útil nos trabalhos de mapeamento geológico. Porém, para uma interpretação mais precisa de acordo com a configuração geológica local (Quadro 5.3), existem distintos produtos da radiometria (Quadro 5.2), relacionando os valores obtidos de forma diferente.

Quadro 5.2 - Diferentes produtos do processamento da radiometria (Barbosa & Oliveira 2020).

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

Quadro 5.3 - Relação entre os diferentes produtos e suas respectivas utilizações (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.

5.2 GRAVIMETRIA

A gravimetria baseia-se na investigação da variação do campo gravitacional terrestre, causada pela diferença de densidade dos materiais presentes na crosta. As anomalias são identificadas a partir da lei da gravitação de Newton, definida pela Equação 5.1 (Kearey *et al.* 2009).

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde, F é a força gravitacional, G a constante gravitacional universal, m_1 e m_2 as massas dos corpos que se atraem e r a distância entre ambos os corpos.

A variação de densidade das rochas está diretamente ligada às composições dos corpos (Figura 5.4), por exemplo, uma rocha máfica, com minerais ferro-magnesianos, apresenta uma anomalia gravimétrica maior comparada a um arenito, composto essencialmente por quartzo.

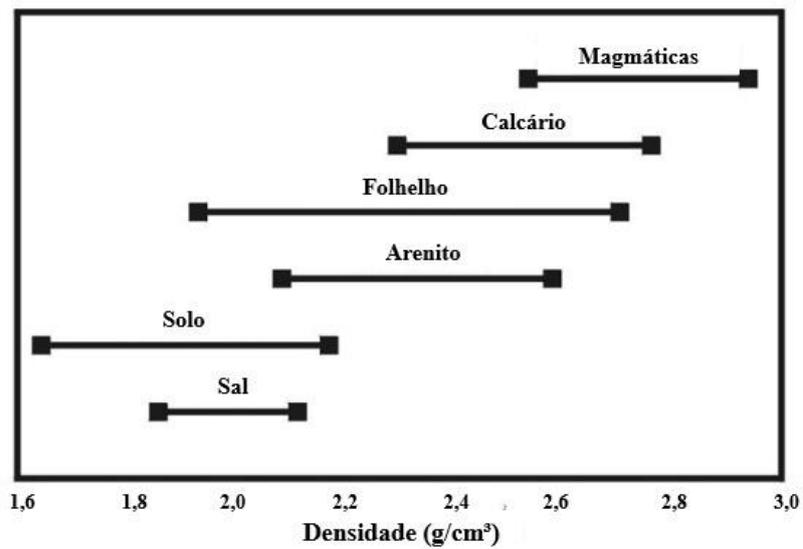


Figura 5.2 - Intervalo de valores de densidade em diferentes rochas. (modificado de Grant & West 1966).

Para uma avaliação precisa de anomalias gravimétricas, é necessário subtrair do sinal obtido quaisquer interferências não inerentes da anomalia. Lines & Newrick (2004) fazem uma síntese das correções aplicadas nos dados de gravimetria (Quadro 5.4):

Quadro 5.4 - Relação entre os cálculos das correções e suas respectivas finalidades. (Reis 2022).

Correção	Cálculo	Finalidade
Latitude	$g(\varphi) = 978032,7 * (1 + 0,0053024 * \text{sen}^2\varphi + 0,0000059\text{sen}^4\varphi) mGal$ Sendo φ a latitude em ângulos	A gravidade em um determinado ponto da Terra varia de acordo com a sua respectiva latitude, sendo mínima na região do Equador.
Free-air	$g(f) = (0,3086 * h) mGal$ Sendo h a elevação do levantamento em metros	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.
Bouguer	$g(\rho) = (0,04192 * \rho * h) mGal$ Sendo ρ o contraste de densidade entre os materiais substituídos e h a espessura desta camada	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”.
Terreno	$g(ter)$	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
Anomalia Bouguer	$g(B) = g(medido) - g(\varphi) + g(f) - g(\rho) + g(ter)$	Corresponde à diferença entre a gravidade teórica e a gravidade medida em um ponto

5.3 MAGNETOMETRIA

A magnetometria consiste na investigação de anomalias no campo magnético terrestre, causadas a partir de rochas que contém minerais magnéticos. Contudo, grande parte dos minerais formadores de rocha não possuem propriedades magnéticas, fazendo com que rochas com tais propriedades gerem anomalias expressivas (Kearey *et al.* 2009), tornando o método uma ótima alternativa para a prospecção regional de depósitos minerais.

Nesse sentido, além da pesquisa mineral, o método se faz muito útil na investigação de estruturas e contatos litológicos, fatores que podem potencializar ou proporcionar movimentos de massa (Souza 2013).

O campo magnético terrestre é gerado a partir do desacoplamento entre os núcleos externo e interno, gerando um movimento convectivo no núcleo externo, composto por ferro e níquel no estado líquido, que gera uma corrente elétrica e, conseqüentemente, um campo magnético associado (Telford *et al.* 1990). Esse fenômeno é conhecido como a teoria do geodínamo, e é responsável por 90% da

magnetização do planeta, sendo o restante proveniente das rochas da crosta e interferência externa de tempestades magnéticas (Kearey *et al.* 2009).

Telford *et al.* (1990) comparam a Terra a um grande imã, com as linhas de fluxo de campo magnético entrando no polo norte e saindo no polo sul (Figura 5.5), com direção variando de acordo com a latitude.

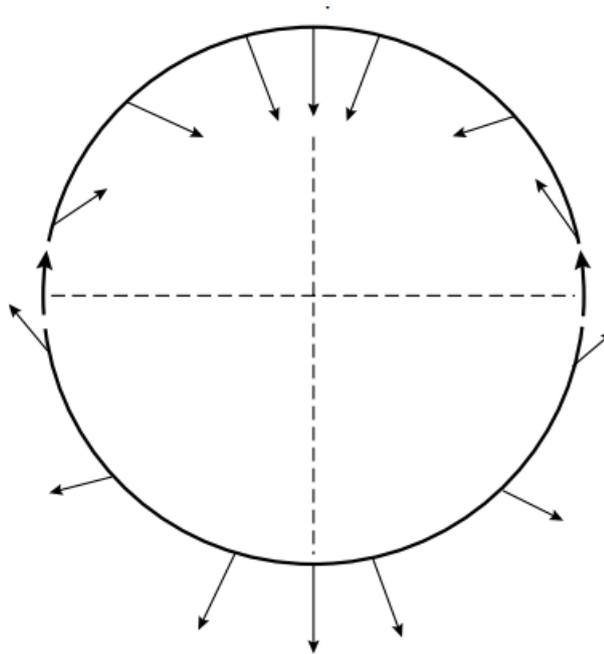


Figura 5.3 - Esquema mostrando a variação das linhas de fluxo do campo magnético terrestre (modificado de Kearey *et al.* 2009).

As anomalias magnéticas são medidas através da suscetibilidade magnética, que reflete a concentração de minerais ferrimagnéticos, como a magnetita, pirrotita e ilmenita (Luiz & Silva 1995). Ou seja, a magnetometria visa estudar os contrastes de suscetibilidade magnética nas rochas. Essa propriedade tem uma relação direta com os valores de magnetização induzida (I) e do campo magnético terrestre (H), expressa pela equação 5.x, onde (k) é a suscetibilidade magnética (Telford *et al.* 1990):

$$I = kH \quad \text{Equação 5.2}$$

Depois de concluir as leituras feitas através de levantamento em terra ou levantamento aéreo, é necessário realizar algumas correções para garantir uma interpretação adequada das informações. Essas correções (Quadro 5.5) incluem ajustes para corrigir a variação diurna, a topografia e influências geomagnéticas (Kearey *et al.* 2009).

Quadro 5.5 - Relação das correções de dados com suas respectivas finalidades. (adaptado de Kearey *et al.* 2009).

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

A variação diurna ocorre devido a agitação das moléculas na ionosfera que, com o aumento do calor ao longo do dia, podem chegar a superfície, interferindo nas leituras. Nesse caso, é comum que sejam utilizados dois magnetômetros, sendo um deles fixo para registrar apenas a variação diurna. O valor é somado, se o campo magnético na estação fixa diminui em relação ao primeiro valor medido naquele dia e diminuído, no caso inverso.

A correção geomagnética é realizada para se obter o campo anômalo local, subtraindo um valor de referência dado pelo próprio campo magnético terrestre. Esse valor é chamado de *International Geomagnetic Reference Field – IGRF* – e define o campo magnético teórico não alterado em qualquer ponto da superfície da Terra (Kearey *et al.* 2009).

O efeito da topografia nas medidas magnéticas terrestres é influenciado pelo contraste entre o terreno e o ar. Nas encostas de vales, o sensor fica mais próximo do terreno e é cercado por mais material magnetizado, enquanto a magnetização do terreno em si pode atingir valores altos. Isso pode ocultar anomalias magnéticas produzidas por corpos finitos em levantamentos aéreos. A intensidade do efeito topográfico depende da magnetização do terreno, sendo mais significativo em áreas com rochas intrusivas e vulcânicas. Embora a correção do efeito topográfico seja difícil de implementar devido à falta de conhecimento preciso da topografia e da distribuição da magnetização, é importante que o intérprete esteja ciente da topografia da área para distinguir seus efeitos dos efeitos geológicos.

Além das correções, ao analisar dados magnetométricos, é necessário que se aplique uma filtragem nos dados, a fim de reduzir ruídos e destacar informações pertinentes para a interpretação. O Quadro 5.6 faz uma síntese dos principais filtros utilizados e suas respectivas finalidades.

Quadro 5.6 - Principais filtros aplicados em dados magnetométricos (Barbosa & Oliveira 2020).

Filtros		Finalidade Geofísica
Derivadas	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.
Continuação	Para cima	Retira anomalias superficiais.
	Para baixo	Retira anomalias profundas
Frequência	Passa banda	Determina o intervalo de frequência
	Passa alta	Retira anomalias de baixa frequência
	Passa baixa	Retira anomalias de alta frequência

5.4 ELETORRESISTIVIDADE

O método baseia-se na injeção de uma corrente elétrica através do solo, e a medida da diferença de potencial resultante. Tendo em vista que diferentes materiais têm condutividades elétricas distintas, através da eletorresistividade, é possível coletar informações sobre a forma e as propriedades elétricas de heterogeneidades subsuperficiais (Kearey *et al.* 2009).

Nesse sentido, para compreender o conceito de resistividade elétrica, é preciso conhecer e entender os tipos de condutividade existentes na natureza. A condutividade eletrônica ocorre quando é possível a passagem de elétrons livres no retículo cristalino do material. Esse tipo de condutividade está presente nos metais nativos e em alguns minerais sulfetados, além da grafita. A condutividade eletrolítica é causada pelo movimento de íons em solução, e está presente, por exemplo, nas soluções aquosas alojadas nas descontinuidades das rochas. Por fim, a condutividade dielétrica ocorre em

materiais semicondutores, onde a propriedade pode ser controlada com a variação de temperatura, por exemplo (Telford *et al.* 1990).

A resistividade elétrica é uma propriedade do meio e está relacionada à sua composição, porosidade, teor de água e salinidade. Pode ser entendida como o inverso da condutividade, onde materiais altamente condutores, como metais nativos, apresentam baixa resistividade. Enquanto certos materiais, como metais nativos e a grafita conduzem eletricidade, a maioria dos minerais que compõem as rochas atuam como isolantes elétricos. Nas rochas, a corrente elétrica é conduzida principalmente pela movimentação de íons dissolvidos na água presente nos poros. Dessa forma, a condutividade elétrica nas rochas ocorre principalmente por meio de processos eletrolíticos, envolvendo o movimento de íons, em vez de processos eletrônicos relacionados aos elétrons (Kearey *et al.* 2009).

Há um intervalo de valores aproximados de resistividades para diferentes tipos de rocha, exemplificado na Figura 5.6 (Kearey *et al.* 2009):

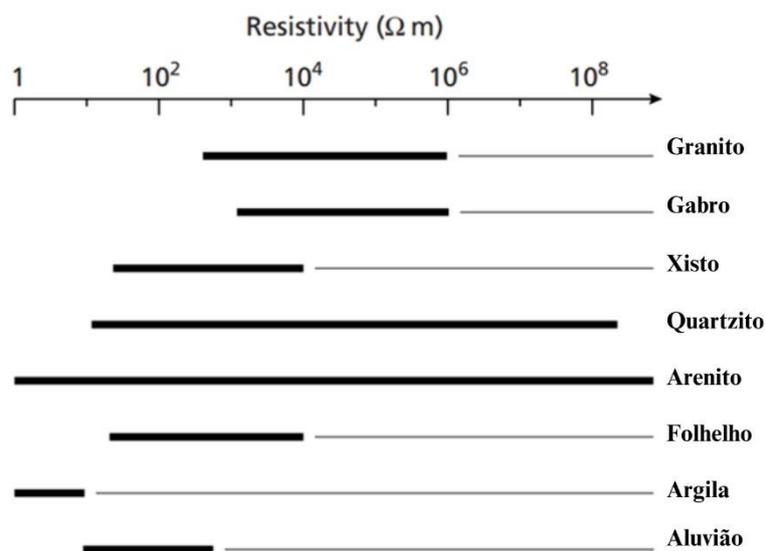


Figura 5.4 - Valores aproximados de resistividade para diferentes tipos de rocha (Kearey *et al.* 2009).

Os levantamentos de eletrorresistividade podem seguir diferentes técnicas investigativas, que por sua vez são agrupadas em três categorias principais: sondagens elétricas, realizadas a partir de um ponto fixo na superfície, perfilagens, realizadas no interior de furos de sondagem e caminhamentos elétricos, que são realizados em linhas de investigação lateral, gerando perfis (Braga 2006).

Os valores de resistividade são dependentes da resistência elétrica, obtida pela lei de Ohm quando se conhece os valores da diferença de potencial e da intensidade da corrente elétrica (Equação 5.3).

$$V = R \times I$$

Equação 5.3

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

No entanto, a corrente elétrica, ao penetrar no solo, não tem o mesmo comportamento que, por exemplo, em cilindro condutor e homogêneo, a mesma sofre um espalhamento radial tridimensional (Figura 5.7; Kearey *et al.* 2009) e, a partir dessa ideia, é possível chegar em um valor de resistividade aparente, definido na Equação 5.4.

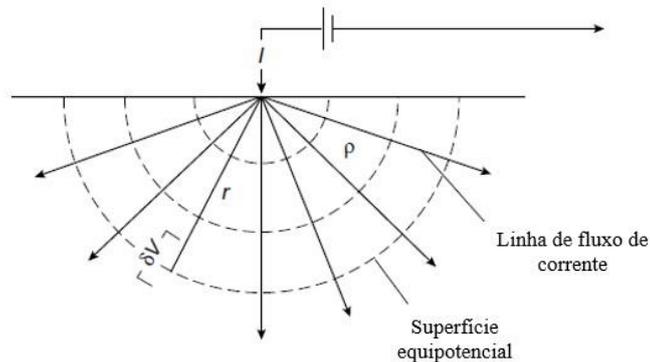


Figura 5.5 - Esquema mostrando o espalhamento radial da corrente elétrica no solo (adaptado de Kearey *et al.* 2009).

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad \text{Equação 5.4}$$

O valor de resistividade aparente (ρ) 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).

No entanto, o valor de resistividade é calculado teoricamente, considerando o meio isotrópico e homogêneo, mas na prática isso raramente é verdadeiro. Portanto, é necessário distinguir entre a resistividade aparente e a resistividade real, através de um processo chamado de inversão geoeletrica, que consiste na obtenção dos parâmetros que melhor ajustem os dados medidos e as condições geológicas disponíveis (Bortolozo *et al.* 2010). Para criar um modelo coerente, são aplicados processos matemáticos que se baseiam em dados observados. No entanto, isso é complexo devido à natureza não linear do sistema e ao fato de que há mais variáveis do que equações. Por isso, é usado um processo gradual de calibração para ajustar os dados processados com base em um modelo inicial.

Dentre as técnicas de inversão geoeletrica destacam-se a *ridge regression* e o método da otimização dos mínimos quadrados (Loke & Barker 1996).

CAPÍTULO 6

ESTADO DA ARTE

Para melhor compreensão da área de estudo e programação das atividades, foram considerados trabalhos realizados no âmbito do mapeamento geológico, da geotecnia urbana e geofísica.

No contexto geológico, a área abrange rochas dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas. As coberturas Cenozoicas presentes são resultado da alteração dos itabiritos da Formação Cauê. As estruturas geológicas identificadas na área são falhas de empurrão associadas à Zona de Falha de São Bento. Também há a ocorrência de ouro orogênico, principalmente nas zonas de contato entre o xisto do Grupo Nova Lima e o quartzito da Formação Moeda, na forma de veios que cortam a unidade (Calvanti 1999).

Em alguns pontos, existem "buracos de sarilho", estruturas derivadas das escavações das minas de ouro do século XVIII, principalmente nas regiões de contato entre a Formação Moeda e a Formação Cauê (Sobreira 2014). Na área de estudo, ocorrem movimentos de massa classificados como rastejo, deslizamento, queda de blocos e fluxo de massa (Goes *et al.* 2016). A ocupação desordenada em áreas topograficamente acidentadas, aliada à alteração antrópica das encostas, torna-as instáveis do ponto de vista geológico-geotécnico. As características geológicas aumentam a instabilidade das encostas na área de estudo. Os itabiritos e cangas são permeáveis, os metapelitos são ligeiramente permeáveis, um fato que causa o acúmulo de água no contato, aumentando as tensões e reduzindo a coesão entre os grãos, o que pode desencadear movimentos de massa (Goes *et al.* 2016).

A configuração estrutural das litologias que compõem as encostas também é um fator importante na estimulação de acidentes geotécnicos, pois a maioria das encostas na área tem a inclinação na mesma direção da inclinação da foliação e, frequentemente, o mesmo ângulo de inclinação, de modo que a foliação não é confinada e os movimentos de massa são potencializados (Goes *et al.* 2016). O fluxo subterrâneo de água também contribui para os movimentos de massa, pois se acumula com diferentes intensidades nas litologias, causando instabilidade geotécnica.

A análise morfológica da área foi realizada a partir do estudo de imagens do satélite Alos Palsar e voos locais de drone. A partir das imagens de satélite, Barbosa & Oliveira (2023) geraram o modelo digital de terreno (Figura 6.1) e, a partir dele, foram gerados mapas de declividade (Figura 6.2) e *aspect* (Figura 6.3).

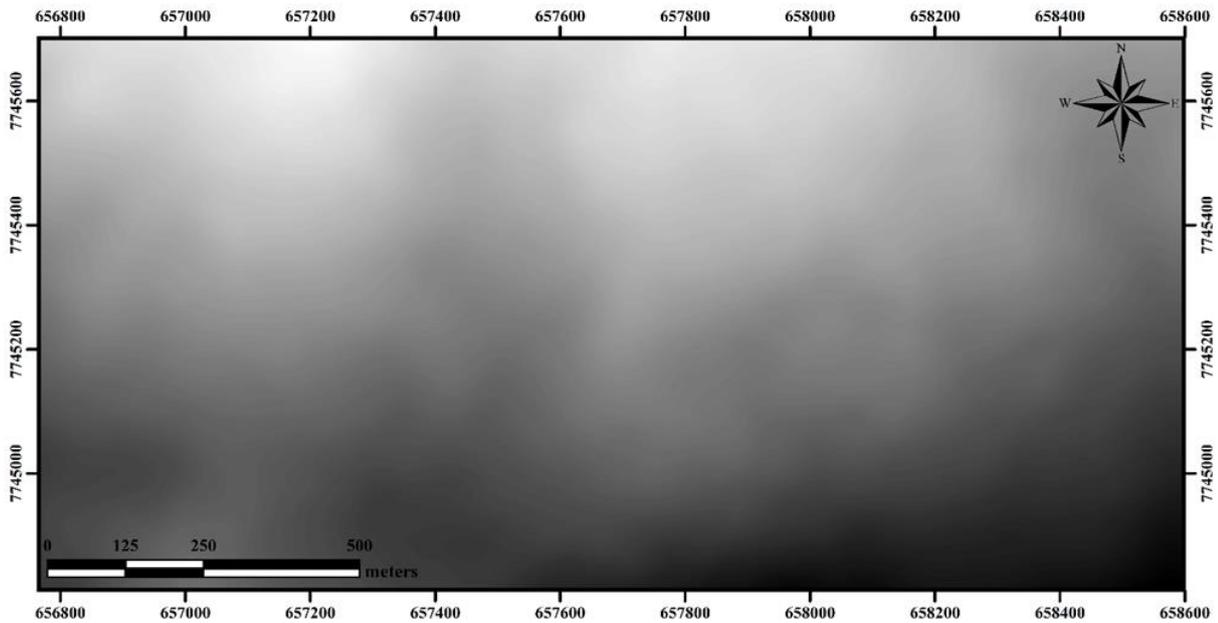


Figura 6.1 - Modelo digital de terreno (Barbosa & Oliveira 2023).

O mapa de declividade mostra a variação em graus da declividade das encostas, enquanto o mapa *aspect* mostra a direção a qual uma encosta é inclinada. Esses produtos são ótimos indicadores de locais propensos a sofrer movimentos de massa e a direção desse movimento, respectivamente.

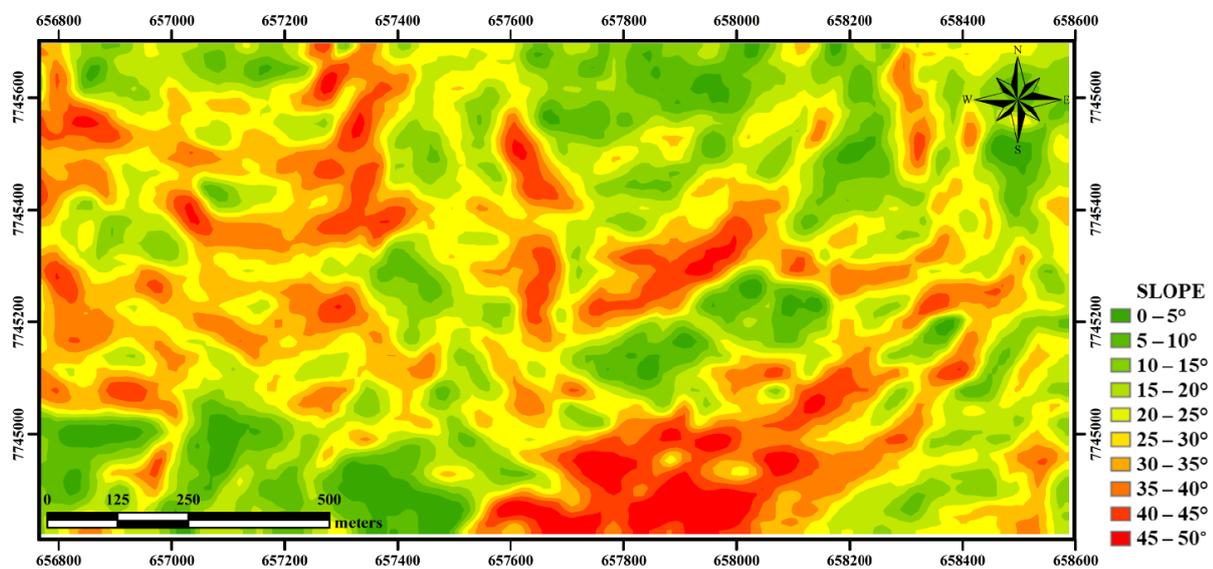


Figura 6.2 - Mapa de declividade (Barbosa & Oliveira 2023).

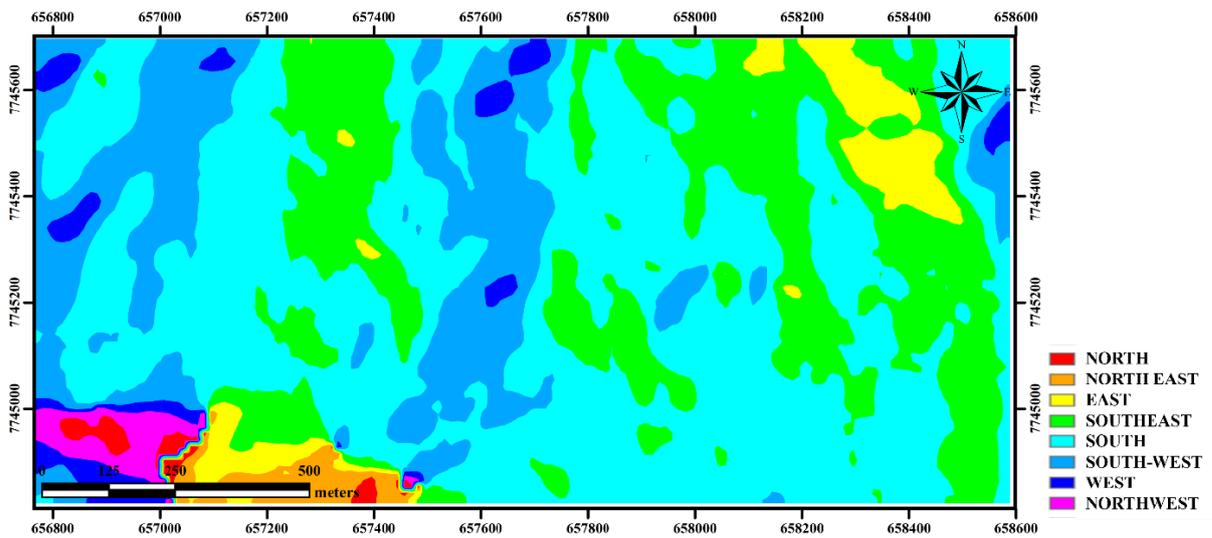


Figura 6.3 - Mapa *aspect* (Barbosa & Oliveira. 2023).

A partir dos voos de drone realizados (Barbosa & Oliveira 2023) foi possível obter, além da ortofoto (Figura 6.4) em alta qualidade, o modelo digital de elevação (Figura 6.5).

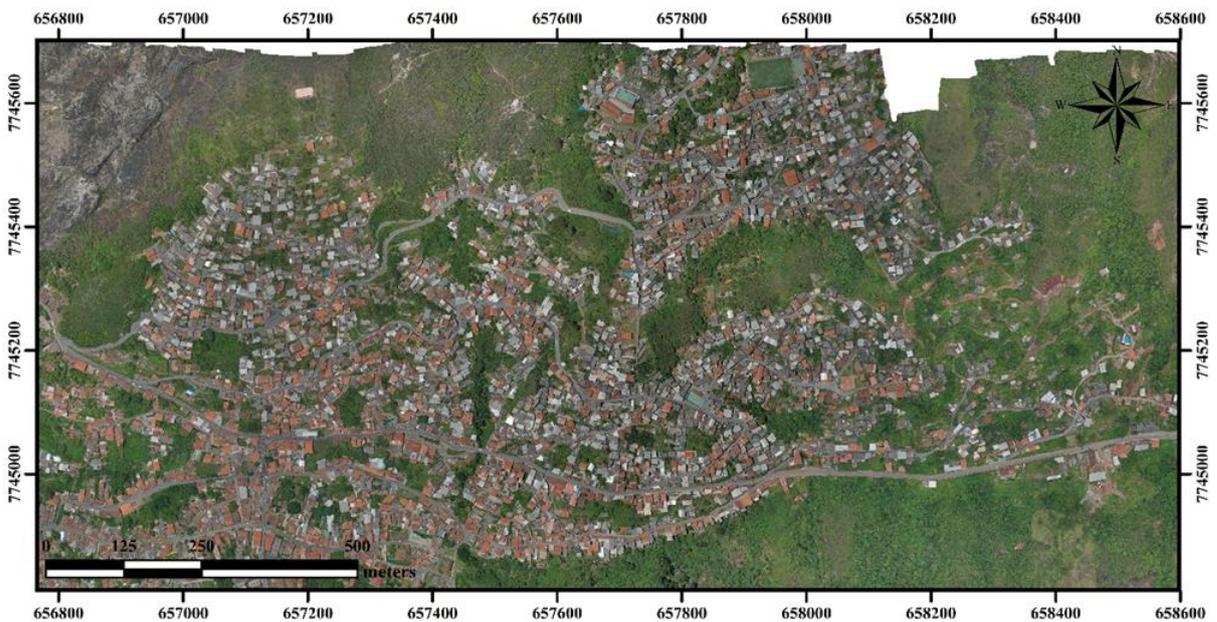


Figura 6.4 - Ortofoto obtida a partir dos voos de drone (Barbosa & Oliveira 2023).

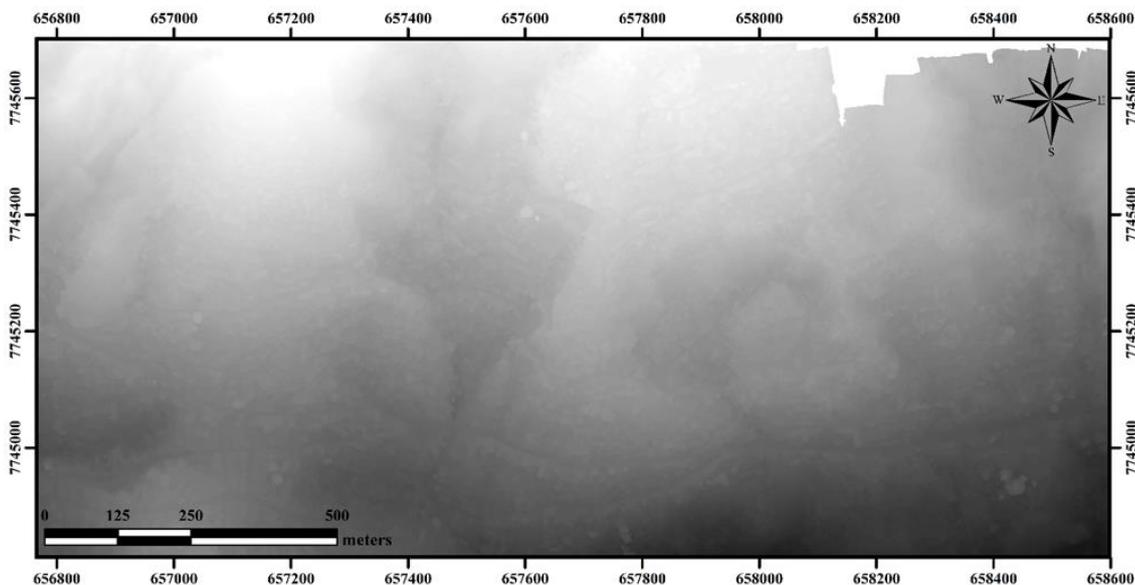


Figura 6.5 - Modelo digital de elevação (Barbosa & Oliveira 2023).

No âmbito da geofísica, os dados aerolevados processados (Barbosa & Oliveira 2023), juntamente com imagens do satélite Alos Palsar, auxiliaram na definição de áreas críticas para investigações terrestres, realizadas utilizando os métodos da gravimetria, magnetometria e eletrorresistividade.

Em escala regional, foram processados dados de gamaespectrometria e magnetometria. Os produtos do processamento dos dados regionais de gamaespectrometria foram gerados a fim de auxiliar a etapa de mapeamento geológico realizada pelos autores supracitados. Foram gerados nove mapas (Figura 6.6) que relacionam a concentração de U, Th e K:

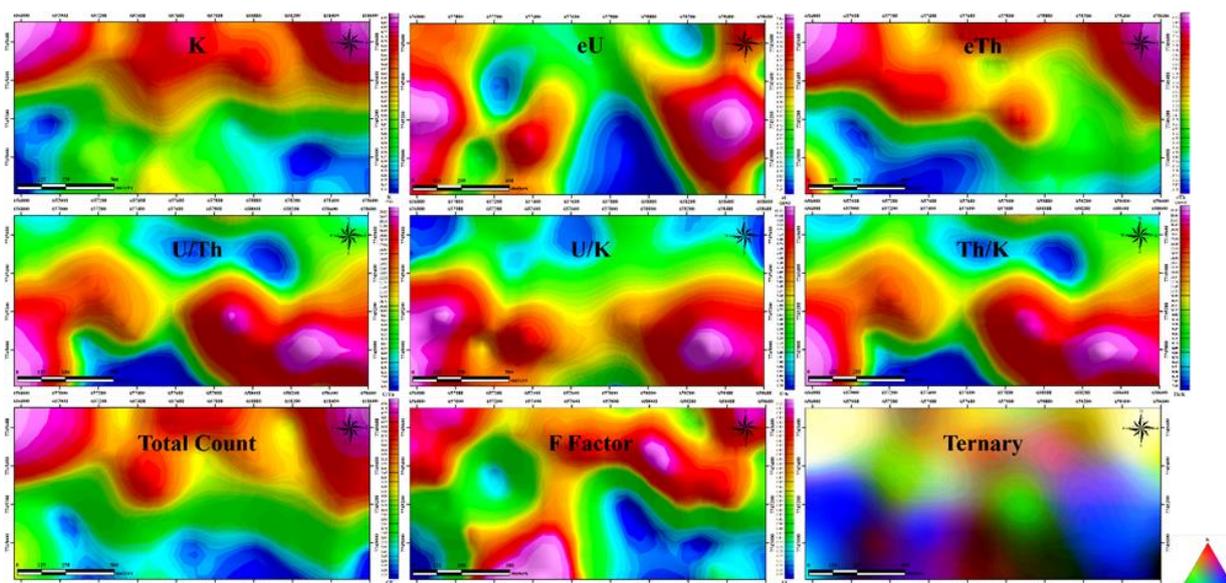


Figura 6.6 - Produtos do processamento dos dados de gamaespectrometria (Barbosa & Oliveira 2023).

A partir dos dados de magnetometria, foi possível gerar nove mapas, aplicando-se os filtros após a obtenção do mapa de campo anômalo (Figura 6.7).

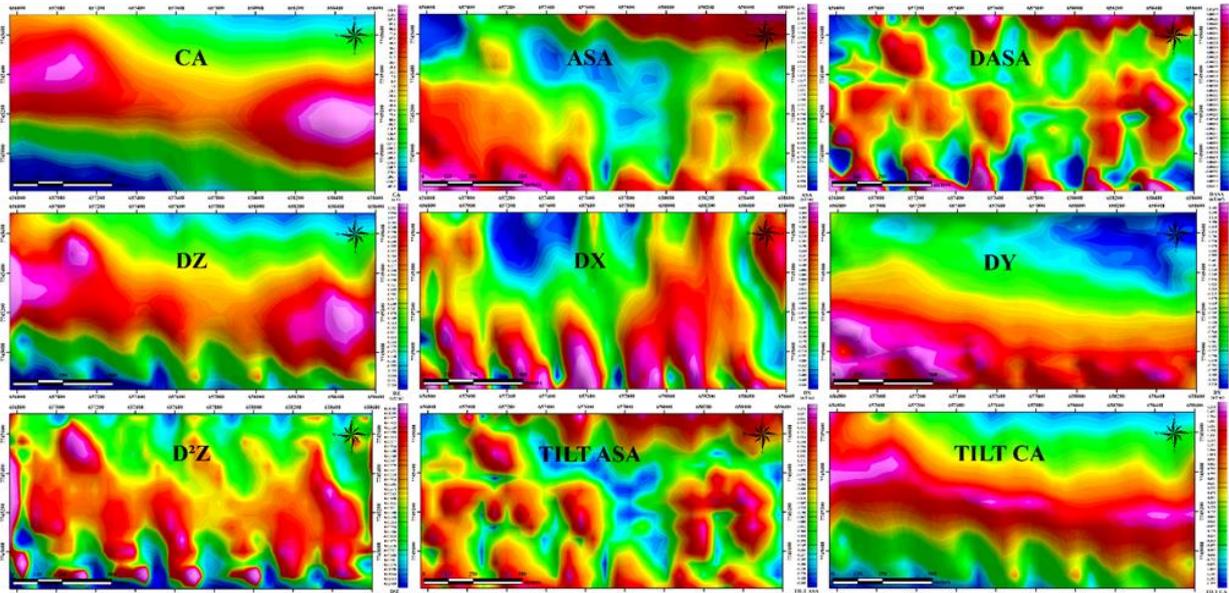


Figura 6.7 - Mapas magnetométricos (Cardoso *et al.* 2023). CA: Campo anômalo. ASA: Amplitude do Sinal Analítico. Primeira Derivada Horizontal EW (dX) e NS (dY), respectivamente. Primeira Derivada Vertical (dZ). Segunda Derivada Vertical (d²Z).

A partir da análise dos dados regionais, foram definidos perfis de levantamento terrestre, nos métodos da gravimetria, magnetometria e eletrorresistividade (Barbosa & Oliveira 2023).

O método da gravimetria foi empregado nos trabalhos a fim de investigar a possível presença de galerias abandonadas pela mineração do século XVIII. O processamento dos dados foi realizado em seis perfis localizados nas regiões centro norte próximo ao traço da zona de falha São Bento, e nordeste da área (Figura 6.8; Barbosa & Oliveira 2023). Vale ressaltar que não foram conduzidos levantamentos gravimétricos nas áreas central e sul devido as interferências na leitura do equipamento, que seriam causadas pelo grande movimento de veículos e pessoas.

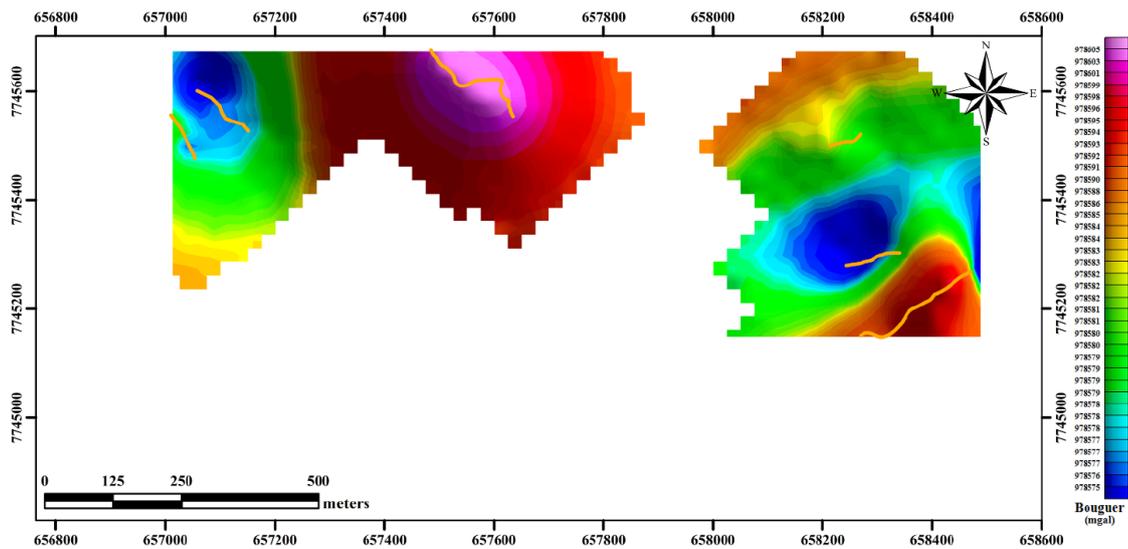


Figura 6.8 - Mapa gravimétrico detalhado. Em laranja, as linhas de levantamento terrestre (Barbosa & Oliveira 2023).

Os resultados obtidos indicam uma grande anomalia positiva na região central, que coincide com afloramentos da Formação Cauê, constituída por rochas naturalmente mais densas que as unidades circundantes do Grupo Nova Lima e Formação Moeda.

Os dados terrestres de magnetometria foram processados ao longo de nove perfis (Figura 6.9) distribuídos na área, a fim de investigar as discontinuidades em subsuperfície.

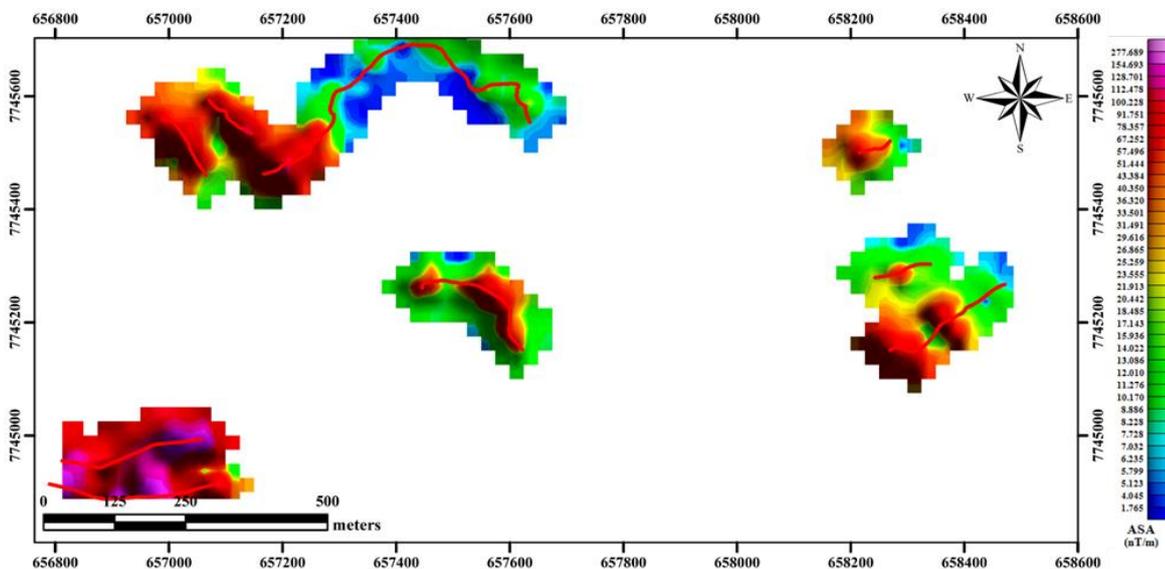


Figura 6.9 - Perfis detalhados de magnetometria. Em vermelho, as linhas de levantamento terrestre (Cardoso *et al.* 2023; Reis 2022).

Os levantamentos do método elétrico tiveram como finalidade estudar se há ou não a presença e fluxo de água subterrânea (Barbosa & Oliveira 2023). Para tanto, foram realizadas duas campanhas – uma no período de seca, e uma no período chuvoso – ao longo de quatro perfis (Figuras 6.10 a 6.14), para que fique claro onde a água pode influenciar movimentos de massa.

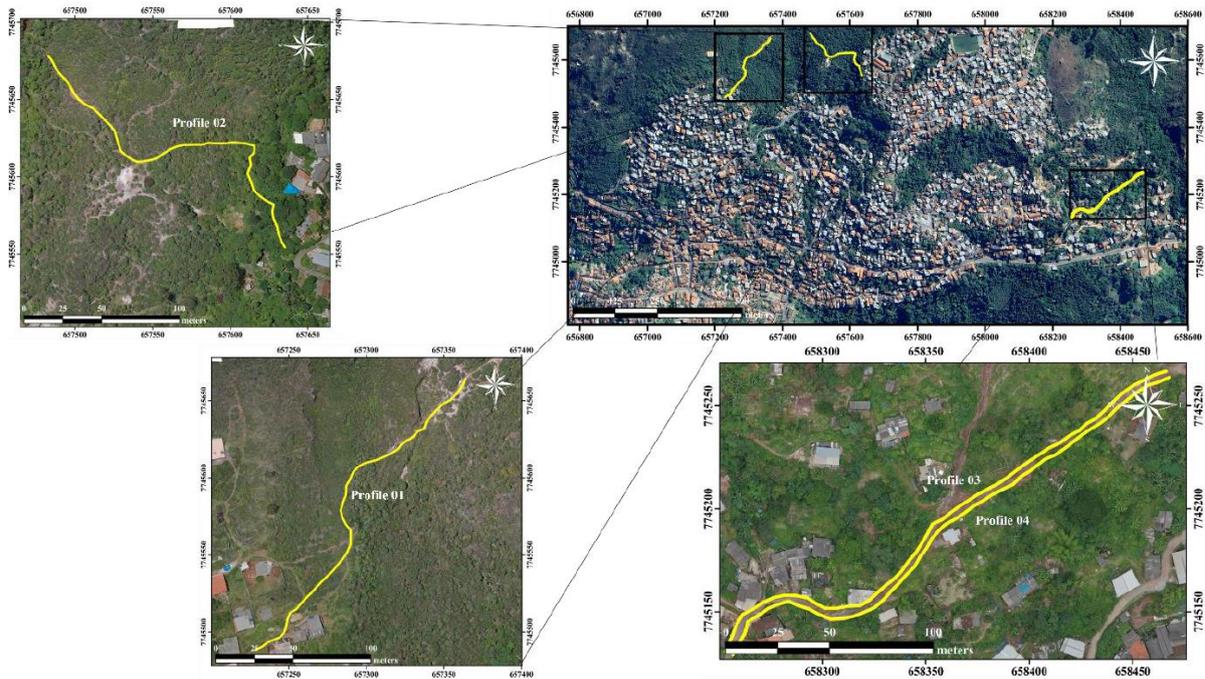


Figura 6.10 - Perfis de levantamento de eletrorresistividade (Barbosa & Oliveira 2023).

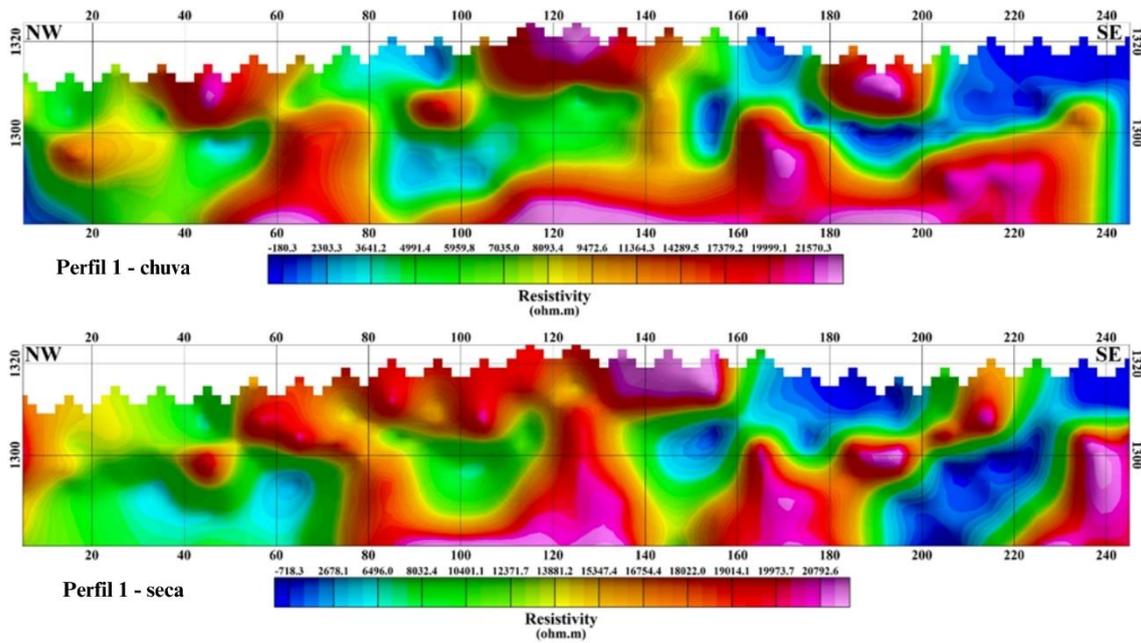


Figura 6.11 - Perfil de eletrorresistividade 1 nos período de seca e chuva (modificado de Barbosa & Oliveira 2023).

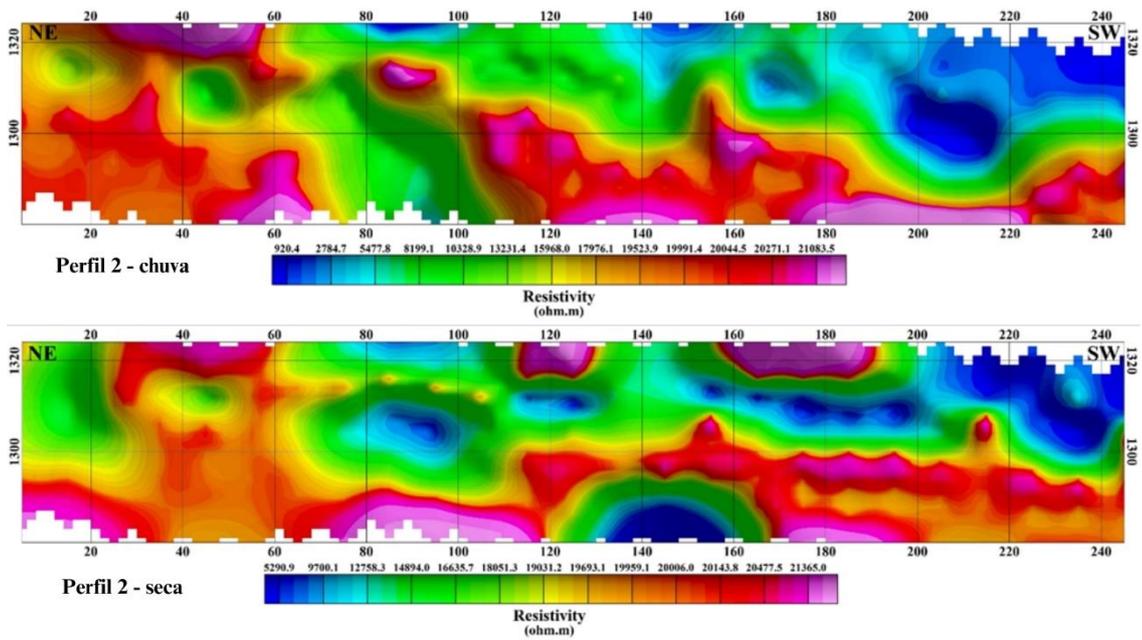


Figura 6.12 - Perfil de eletrorresistividade 2 nos período de seca e chuva (modificado de Barbosa & Oliveira 2023).

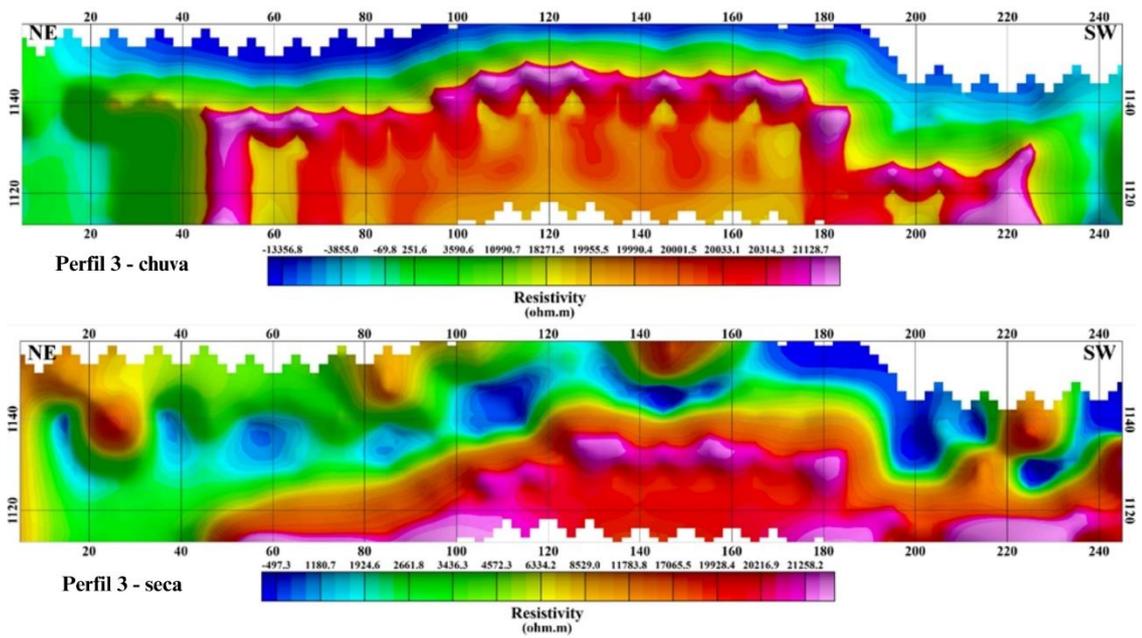


Figura 6.13 - Perfil de eletrorresistividade 3 nos período de seca e chuva (modificado de Barbosa & Oliveira 2023).

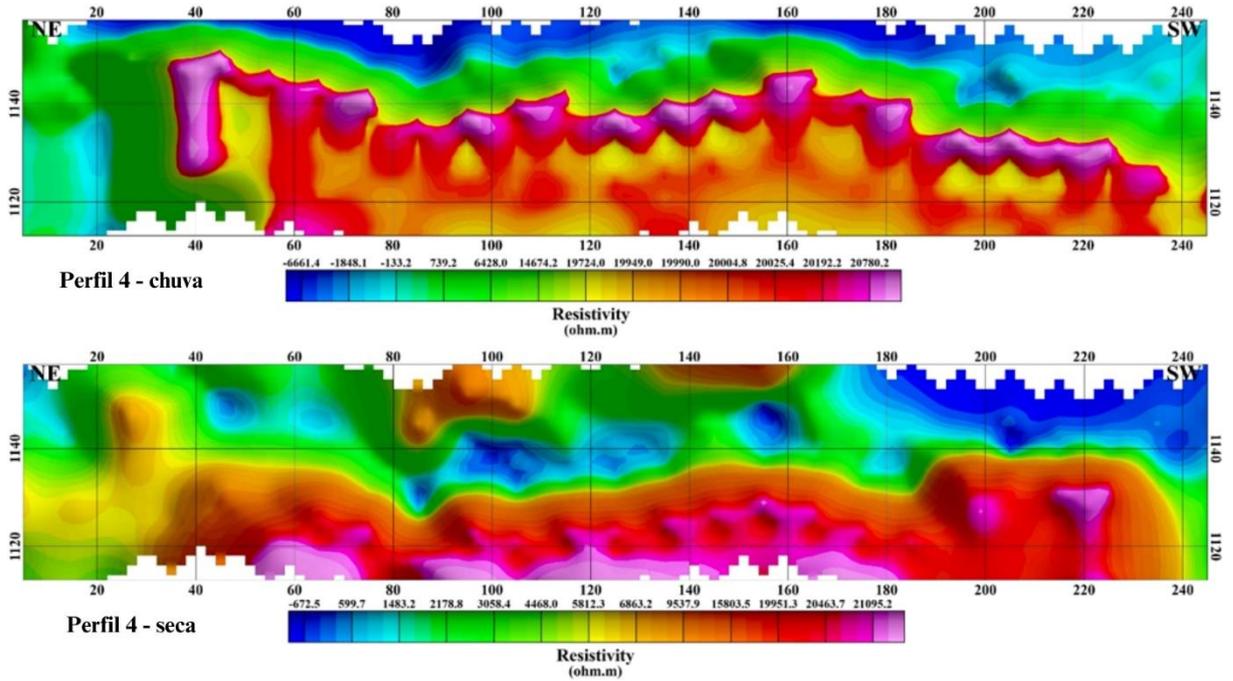


Figura 6.14 - Perfil de eletrorresistividade 4 nos período de seca e chuva (modificado de Barbosa & Oliveira 2023).

Em geral, é observado um rebaixamento no nível mais resistivo, o que pode significar uma saturação no substrato após o período chuvoso, comprometendo a estabilidade de certas áreas.

CAPÍTULO 7

INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Ao integrar os diversos conjuntos de dados disponíveis na área de estudo, é possível obter uma compreensão mais abrangente e precisa da configuração geológica e geotécnica. Por exemplo, a combinação de métodos geofísicos permite inferir com maior precisão as estruturas locais.

No ano de 2023, foi realizado um novo mapeamento geológico, na escala de 1:10000 (Figura 2.4), a fim de entender como a geomorfologia, litologias, estruturas geológicas e a alteração do meio potencializam a ocorrência de movimentos de massa (Barbosa & Oliveira 2023; Cardoso *et al.* 2023; Oliveira 2023).

A análise radiométrica auxiliou no mapeamento geológico da área, integrando-se aos dados geológicos de Oliveira (2023; Figura 7.1). As unidades litológicas com altas concentrações de urânio e potássio consistem nas litologias do Supergrupo Minas, onde a Formação Cauê apresenta maiores níveis de U e de forma anômala, valores altos de Th na parte oeste da área (Oliveira 2023). As Formações Gandarela e Cercadinho também apresentam maior concentração de U, na parte sul da área. A Formação Moeda apresenta maiores concentrações de K, devido a presença de níveis sericíticos distribuídos nos afloramentos.

A sequência metassedimentar química/pelítica do Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima, apresenta alta concentração de Th e K, e ocorrem no noroeste e nordeste da área.

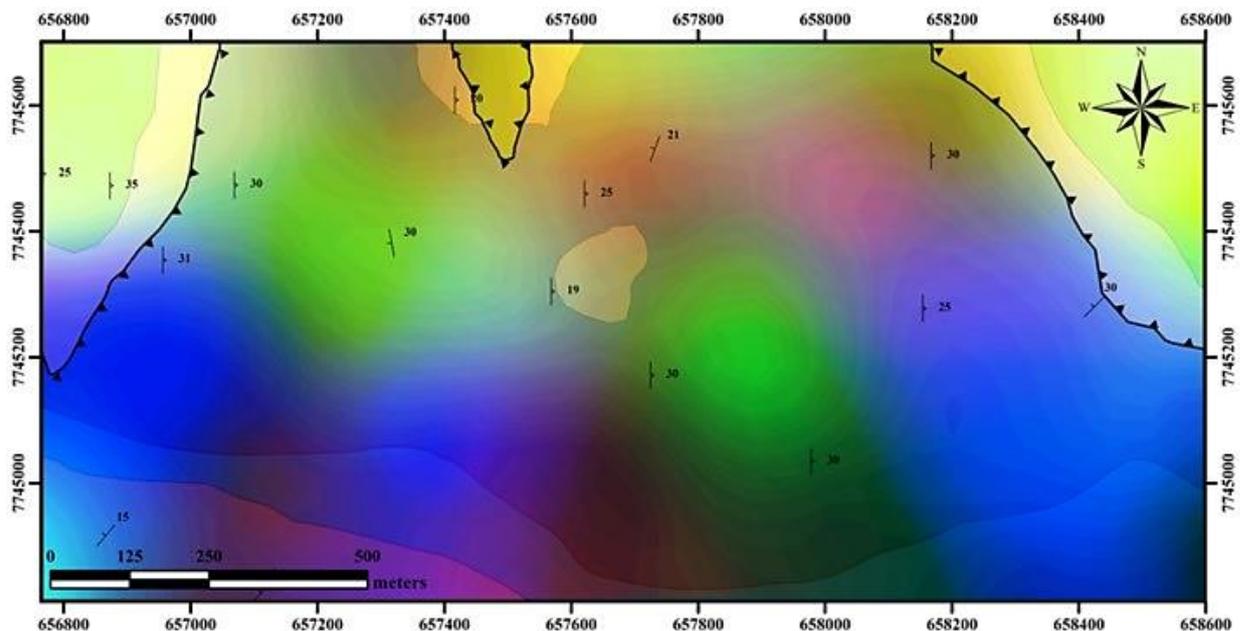


Figura 7.1 - Mapa radiométrico integrado ao mapa litológico de Oliveira (2023).

A magnetometria do levantamento aéreo caracteriza as litologias do Supergrupo Minas por forte magnetização, enquanto as litologias do Supergrupo Rio das Velhas são fracamente magnetizadas (Figura 7.2). O comportamento das anomalias do Supergrupo Minas se deve a influência dos itabiritos da Formação Cauê, exceto nas proximidades da zona de falha São Bento, onde é observado um padrão de menor susceptibilidade magnética, provavelmente devido a percolação de água nas zonas de fraqueza.

As estruturas observadas no mapa magnetométrico apresentam uma direção primária NW-SE e uma direção secundária EW.

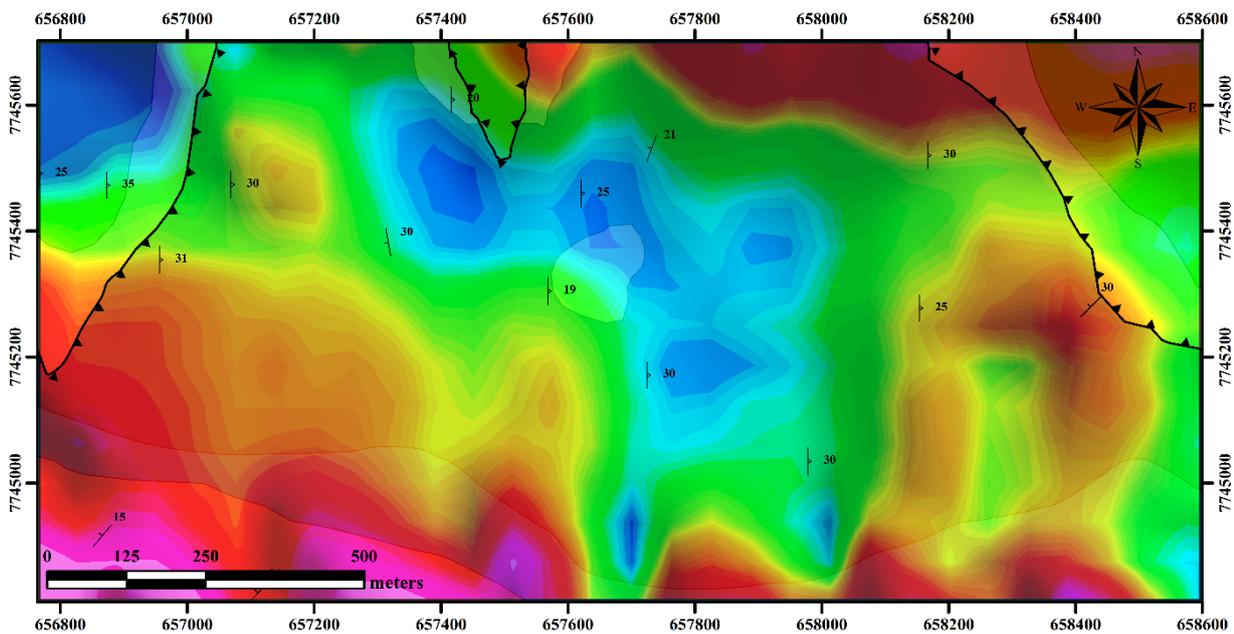


Figura 7.2 - Mapa magnetométrico integrado ao mapa geológico de Oliveira (2023).

A deconvolução de Euler (Reid *et al.* 1990) foi calculada em 18 perfis EW, espaçados a 50m, usando o software Euler 1.15 (Barbosa & Oliveira 2023) para estimar a profundidade de estruturas planares que geraram anomalias. A análise das estruturas observadas por essa técnica permite afirmar que a área é polideformada, com várias discontinuidades que podem favorecer movimentos de massa. Destaca-se a coerência entre as principais direções observadas pela deconvolução de dados regionais e as direções observadas nos mapas de declividade.

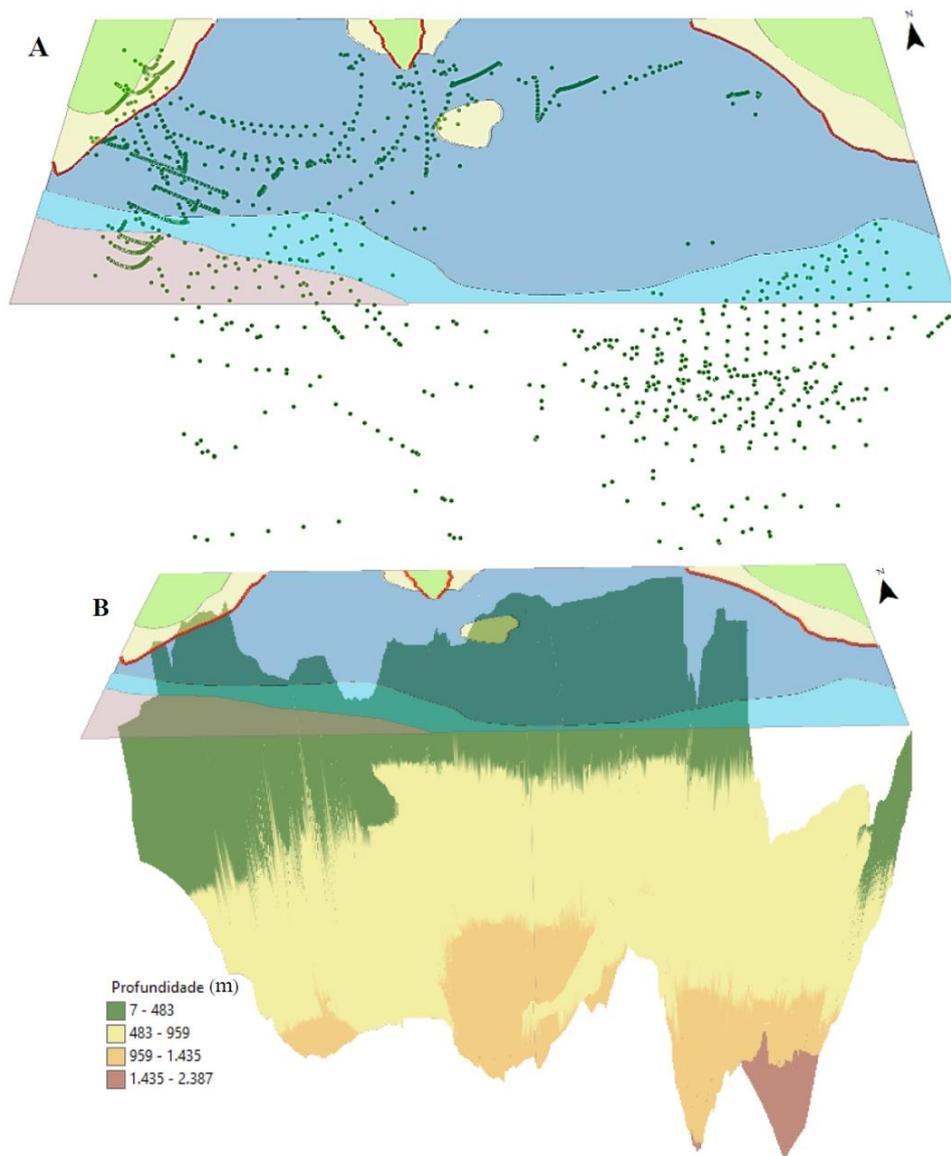


Figura 7.3 - Produto da deconvolução de Euler, mostrando estruturas profundas mergulhando para W e E, principalmente. (A) Localização estimada das fontes de anomalia magnética e (B) suas profundidades médias (Oliveira 2023).

Do processamento de dados adquiridos em levantamentos terrestres, a magnetometria permitiu observar em profundidade a influência estrutural da zona de falha de São Bento e, através de sua deconvolução, o comportamento de falhas em profundidade (Figura 7.4). É possível observar fontes de anomalias magnéticas mais profundas próximas ao traçado da Zona de falha de São Bento.

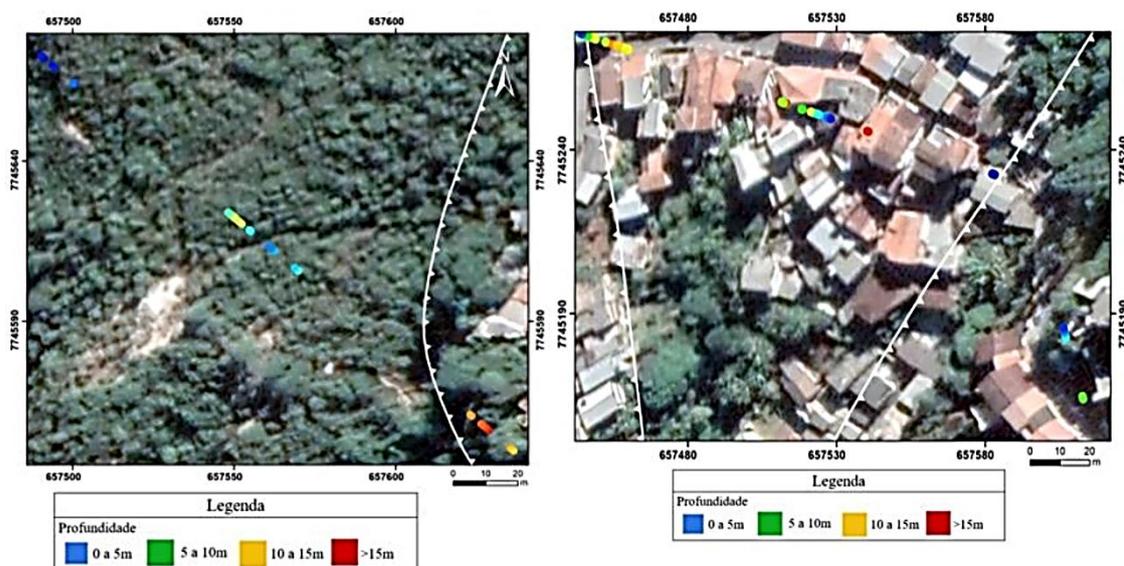


Figura 7.4 - Resultado da Deconvolução de Euler nas linhas ao norte da área, apresentadas na Figura 6.9. (Modificado de Reis 2022).

A gravimetria, de forma análoga, permitiu visualizar em profundidade contrastes interessantes. Alguns baixos gravimétricos puderam ser interpretadas como possíveis galerias abandonadas de mineração, visto que as galerias de mineração na área têm preferencialmente direção NS. Essa hipótese é corroborada com a análise conjunta dos dados de gravimetria e eletrorresistividade locais, onde uma região de baixo gravimétrico coincide com uma região de alta resistividade (indicadas pelas setas pretas na Figura 7.5).

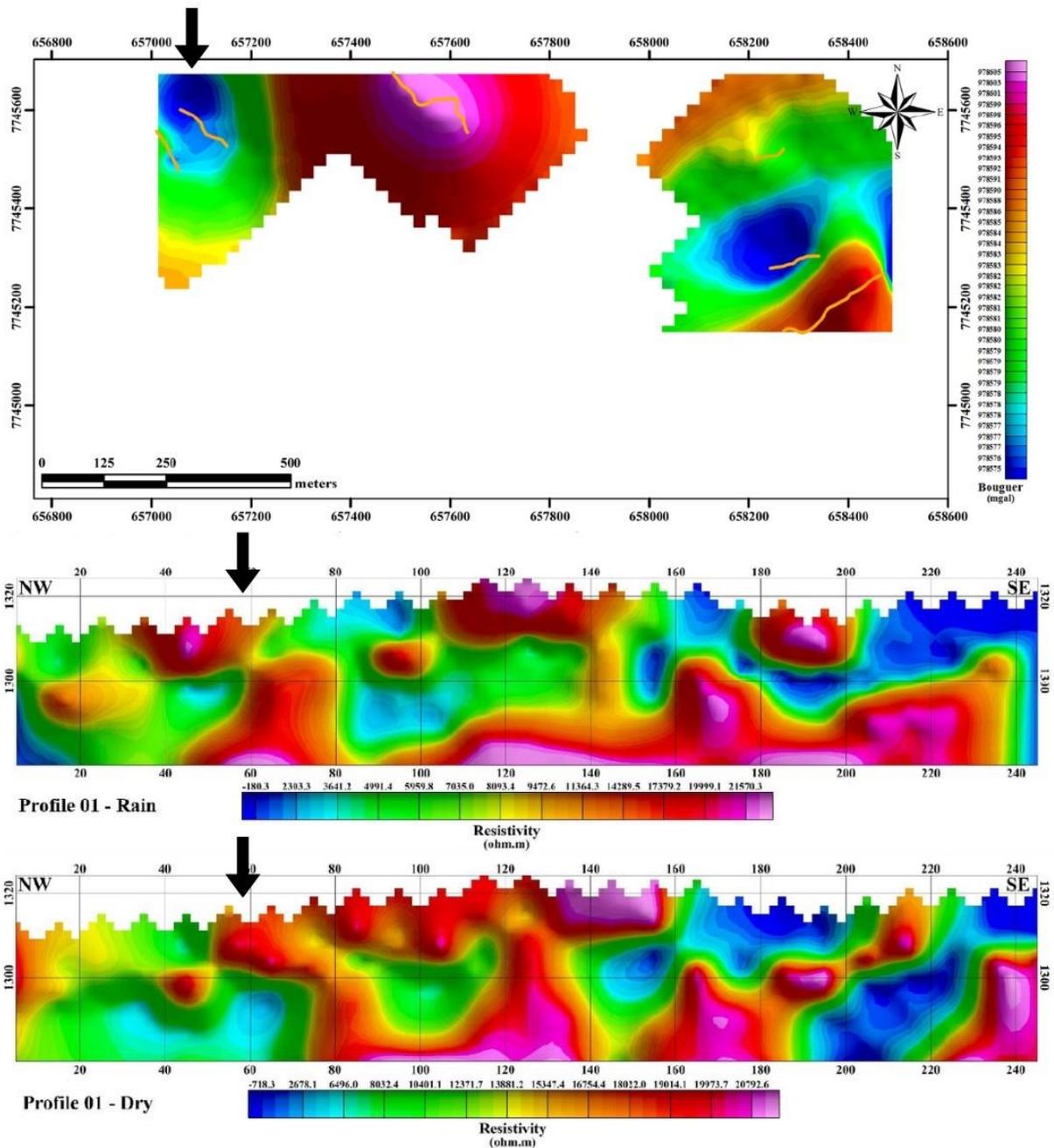


Figura 7.5 - Comparação dos dados de gravimetria (A) e eletrorresistividade (B) no perfil 1.

Essa mesma região apresenta valores menores de resistividade no período de seca após o período chuvoso, o que pode indicar o acúmulo de água em subsuperfície.

A eletrorresistividade realizada durante os períodos seco e chuvoso (figuras 6.11 a 6.14) permitiu observar a variação de saturação do solo. A integração da deconvolução de Euler, dados terrestres e resistividade mostrou correlação entre baixas resistividades e discontinuidades definidas por anomalias magnéticas e gravimétricas. Assim, as discontinuidades magnéticas e gravimétricas facilitam a percolação da água (baixa resistividade) e caracterizam áreas com potencial risco geotécnico

CAPÍTULO 8

CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

As investigações geotécnicas realizadas (Figura 8,1) foram programadas a partir das áreas anômalas apresentadas no capítulo anterior, além da setorização preexistente na área (Goes *et al.* 2016). Os principais tipos de movimentos de massa observados na área são deslizamentos, queda/tombamento de blocos, fluxo de massa e rastejo. Sendo o último, o mais atuante na região do bairro Taquaral e com maior potencial de geração de danos, provocando diversas patologias nas residências no ano de 2022.

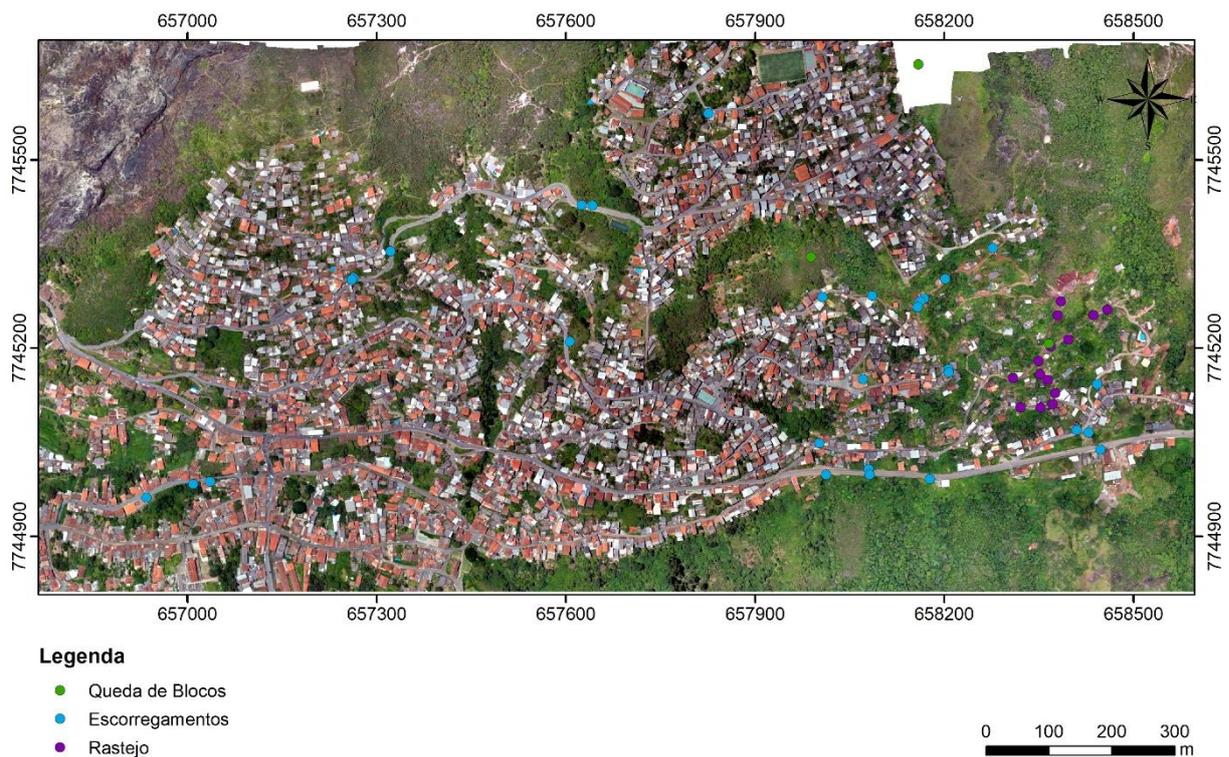


Figura 8.1 - Mapa de pontos classificados de acordo com o tipo de movimento de massa.

A Figura 8.2 apresenta alguns exemplos de movimentos de massa e danos causados por eles.



Figura 8.2 - Mapa de pontos visitados em campo, com exemplos de acidentes geotécnicos.

Em alguns locais, foram observados novos movimentos de massa, que surgiram associados a movimentos mais abrangentes. Um exemplo claro ocorre no Bairro Taquaral, onde uma área com risco de queda de blocos surgiu devido aos movimentos provocados pelo rastejo (Figura 8.3).



Figura 8.3 - Ocorrência de queda de blocos em meio a área de rastejo no bairro Taquaral.

No mapeamento realizado por Oliveira (2023), o autor identifica o principal substrato relacionado ao rastejo (Figura 8.4), um solo argiloso a arenoso, ferruginoso com clastos de canga e quartzito. Além disso, observa-se que os planos de abatimento se restringem a essa camada superficial, sem alcançar a rocha subjacente, sugerindo que o deslizamento está condicionado à presença do solo ferruginoso.

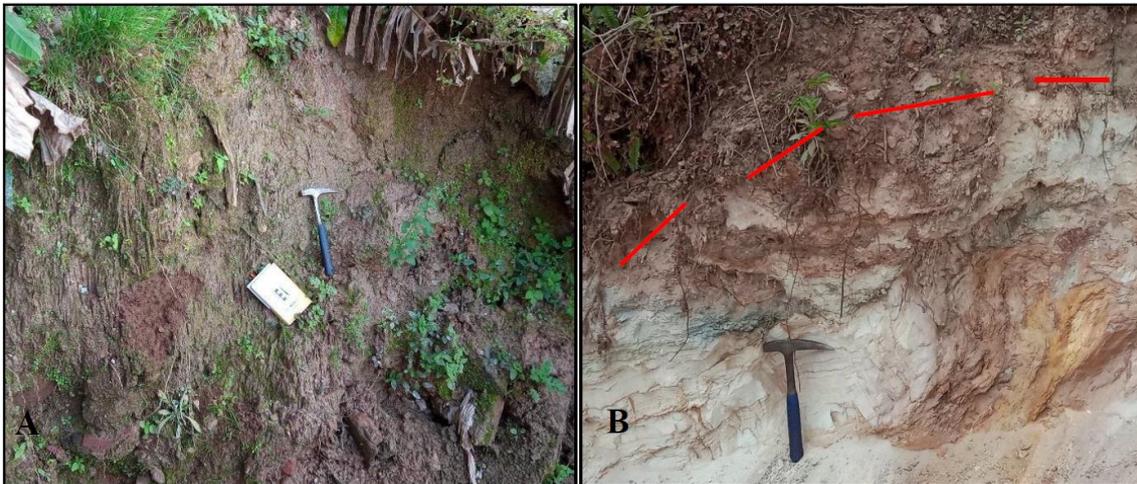


Figura 8.4 - (A) Substrato relacionado ao rastejo no Bairro Taquaral e (B) o contato com o quartzito da Formação Moeda (Oliveira 2023).

A partir dos levantamentos em campo, foi possível mapear a ocorrência desse solo e foram observadas diversas cicatrizes de escorregamentos anteriores (observáveis também na ortofoto; Figura 8.5A). Além disso, a região engloba os perfis de eletrorresistividade 3 e 4, onde foi observada uma possível saturação após o período chuvoso (Figuras 6.13 e 6.14). Assim, o setor de risco associado foi atualizado, e sua área aumentada (Figura 8.5B). Vale ressaltar que parte da área expandida, apesar de não abranger residências, foram incluídas, pois tratam-se de vias de acesso com movimento de pessoas.

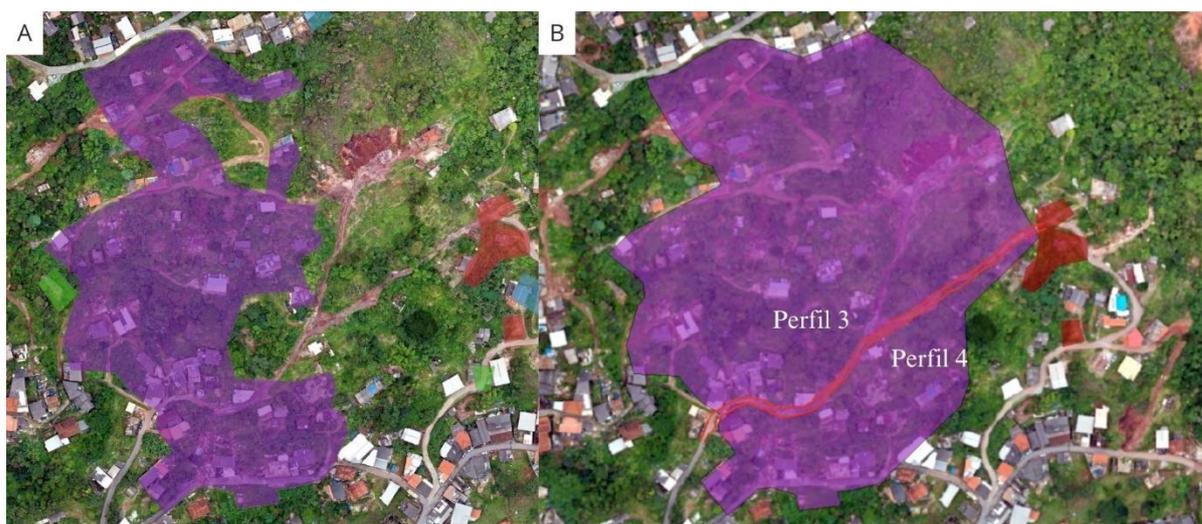


Figura 8.5 - (A) Área original de rastejo no Taquaral e (B) área de expansão sugerida, em vermelho, os perfis de eletrorresistividade.

Nas ocorrência de queda de blocos do Taquaral, observa-se uma relação do movimento de massa com blocos de canga individualizados por fraturas subverticais que mergulham para SE e NE. Em outros bairros, em geral, a queda de blocos (Figura 8.6) é condicionada por alterações feitas pela mineração do século XVIII e por construções contemporâneas (Sobreira 2014).



Figura 8.6 - Blocos soltos observados em algumas partes da área.

Os deslizamentos estão presentes em todos os cinco bairros abrangidos pela área de estudo, sendo todos de baixa profundidade, e ocorrem em encostas que foram modificadas pela atividade humana, afetando diferentes tipos de rochas que exibem um alto grau de alteração. Algumas áreas de maior risco puderam ser observadas através da ortofoto (Figura 8.7), permitindo a delimitação de novos setores de risco. Então, novas áreas de deslizamentos e fluxo de massa foram definidas a partir das ocorrências no primeiro semestre de 2022.



Figura 8.7 - Exemplos de deslizamentos observados.

Assim, um novo mapa de setorização de risco foi produzido (Figura 8.8), como uma sugestão de ampliação das áreas de risco previamente definidas.

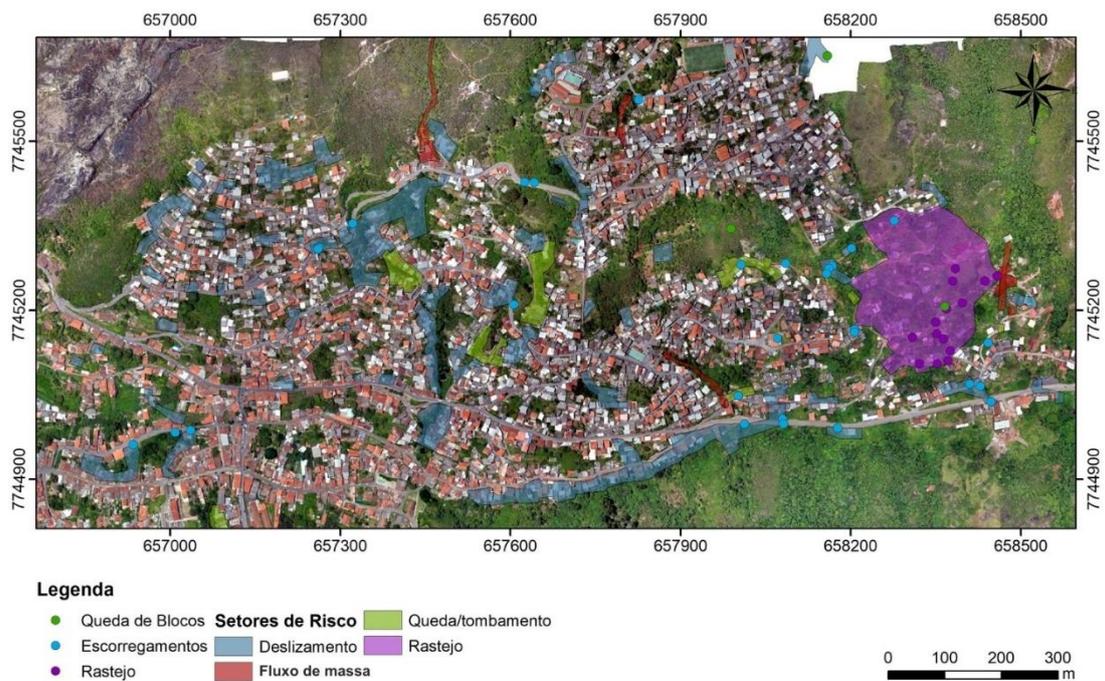


Figura 8.8 - Mapa de setorização de risco, com as áreas atualizadas.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

O presente trabalho relaciona métodos geofísicos aos métodos de investigação geotécnica em áreas urbanas, uma abordagem de baixo custo, não invasiva e facilmente replicável em várias localidades. A combinação de vários métodos de investigação permite uma análise robusta e precisa do terreno.

A gamaespectrometria possibilitou um mapeamento geológico detalhado, destacando diferentes unidades aflorantes (Oliveira 2023). A gravimetria, além de auxiliar no mapeamento geológico, levantou a hipótese da existência de uma galeria de mineração abandonada, que pode interferir na estabilidade local. A magnetometria mostrou estruturas locais associadas a Zona de Falha de São Bento, assim como suas respectivas profundidades que, combinadas com a eletrorresistividade, permitiram inferir propriedades subsuperficiais das rochas aflorantes (Reis 2022). Além disso, o contraste de resistividade nos diferentes períodos climáticos mostrou que as estruturas controlam o fluxo de água na subsuperfície, o principal gatilho para movimentos de massa (Cardoso *et al.* 2023).

A aerofotogrametria mostrou-se particularmente valiosa, fornecendo produtos de alta qualidade que possibilitaram a identificação precisa de áreas críticas a serem investigadas. Além disso, possibilitou análises remotas em locais de difícil acesso e com baixos níveis de segurança, contribuindo para um entendimento abrangente da área de estudo por meio dos modelos digitais gerados.

Por meio da cartografia geotécnica realizada, identificaram-se novas áreas com susceptibilidade a movimentos de massa, enquanto algumas outras foram atualizadas. Essas informações servem como sugestões de locais nos quais o poder público deve direcionar maior atenção e investimento.

Assim, destaca-se a importância desses estudos para garantir a segurança e o desenvolvimento sustentável da região. Em resumo, a integração de dados geofísicos, geológicos, geotécnicos e aerofotogramétricos permitiu obter informações valiosas sobre a área, possibilitando uma melhor compreensão dos riscos geotécnicos e distribuindo tais riscos de acordo com a configuração geológica da área, podendo auxiliar em futuras tomadas de decisão em relação a intervenções pelos órgãos competentes e planejamento urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Almeida, L. G.; Endo, I.; Fonseca, M. A. 2002. Sistema de *nappes* na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. SBG, Congr. Bras. Geol, v. 41,
- Almeida L. G., Castro P. de T. A., Endo I., Fonseca M. A.. 2005. O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica. Rev. Bras. de Geoc. 35(2):177-186.
- 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, M. S. C. & Oliveira, L. A. S. 2023. Geophysics applied to geotechnical study in Ouro Preto, MG – Brazil. Disponível em https://seg.org/gwb_projects/brazil-2/
- BITAR, O. Y. 2014. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1: 25.000: nota técnica explicativa**. IPT; CPRM.
- Bortolozzo, 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.
- Cardoso *et al.* 2022. **Geophysics Applied to Geotechnical Studies in Ouro Preto – MG**. International Meeting for Applied Geoscience & Energy (IMAGE) – Houston, TX.
- Cardoso *et al.* 2023. **Geophysics Applied to Geotechnical Studies in Ouro Preto, MG-Brazil – Part 2**. International Meeting for Applied Geoscience & Energy (IMAGE) – Houston, TX.
- Carvalho E.T. 1982. Carta Geotécnica de Ouro Preto. MS Dissertation. – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, p.30-50.
- CODEMG, 2001. Levantamento Aerogeofísico 2001. Área02. Data set accessed 20 March 2022 at <http://www.codemig.com.br/atuacao/mineracao/levantamento-aerogeofisico/programa-2001>.
- Dorr J. V. N. II., 1969. *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U. S. Geological Survey Prof. Paper 641-A, 110 p.
- Dos Santos, Renato & Galo, Mauricio & Carrilho, André & Pessoa, Guilherme. (2018). Uso do algoritmo alpha shape na extração de contornos de edificações a partir de dados LiDAR / The use of Alpha Shape Algorithm in the Building Boundaries Extraction from LiDAR data.
- Endo I, Oliveira A. H. de. 2005. Projeto Córrego do Feijão: Estratigrafia e Arcabouço Estrutural da Mina Córrego do Feijão, Quadrilátero Ferrífero, MG. 42 p. Relatório Interno – Convênio UFOP/CVRD/FG.
- Endo I., Galbiatti H.F., Delgado C.E.R., Oliveira M.M.F. de, Zapparoli A. de C., Moura L.G.B. de, Peres G.G., Oliveira A.H. de, Zavaglia G., Danderfer F.A., Gomes C.J.S., Carneiro M.A., Nalini Jr. H.A., Castro P de T.A., Suita M.T. de F., Tazava E., Lana C. de C., Martins-Neto M.A., Martins M. de S., Ferreira F.F.A., Franco A.P., Almeida L.G., Rossi D.Q., Angeli G., Madeira T.J.A., Piassa L.R.A., Mariano D.F., Carlos D.U. 2019a. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br.

Cardoso, G. N. 2023, Cartografia Geotécnica na área urbana da encosta oriental da Serra de Ouro Preto – MG.

Endo I., Delgado C.E.R., Oliveira M.M.F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D.U., Galbiatti H.F., Castro P. de T.A., Saita M.T. de F., Barbosa M.S.C., Lana C.E., Moura L.G.B. de. 2019b. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: www.qfe2050.ufop.br.

Farina F., Albert C., Lana C.. 2015. The Neoproterozoic transition between medium and high-K granitoids: clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). *Prec. Res.* 266, 375–394;

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, 102(3-4), 85-98.

Freitas F. M., Pinheiro M. A. P., Novo T. A., Magalhães J. R., Marinho M. de S. 2019. *U-Pb ages for metasedimentary rocks of the Catarina Mendes Formation, Quadrilátero Ferrífero*. Anais do 4º Simpósio do Cráton do São Francisco. Aracaju;

Gair J. E.. 1958. *The Sabará Formation*. In: *Symposium on Stratigraphy of Minas Series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Bol. SBG, 7(2):68-69.

Gamarra R.M. 2020. Drones: guia básico para mapeamento aéreo. Campo Grande, Editora UFMS. P 61.

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*.

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

Lana, C. E. A geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero. Castro PTA, Endro I., Gandini AL (orgs), 2020.

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).

Lana C., Alkmim F. F., Armstrong R., Scholz R., Romano R., Nalini Jr. H. A.. 2013. *The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil*. *Prec. Res.* 231, 157–173.

Lisle, R. J.; Brabham, P. J.; Barnes, J. W. 2014. Mapeamento Geológico Básico-: Guia Geológico de Campo. Bookman Editora, p 48-52.

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

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

Luiz J. G. & Silva L. M. C.. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém, Universidade Federal do Pará/CEJUP. 311p;

Noce C. M.. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 129 p.

Oliveira, R. A.; Tommaselli, A. M. G. 2014. Avaliação de uma técnica para geração de modelos digitais de superfície utilizando múltiplas imagens. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, p. 257-278,.

- Oliveira, F.A. 2023. Análise geológica da encosta oriental da Serra de Ouro Preto - MG. Monografia n. 474, Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 88.
- Pinheiro, A. L., Sobreira, F. G., & Lana, M. S. 2004. Riscos geológicos na cidade histórica de Ouro Preto. Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Anais. Florianópolis: GEDN/UFSC, 87-101
- Reis, P. 2023. Análise geofísica aplicada à caracterização de risco geotécnico em áreas urbanas associado à Zona de Cisalhamento São Bento, Ouro Preto - MG. Monografia n. 466, Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 64.
- Renger F. E., Noce C. M., Romano A. W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geonomos* 2, 1-11.
- Rodrigues D.A.; Garllado A.L. 2018. Vantagens da aerofotogrametria por drone na obtenção de dados topográficos em estudos de lixões e aterros sanitários. Anais VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. São Paulo. 8p.
- Romano R., Lana C., Alkmim F. F., Stevens G., Armstrong R.. 2013. Stabilization of the southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Prec. Res.* 224, 143–159;
- Sant'anna, S. N.; Bacellar, L. A. P.; Alameda-Hernández, P. M. 2021. Uso da fotogrametria digital terrestre na classificação de maciços rochosos fraturados. *Revista de Geociências do Nordeste*, p. 111-122.
- Schorscher H. D., 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento Arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Anais Acad. Bras. Ciências*, 51(4): 767-7
- Sobreira F.G. & Fonseca M.A. 2001. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. *Revista Geotecnia*, 92: 5-28.
- Sobreira F.G. 2014. Mineração do ouro no período colonial: alterações paisagísticas antrópicas na serra de Ouro Preto, Minas Gerais. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 5(1):55-65.
- Souza L.A.P. 2013. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo. São Paulo. P-8-15.
- 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
- Telford W. M., Geldart L.P., Sheriff R.E.. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press. 770p;
- USGS, United States Geological Survey. 2016. Landslide Types and Processes. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>.
- 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
- Varajão A.F.D.C., 1988. Gênese das jazidas de caulinitas e Bauxita de Vargem dos olhos; Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação de Mestrado 168 p.
- De Vallejo, L. G., & Ferrer, M. 2011. *Geological engineering*. CRC press.
- Wolf, P. R.; Dewitt B. A.; Wilkinson, B. E. 2014. Elements Of Photogrammetry With Applications *In* Gis. 4 ed, Mc Graw Hill.
- Zuquette, L. V. 1993. *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico: fundamentos e guia para elaboração* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).