

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AEROFOTOGRAMETRIA E ELETRORRESISTIVIDADE APLICADAS À ARQUEOLOGIA: PARQUE ARQUEOLÓGICO DO MORRO DA QUEIMADA, OURO PRETO - MG

Gustavo Wisinewski Gomes

MONOGRAFIA nº 412

AEROFOTOGRAMETRIA E ELETRORRESISTIVIDADE APLICADAS À ARQUEOLOGIA: PARQUE ARQUEOLÓGICO DO MORRO DA QUEIMADA, OURO PRETO - MG



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 412

AEROFOTOGRAMETRIA E ELETRORRESISTIVIDADE APLICADAS À ARQUEOLOGIA: PARQUE ARQUEOLÓGICO DO MORRO DA QUEIMADA, OURO PRETO - MG

Gustavo Wisinewski Gomes

Orientadora

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

Co-Orientador

MSc. Luis Artur Souza Oliveira

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentada ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/2.

OURO PRETO

2021

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

Direitos de tradução e reprodução reservados.

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

Revisão geral: Gustavo Wisinewski Gomes

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

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633a Gomes, Gustavo Wisinewski.

Aerofotogrametria e eletrorresistividade aplicadas à arqueologia [manuscrito]: Parque Arqueológico do Morro da Queimada, Ouro Preto - MG. / Gustavo Wisinewski Gomes. - 2021. 86 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa. Coorientador: Me. Luis Artur Souza Oliveira. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica.

1. Geofísica. 2. Arqueologia. 3. Aerofotogrametria. I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. II. Oliveira, Luis Artur Souza. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.3:902.2

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

http://www.sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: AEROFOTOGRAMETRIA E ELETRORRESISTIVIDADE APLICADAS À ARQUEOLOGIA: PARQUE ARQUEOLÓGICO DO MORRO DA QUEIMADA, OURO PRETO - MG.

AUTOR: Gustavo Wisinewski Gomes

ORIENTADORA: Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Aprovado em: 15/10/2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. a Dr. a Maria Sílvia Carvalho Barbosa Lina Galla DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Joney Justo da Silva DEGEO/UFOP

Msc. Guilherme A. S. Prosdocimi Guillerne Prosdocini Neogeo Geotecnologia

Ouro Preto, 15/10/2021



Agradecimentos

Agradeço à minha mãe Cláudia e ao meu pai Alexandre pelo apoio durante toda a minha graduação, principalmente pela confiança e suporte fornecidos para a realização de meus objetivos. Aos meus irmãos Giovanni e Giancarlo, que mesmo distantes me lembram da razão de meus esforços.

Aos amigos de Santos, em especial Lucas, Matheus, Guilherme e Caíque. À Geologia 15.2, à SGA e a todas as amizades construídas pela Geologia, em especial Iago, Sérgio, Arthur, Pedro, Ana Paula, Wilker e Carolina.

À professora Maria Sílvia e ao Luis, pelos ensinamentos, orientação e amizade. A todos da Neogeo Geotecnologia, que contribuíram imensamente para o meu crescimento pessoal e profissional e para a realização deste trabalho.

À República Complexo, seus atuais moradores, ex-alunos e homenageados, pelos ensinamentos e momentos compartilhados.

À Caroline, pelo apoio e motivação nos momentos finais de minha graduação.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto, por terem me proporcionado um ensino público superior gratuito e de qualidade durante toda a minha graduação.

SUMÁRIO

SUI ÍNI ÍNI RES ABS	RADECIMENTOSMÁRIO DICE DE FIGURASDICE DE TABELASSUMOSTRACT	xixiiixviixix
	APRESENTAÇÃO	
	LOCALIZAÇÃO	
1.3	OBJETIVOS	3
1.4	JUSTIFICATIVA	4
1.5	METODOLOGIAS	4
	1.5.1 Revisão bibliográfica	4
	1.5.2 Atividades de campo	
	1.5.3 Aerofotogrametria	5
	1.5.4 Eletrorresistividade	6
	1.5.5 Processamento dos dados	6
	1.5.6 Interpretação dos dados	7
	1.5.7 Escrita da Monografia	7
2 (CONTEXTO GEOLÓGICO/ARQUEOLÓGICO	9
2.1	CONTEXTO GEOLÓGICO	9
	2.1.1 Unidades litoestratigráficas	10
	2.1.2 Geologia do Parque Arqueológico do Morro da Queimada	12
2.2	CONTEXTO ARQUEOLÓGICO	14
3 1	FOTOGRAMETRIA	17
3.1	INTRODUÇÃO	17
3.2	AEROFOTOGRAMETRIA	18
	3.2.1 Método e aplicação	18
	3.2.2 Operação do equipamento	19
	3.2.3 Topografia	20
	3.2.4 Processamento Digital de Imagens (PDI)	21
	3.2.5 Legislação	23
4 I	MÉTODOS GEOFÍSICOS	25
4.1	INTRODUÇÃO	25
42	ELETRORRESISTIVIDADE	26

	4.2.1 Método	26
	4.2.2 Tipos de levantamentos	30
	4.2.3 Arranjos de campo	32
4.3	INVERSÃO GEOFÍSICA	35
4.4	GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA	36
5	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	39
5.1	AEROFOTOGRAMETRIA	39
	5.1.1 Etapa pré-aquisição	39
	5.1.2 Etapa de aquisição	41
	5.1.3 Etapa de processamento	43
5.2	ELETRORRESISTIVIDADE	50
	5.2.1 Etapa pré-aquisição	51
	5.2.2 Etapa de aquisição	52
	5.2.3 Etapa de processamento	54
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
6.1	AEROFOTOGRAMETRIA	57
	6.1.1 Comparação de produtos	60
6.2	ELETRORRESISTIVIDADE	64
	6.2.1 Análise conjunta dos dados de Eletrorresistividade	66
	6.2.2 Análise em grupos dos dados de Eletrorresistividade	68
6.3		
	CONCLUSÕES	81
RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

_	Mapa representativo da delimitação dos domínios do Parque Arqueológico do Morro da Queimada
Figura 1.2 -	Mapa representativo das vias de acesso ao Parque Arqueológico do Morro da Queimada
Figura 2.1 -	Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero9
Figura 2.2 -	Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero12
Figura 2.3 –	Contexto geológico do Parque Arqueológico do Morro da Queimada13
_	Vista aérea das escavações no entorno dos bairros Morro da Queimada, Santana e Lajes15
Figura 2.5 -	- Delimitação da área central das ruínas do Morro da Queimada associadas às atividades de mineração do século XVIII
Figura 3.1 -	Diferenciação entre as operações VLOS, EVLOS e BVLOS24
Figura 4.1 -	Classificação de métodos, técnicas e arranjos
Figura 4.2 -	Sistema representativo para a definição da relação resistividade-resistência27
Figura 4.3 -	Fluxo de corrente a partir de um único eletrodo em subsuperfície28
Figura 4.4 -	Intervalos típicos de resistividade para diferentes materiais geológicos29
Figura 4.5 - 1	Representação dos elementos envolvidos em uma aquisição de Eletrorresistividade
Figura 4.6 -	Representação de uma aquisição por Sondagem Elétrica Vertical31
Figura 4.7 -	Técnica do Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo
Figura 4.8 -	Arranjo Wenner
Figura 4.9 -	Arranjo Schlumberger
Figura 4.10	– Arranjo Gradiente
O	 Exemplo de dados de Eletrorresistividade em uma rotina de inversão. A: dado medido; B: dado calculado; C: dado invertido
Figura 5.1 -	Mapa de localização dos pontos de apoio na área de investigação40
Figura 5.2 -	Parâmetros referentes às missões dos voos realizados. A: missão 1; B: missão 241
	- A: drone posicionado na área de pouso; B: drone posicionado na área de decolagem
_	Malhas de voo readequadas para a realização das aquisições. A: missão 1; B: missão 2

Figura 5.5	 Delimitação da área de decolagem no contexto do Parque e visualização do momento de decolagem da primeira missão de aquisição
Figura 5.6	6 - Fluxograma representativo da etapa de processamento de dados aerofotogramétricos
Figura 5.7 -	- Interface do <i>software RTKconv</i> e inserção dos dados adquiridos durante os voos.
Figura 5.8 -	· Interface do software RTKpost e inserção dos dados adquiridos no RTKconv 44
Figura 5.9 -	· Interface do software T2R Geotagger
Figura 5.10	- Nuvem densa de pontos gerada para o projeto no <i>software Agisoft Metashape</i>
Figura 5.11	- Modelo digital de superfície gerado no software Agisoft Metashape 47
Figura 5.12	2 - Modelo digital de superfície e respectivas curvas de nível geradas a partir do mesmo no software Agisoft Metashape
Figura 5.13	- Ortofotomosaico gerado no software Agisoft Metashape
Figura 5.14	- Mapa com ortofotomosaico recortado e sobreposto à imagem <i>Google Satellite</i>
Figura 5.15	- Mapa com modelo digital de superfície recortado e sobreposto à imagem <i>Google Satellite</i>
Figura 5.16	- Equipamentos em campo durante as aquisições geofísicas
Figura 5.17	 Mapa de delimitação, em planta, da área de investigação geofísica e seções executadas.
Figura 6.1	- Mapa representativo dos limites dos produtos gerados, contextualizados com os limites do Parque
Figura 6.2 -	Identificação das porções classificadas e de feições associadas a escavações a partir do ortofotomosaico obtido
Figura 6.3 -	Identificação das porções classificadas e de feições associadas a escavações a partir do ortofotomosaico obtido, confrontadas com o modelo
Figura 6.4 -	- Comparação dos ortofotomosaicos referentes às aquisições com imagem <i>Google Satellite</i>
Figura 6.5 -	- Comparação dos modelos digitais de superfície. A : Fundação Gorceix, 2018; B : presente estudo, 2021
Figura 6.6 -	Comparação dos modelos digitais de superfície com aplicação de sombreamento. A: Fundação Gorceix, 2018; B : presente estudo, 2021
Figura 6.7 -	Comparação das curvas de nível geradas a partir dos modelos digitais de superfície
Figura 6.8 -	Modelos de resistividade representativos das seções invertidas L-01, L-02, L-03 e L-04
Figura 6.9 -	- Modelo de resistividade da seção invertida L-03, com a identificação de porções representativas das zonas definidas

_	 Mapa de delimitação, em planta, da área de investigação geofísica e seções executadas, em contextualização com o mapeamento geológico67
_	Modelos de resistividade das seções invertidas L-01 e L-02, com a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si
0	Modelos de resistividade das seções invertidas L-03 e L-04, com a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si
0	- Produtos contextualizados no <i>software Leapfrog Works</i> . A : curvas de nível geradas; B : superfície topográfica gerada
0	Ortofotomosaico contextualizado de acordo com a superfície topográfica gerada. A: visada para Norte; B: visada NE-SW; C: visada NW-SE75
0	- Contextualização de produtos gerados para o trabalho, em ambiente ridimensional georreferenciado
_	- Visualização dos lineamentos vetorizados a partir dos dados geofísicos no coftware Leapfrog Works
0	- Mapa de contextualização dos lineamentos interpretados com lineamentos e medidas estruturais presentes



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classes de RPA conforme peso máximo de decolagem	.23
Tabela 4.1 - Processos geológicos e suas influências nos valores de resistividade elétrica	.29



Resumo

O Parque Arqueológico do Morro da Queimada é um sítio arqueológico localizado na Serra de Ouro Preto, que abriga vestígios de residências e atividades minerárias dos séculos XVIII e XIX, sendo considerado um dos principais palcos da Sedição de 1720, conhecida como Revolta de Felipe dos Santos. Dado esse cenário histórico, estudos arqueológicos são realizados por pesquisadores da área da Museologia, os quais delimitaram este sítio com base em ruínas aflorantes existentes. No entanto, esses pesquisadores não possuem informações de subsuperfície, cujo conhecimento poderia agregar e auxiliar nos estudos em andamento. Assim, o objetivo deste trabalho consistiu na identificação de estruturas não aflorantes possivelmente relacionadas à captação de água em séculos passados e na validação de um procedimento de aquisição de dados. Para a realização do trabalho foram executados levantamentos de Eletrorresistividade (EL) e levantamentos aerofotogramétricos, os últimos com a utilização de um veículo aéreo não tripulado (VANT), que percorreu malhas de voo específicas para o desenvolvimento de um ortofotomosaico e de modelos digitais de elevação representativos do Parque. Os procedimentos adotados permitiram a geração de produtos aerofotogramétricos e geofísicos em duas e três dimensões, possibilitando interpretações acerca das condições da área tanto em superfície quanto em profundidade. Foram realizadas discussões acerca de condições geológicas, arqueológicas e topográficas da região, facultando a validação do procedimento de aquisição adotado e a compreensão dos condicionantes hídricos que possibilitaram a instalação de residências e o processo de beneficiamento mineral de ouro em séculos passados.

Palavras chave: aerofotogrametria, arqueologia, geofísica.

Abstract

The Morro da Queimada Archaeological Park is an archaeological site located in the mountain range of Ouro Preto, which contains remains of residences and mining activities from the 18th and 19th centuries, being considered one of the main stages of the 1720 Sedition, known as the Revolta de Felipe dos Santos. Given this historical setting, archaeological studies have been carried out by researchers in the area of Museology, who delimited this site based on the existing outcropping ruins. However, these researchers do not have subsurface information, whose knowledge could add and assist in ongoing studies. Thus, the objective of this work was to identify non-outcropping structures possibly related to water transfers in past centuries, and to validate a data acquisition procedure. To carry out the work, Electrical resistivity (EL) and aerophotogrammetric surveys were executed, the latter using an unmanned aerial vehicle (UAV), which covered specific flight missions for the development of an orthophotomosaic and of representative digital elevation models of the park. The adopted procedures allowed the generation of aerophotogrammetric and geophysical products in two and three dimensions, enabling interpretations about the conditions of the area both in surface and in depth. Discussions were held about the geological, archaeological and topographic conditions of the region, enabling the validation of the adopted acquisition procedure and the understanding of water conditions that enabled the installation of residences and the gold mineral processing in past centuries.

Key words: aerophotogrammetry, archaeology, geophysics.



1.1 APRESENTAÇÃO

A mineração da Vila Rica de Ouro Preto foi o principal expoente da exploração mineira brasileira nos séculos XVIII e XIX. Os primeiros depósitos de ouro explorados no estado, em aluviões, foram descobertos por bandeirantes, recebendo estes o nome de "faisqueiros" devido ao fato de as maiores partículas ao longo de rios e riachos "faiscarem" sob a luz do sol (Boxer 1969).

Quando o ouro de aluvião se mostrou escasso na região, iniciaram-se as procuras nas chamadas "rochas vivas", sendo efetuados trabalhos subterrâneos pelos mineiros, visando a descoberta de veios auríferos, gerando, com o processo, grandes "labirintos de tocas de topeiras" (Calógeras 1905).

No contexto da Serra de Ouro Preto, a região conhecida como Morro da Queimada sofreu alterações paisagísticas devido à ação antrópica relacionada à mineração, na época conhecida como "Corrida do Ouro". Podem ser visualizadas, na região e em seu entorno, escarpas e vales formados por escavações, sendo perceptível a presença de terrenos com maior resistência como testemunhos do relevo anterior (Sobreira 2014). O local apresenta diversas galerias, sarilhos e principalmente um conjunto de ruínas de habitações e estruturas de beneficiamento mineral (Tavares 2009), caracterizando-se como um rico ambiente para o desenvolvimento de estudos de diversas áreas de pesquisa.

Este estudo apresenta-se, inicialmente, como uma validação de procedimento de aquisição, por meio da integração ordenada de levantamentos aerofotogramétricos e levantamentos geofísicos terrestres. Primeiramente, foram desenvolvidos os levantamentos aerofotogramétricos, que permitiram a geração de produtos, como modelos digitais de elevação e ortofotomosaicos. Tais produtos propiciaram maior entendimento sobre as condições de superfície atuais da região, e auxiliaram na delimitação de áreas propícias à realização dos levantamentos geofísicos e, consequentemente, na geração de seus produtos.

Por conseguinte, foram desenvolvidas interpretações geológico-geofísicas a partir de inferências acerca de materiais em subsuperfície, utilizando-se dos produtos gerados a partir do emprego do método da Eletrorresistividade e de informações geológicas locais. Por meio das etapas de processamento e tratamento de dados de geofísica rasa, bem como de análise das assinaturas geoelétricas e de seus comportamentos no meio, foram dispostas diversas interpretações, que originaram importantes informações no que tange à realização e continuidade de estudos arqueológicos e históricos desenvolvidos na região. A observação de condições de superfície também possibilitou a realização de

interpretações acerca de características inerentes à área que podem ter facilitado sua ocupação em séculos passados.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo corresponde ao Parque Arqueológico do Morro da Queimada, que se encontra no município de Ouro Preto, estado de Minas Gerais, e que no contexto local corresponde a uma conexão do Morro São Sebastião ao Morro Santana. O Parque é limitado (Figura 1.1), segundo Oliveira (2009), a norte pela rua Rio Piracicaba, a oeste pela ladeira João de Paiva, a leste pelas ruas 15 de agosto, Serra Negra e 24 de junho, e a sul pela Rua Conselheiro Quintiliano, apresentando uma área de aproximadamente 125,25 hectares

O acesso pode ser realizado, a partir da capital Belo Horizonte – MG, pela rodovia BR-356/BR-040 em direção à Ouro Preto – MG, seguindo até a referida cidade, por um trajeto de aproximadamente 100 km. A região posiciona-se a cerca de 2 km do centro histórico de Ouro Preto e o acesso à entrada principal do parque é realizado, a partir da Praça Tiradentes, pela rua Barão de Camargos, que se torna rua Conselheiro Quintiliano, seguindo, posteriormente, pelas ruas Quinze de agosto, Marina Ferreira Guimarães e Nossa Sra. Das Graças. Essa última é percorrida por cerca de cem metros até o encontro de uma das entradas do parque (Figura 1.2).

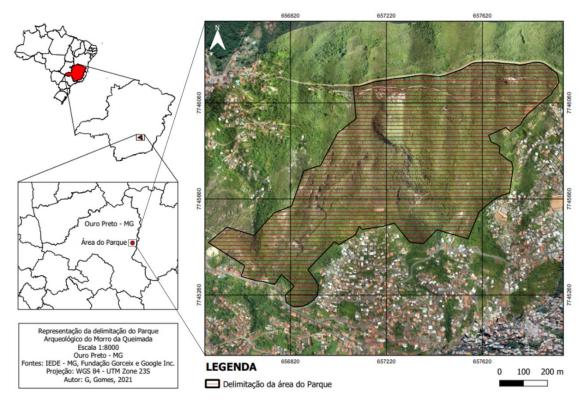


Figura 1.1 - Mapa representativo da delimitação dos domínios do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, modificado de Oliveira (2009).

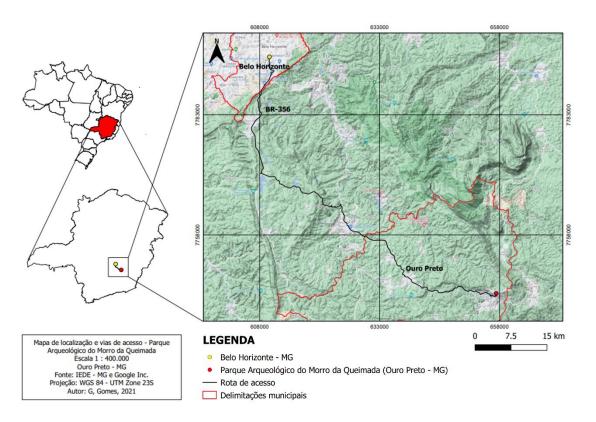


Figura 1.2 - Mapa representativo das vias de acesso ao Parque Arqueológico do Morro da Queimada.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a delimitação de estruturas condicionantes hídricas, possivelmente associadas a contextos geológico e arqueológico locais, por meio da utilização do método geofísico da Eletrorresistividade, já consagrado em estudos arqueológicos. Objetiva-se também a delimitação de condições superficiais e visuais da área de investigação, a partir da geração de produtos fotogramétricos, facultando possíveis associações aos contextos geológico e arqueológico e comparações com produtos gerados na mesma região em período anterior, possibilitando análises, sob diferentes aspectos, da dinâmica de alteração superficial intrínseca ao Parque. Desta forma, o trabalho visa contribuir com informações de subsuperfície e superfície ao contexto histórico do Parque.

Como objetivo específico apresenta-se a validação de um procedimento de aquisição ordenada e combinada de dados aerofotogramétricos e geofísicos, sendo o procedimento proposto executável principalmente em regiões que apresentam dificuldades operacionais, sendo citadas como exemplo de dificuldades ambientes de difícil acesso, ocorrência de vegetações densas, altas declividades, entre outras condições.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Parque Arqueológico do Morro da Queimada corresponde a uma importante fonte de diversas pesquisas, relacionadas especialmente às áreas de Arqueologia e História, principalmente por ser considerado um local de grande relevância histórica, e por ter sido palco de eventos que apresentam grande significado para a cidade de Ouro Preto e o estado de Minas Gerais.

O Morro da Queimada abriga vestígios de residências e atividades minerárias dos séculos XVIII e XIX, associados a "Corrida do Ouro" em território brasileiro. A área que atualmente abriga o Parque foi um dos principais palcos da Sedição de 1720, conhecida como Revolta de Felipe dos Santos.

Dado esse contexto histórico, as pesquisas desenvolvidas na região apresentam como foco de estudo ruínas aflorantes, sem levar em consideração possíveis estruturas que se encontram em subsuperfície. Assim, este trabalho consiste na verificação da existência de anomalias geofísicas em profundidade, possivelmente associadas aos contextos geológico e arqueológico local, que possam elevar a condição de patrimônio histórico e auxiliar eventuais interpretações por parte de pesquisadores que realizam projetos no Parque. A identificação de condições superficiais da área, por meio do emprego da Aerofotogrametria, busca a complementação de informações acerca do Parque e o balizamento de produtos, que possam adicionar fidedignidade às análises desenvolvidas.

Além disso, dificuldades operacionais em levantamentos geofísicos geralmente retardam e/ou impossibilitam a realização de aquisições, resultando em alterações de cronogramas, planejamentos e demais operações logísticas associadas, até mesmo em certos casos inviabilizando projetos. Por isso, nesse estudo é proposto um procedimento ordenado e combinado de levantamentos aerofotogramétricos e geofísicos, possibilitando o entendimento prévio das condições do terreno, por meio da análise e interpretação de produtos fotogramétricos representativos de condições atuais da área de investigação, com a finalidade de determinar regiões propícias ao desenvolvimento dos levantamentos geofísicos terrestres de acordo com os objetivos pretendidos.

1.5 METODOLOGIAS

O trabalho foi realizado conforme os itens descritos a seguir:

1.5.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica (preliminar, concomitante e após as atividades de campo) foi realizada por meio da leitura e revisão de livros, artigos científicos e trabalhos acadêmicos, relacionados ao tema do trabalho, podendo ser dividida em tópicos como "Eletrorresistividade", "Arqueologia", "Morro da

Queimada", "Aerofotogrametria" e "Contexto Geológico". As principais fontes de pesquisa foram os livros "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics" (Reynolds 2011), "Handbook of Geophysics and Archaeology" (Witten 2017), "Geofísica Aplicada: Métodos geoelétricos em Hidrogeologia" (Braga 2016), "Geofísica de exploração" (Kearey et al. 2009) e "Quadrilátero Ferrífero: Avanço do conhecimento nos últimos 50 anos" (Castro et al. 2020). Foram utilizadas como fontes e referências secundárias diversas publicações, devidamente citadas e referenciadas ao longo do texto.

1.5.2 Atividades de campo

Foram realizadas atividades de campo de reconhecimento da área, juntamente de museólogos vinculados ao Departamento de Museologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMUL-UFOP), para entendimento sobre pontos de interesse e dificuldades associadas à área. Também foram realizadas atividades de campo com a execução de levantamentos por *drone*, obedecendo configurações de voo próprias para posterior modelagem aerofotogramétrica em *softwares* específicos, e juntamente com a execução de levantamentos topográficos, com o objetivo de coleta de pontos de apoio georreferenciados para melhor acurácia dos produtos aerofotogramétricos. Por fim, foram realizadas as atividades de campo relacionadas aos levantamentos geofísicos, sendo executados protocolos inerentes aos objetivos pretendidos para aquisição dos dados.

1.5.3 Aerofotogrametria

Foram realizados levantamentos aéreos, com a finalidade de gerar produtos aerofotogramétricos representativos do Parque em *softwares* específicos, caracterizando assim a etapa de Aerofotogrametria. Foi utilizado um *drone* (*Phantom 4 Pro V 2.0* da fabricante *DJI*) equipado com um sistema de pósprocessamento cinemático, para a obtenção de imagens aéreas a partir de malhas de voo específicas. Posteriormente tais imagens passaram por conversões, tratamentos e processamentos, possibilitando a geração de produtos fidedignos às condições de superfície do Parque. Também foram necessários aparelhos *smartphone*, para acompanhamento de voo, observação de percurso e porcentagem de bateria e uma superfície de decolagem/aterrissagem. Foram adquiridas informações de topografia terrestre com a utilização de um receptor *GPS Emlid*, com o objetivo de obtenção de pontos de controle e verificação, importantes para o correto georreferenciamento das imagens aéreas e seu posterior processamento.

1.5.4 Eletrorresistividade

Foi aplicado o método geoelétrico da Eletrorresistividade para a aquisição de informações subsuperficiais em regiões consideradas como de interesse, por apresentarem atributos característicos para a realização dos levantamentos. Tal método possibilita a identificação de contrastes de resistividade elétrica em subsuperfície, por meio da análise de produtos como perfis 1D, seções 2D e visualizações em 3D. A técnica do Caminhamento Elétrico foi a escolhida para o estudo, por possibilitar a aquisição de valores de resistividade em diferentes posições laterais e níveis de profundidade. O arranjo empregado foi o Dipolo-Dipolo, principalmente por sua versatilidade operacional. O equipamento utilizado foi o eletrorresistivímetro multieletrodo X5xtal (fabricante Auto Energia), acompanhado de uma bateria, dois multímetros digitais, cabos e eletrodos metálicos. Foram utilizadas ferramentas como martelos, marretas e furadeiras para o cravamento dos eletrodos metálicos no solo.

1.5.5 Processamento dos dados

As etapas de processamento, tratamento e modelagem dos *data sets* obtidos foram possíveis devido a utilização de diferentes *softwares*, possibilitando então a geração de produtos. Os *softwares* utilizados nessa etapa são descritos a seguir:

- Google Earth (obtenção de imagens de satélite);
- RES2DINV (inversão de dados geofísicos);
- Surfer (geração de imagens dos dados geofísicos);
- RTKconv (conversão de dados da aquisição por drone);
- RTKpost (interação e compilação dos dados base-drone);
- T2R Geotagger (georreferenciamento de imagens);
- Agisoft Metashape (processamento digital de imagens);
- *Qgis* (geração e integração dos mapas temáticos, pós-processamento dos produtos aerofotogramétricos);
- Leapfrog Works (visualização tridimensional e integração de dados aerofotogramétricos e geofísicos).

1.5.6 Interpretação dos dados

A etapa de interpretação dos dados foi realizada a partir de análises qualitativas e quantitativas dos produtos desenvolvidos. Os produtos geofísicos e aerofotogramétricos foram interpretados individualmente e em conjunto, sendo realizadas adicionalmente contextualizações com informações dos contextos geológico e arqueológico da região de investigação.

1.5.7 Escrita da Monografia

A Monografia está estruturada em sete capítulos, assim definidos: introdução (contextualizando o objetivo, justificativa, localização e metodologia); contexto geológico/arqueológico; o estado da arte da Fotogrametria e dos métodos geofísicos; aquisição e processamento dos dados de Aerofotogrametria e Eletrorresistividade; discussão dos resultados e conclusões.

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

CONTEXTO GEOLÓGICO/ARQUEOLÓGICO

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A região onde foi desenvolvido o presente trabalho encontra-se inserida no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco. O Cráton do São Francisco corresponde a uma unidade geotectônica consolidada ao final do Ciclo Transamazônico, que passou por remobilizações que acabaram por dar origem às Faixas Brasilianas que caracterizam o entorno do Cráton.

O Quadrilátero Ferrífero situa-se no extremo Sul do Cráton do São Francisco (Almeida 1977), e nele afloram as unidades estratigráficas mais antigas do referido Cráton, sendo constituído por unidades litodêmicas e litoestratigráficas do Arqueano, do Paleo-Mesoproterozoico e do Cenozoico (Castro *et al.* 2020). É classificado como uma das principais províncias minerais do mundo, abrangendo em sua contextualização uma área de aproximadamente 12.785 quilômetros quadrados, e a região de estudo, no contexto do Quadrilátero Ferrífero, situa-se no município de Ouro Preto (Figura 2.1).

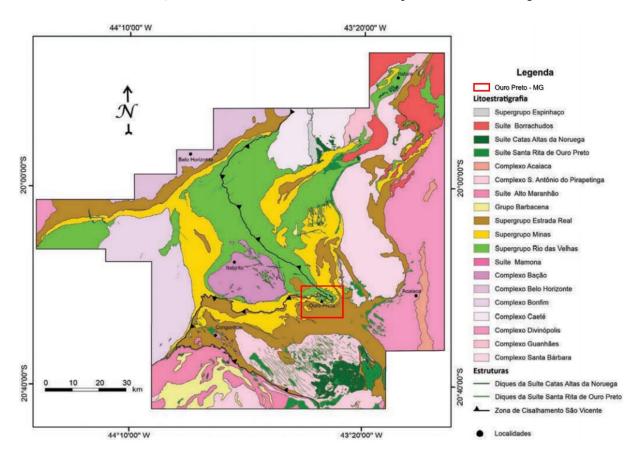


Figura 2.1 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Endo et al. (2019a).

2.1.1 Unidades litoestratigráficas

Tais unidades podem ser separadas, datadas e caracterizadas, como ilustra a Figura 2.2. Os Complexos Metamórficos representam o embasamento do Quadrilátero Ferrífero, sendo constituídos de gnaisses bandados, gnaisses, migmatitos, granitoides, anfibolitos e corpos máficos/ultramáficos (Castro *et al.* 2020), apresentando idade arqueana datada entre 3,38 e 2,9 Ga. e migmatização entre 2,86 e 2,77 Ga. (Noce *et al.* 1998). Compilações de trabalhos mais recentes delimitam a idade entre 3,22 e 2,68 Ga. (Castro *et al.* 2020);

O Supergrupo Rio das Velhas, sobre o embasamento (*i.e.*, Complexos Metamórficos), representa uma sequência vulcanossedimentar arqueana, constituída por rochas metassedimentares clásticas e químicas, metavulcanoclásticas e por rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas (Castro *et al.* 2020), apresentando idade por datações U-Pb em amostras de zircão de 2.7 Ga. (Vaz de Melo *et al.* 2000). O Supergrupo Rio das Velhas é composto, da base para o topo, pelos grupos Nova Lima e Maquiné (Dorr, 1969), e é representativo de sequências arqueanas do tipo *greenstone belt* (Castro *et al.* 2020), que representam em sua maioria ocorrências de restos de crosta oceânica constituída por magmatismos

- O Grupo Nova Lima é caracterizado principalmente por rochas vulcânicas, vulcanosedimentares e sedimentares (Baltazar et al. 2007), correspondendo a uma intercalação de rochas de origem sedimentar/vulcânica, que devido a deformações e processos hidrotermais se transformaram em xistos e filitos (Castro et al. 2020);
- O Grupo Maquiné é caracterizado por filitos quartzosos, quartzitos e lentes conglomeráticas (Ladeira et al. 1983).

O Supergrupo Minas é sobreposto em discordância sobre o Supergrupo Rio das Velhas, e representa uma sequência metassedimentar paleoproterozoica, constituída por rochas metassedimentares clásticas e químicas (Castro *et al.* 2020), apresentando idade de sedimentação inicial em cerca de 2,5 Ga. (Renger *et al.* 1994).

- Os Grupo Tamanduá (base) e Caraça consistem principalmente em arenitos, conglomerados, pelitos e *chert*, associados a ambientes transicionais e de margem passiva (Alkmim *et al.* 1998);
- O Grupo Itabira, dividido em Formações Cauê e Gandarela, representa uma sedimentação química e o registro integral da bacia de margem passiva (Alkmim *et al.* 1998);
- O Grupo Piracicaba (topo) representa origem marinha (transgressão marinha), por ocorrência de pelitos, arenitos e folhelhos (Duque 2018).

O Supergrupo Estrada Real é representado por rochas metassedimentares clásticas e químicas, além de rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas (Castro *et al.* 2020). Designado pelos Grupos

Sabará, base, composto predominantemente por rochas metamórficas, que faz contato por discordância angular com o Grupo Itacolomi (Dorr 1969), identificado como topo.

- O Grupo Sabará apresenta idade de 2.125+/-4 Ma.;
- O Grupo Itacolomi apresenta idade de 2.059 +/- 58 Ma., a partir de datações em zircões detríticos (Machado *et al.* 1996).

O Supergrupo Espinhaço é representado principalmente por metarenitos/quartzitos e metaconglomerados (Castro *et al.* 2020) e intercalações de sericita-xistos (Garcia *et al.* 1987). Foi depositado em uma ampla bacia de extensão submeridiana desenvolvida por um processo de rifteamento (Dussin *et al.* 1995). O Supergrupo é dividido em oito formações que não apresentam reunião numa categoria taxonômica menor que Supergrupo, que traduza tal agrupamento baseado em semelhanças litológicas, deposicionais e contextuais (Dossin 1990).

As Unidades sedimentares são representadas por sedimentos terrígenos associados do Paleógeno ao Holoceno, restritos às bacias do Fonseca, do Gandarela e do Gongo Soco (Castro *et al.* 2020). Materiais aluvionares, colúvios, cangas e lateritas são materiais representativos de tais unidades (Lipski 2002).

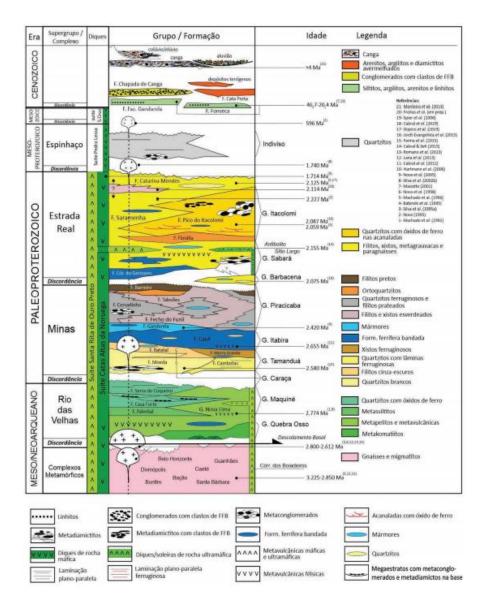


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019b).

2.1.2 Geologia do Parque Arqueológico do Morro da Queimada

Na região do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, afloram diferentes unidades litoestratigráficas, identificáveis na Figura 2.3. A referida figura foi desenvolvida a partir da utilização primária de *shapefiles* representativas do mapeamento de Baltazar *et al.* (2005), em escala 1:50.000, secundária de *shapefiles* representativas do mapeamento de Romano *et al.* (2017), em escala 1:100.000, devido ao fato de a região corresponder a um limite entre as Folhas Mariana (Folhas parciais de SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1) e Ouro Preto (SF.23-X-A-III), e terciária de *shapefiles* representativas de lineamentos e medidas estruturais, do mapeamento de Endo *et al.* (2019a), em escala 1:150.000.

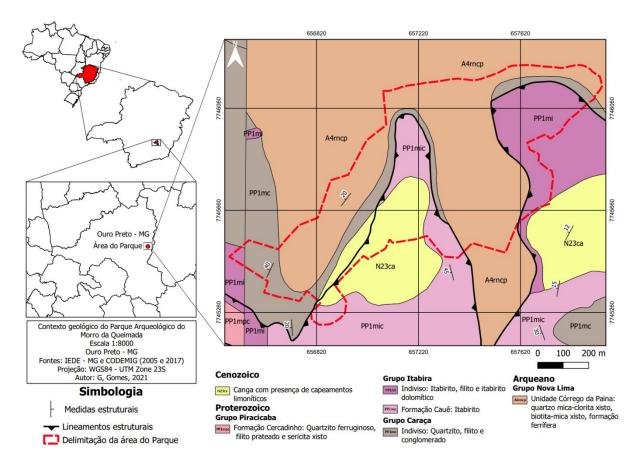


Figura 2.3 – Contexto geológico do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, modificado de Baltazar *et al.* (2005), Romano *et al.* (2017) e Endo *et al.* (2019a).

O representante arqueano na região de investigação é o Grupo Nova Lima, identificado a partir da Unidade Córrego do Palha, caracterizada por quartzo-mica-clorita xisto, biotita-mica xisto feldspático e formação ferrífera local (Baltazar *et al.* 2005).

Os representantes proterozoicos correspondem aos Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. O Grupo Caraça é identificado na região por porção indivisa, caracterizada por quartzito, filito e em menor proporção conglomerados. O Grupo Itabira é identificado pela Formação Cauê, caracterizada por itabiritos, e identificado por porção indivisa caracterizada por itabiritos, filitos e itabiritos dolomíticos. O Grupo Piracicaba, por sua vez, é identificado pela Formação Cercadinho, caracterizada por quartzito ferruginoso, filito prateado e sericita xisto. O representante cenozoico corresponde a cangas com capeamentos limoníticos (Baltazar *et al.* 2005).

A estrutural da área do parque, a partir da utilização de *shapefiles* do mapa do Quadrilátero Ferrífero de Endo *et al.* (2019a), em escala 1:150.000, possibilitou a identificação da Zona de Cisalhamento São Bento no contexto investigado. Tal Zona corresponde a uma falha de empurrão,

identificada inicialmente nos mapeamentos de Dorr (1969), que se apresenta definida na área, e se encontra em proximidade de diversas outras falhas de empurrão mapeadas (Endo *et al.* 2019a).

Também foram utilizadas *shapefiles* de medidas estruturais de Endo *et al.* (2019a), e de maneira geral, devido ao cenário existente, as principais medidas disponíveis foram foliações plano-axiais (Sn) em relação ao plano de acamamento. Tais foliações apresentaram orientação variando essencialmente entre NE-SW e NW-SE, possuindo mergulhos em grande parte sub-horizontais, mas ainda assim evidenciando, em alguns casos, mergulhos mais elevados (40° e 45°, por exemplo).

O enfoque do presente trabalho se dará, devido à localização dos perfis de aquisição dos dados geofísicos, no Grupo Itabira, mais precisamente na Formação Cauê, e em produtos de alteração pedogenética cenozoicos, caracterizados por depósitos elúvio-coluviais de cangas com capeamentos limoníticos. O Grupo Itabira, paleoproterozoico, é representante do início de processos de sedimentação química da Bacia Minas, constituído por cerca de 1.100 m de rochas metassedimentares de origem marinha (Dorr 1969), dividido nas Formações Cauê (base) e Gandarela (topo). A Formação Cauê é constituída principalmente por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfibolíticos, filitos, quartzitos e mármores, apresentando uma espessura de cerca de 350 m, enquanto a Formação Gandarela, sobreposta à Formação Cauê, é constituída por mármores dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, filitos e itabiritos (Spier *et al.* 2007).

A Formação Cauê apresenta idade deposicional, a partir de datações geocronológicas, entre 2.520 (análise de zircões) e 2.420 Ma (análise Pb/Pb). As formações ferríferas bandadas da Formação Cauê passaram por processos hipogênicos e autigênicos que resultaram na geração de minérios de alto teor, principalmente de ferro, formados a partir de itabiritos (Dorr 1969).

Cangas lateríticas apresentam considerável distribuição nos contextos do Grupo Itabira e Formação Cauê, essencialmente presentes em porções de topo e em encostas de cristas de serras (Castro et al. 2020). O processo de desenvolvimento das cangas, associado ao início do Paleógeno e contínuo até os dias atuais, ocorre a partir de dissoluções de óxidos e hidróxidos de ferro, com a ocorrência de reprecipitações predominantes de goethita (Ramanaidou et al. 1996). As cangas mapeadas por Baltazar et al. (2005) apresentam início de formação associado ao Plioceno-Pleistoceno.

2.2 CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

Arqueologicamente, a região do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, tombada municipalmente, apresenta-se como um grande centro de pesquisas e trabalhos, sendo extensamente estudada e caracterizada sob diversas perspectivas e contextos principalmente espaciais, patrimoniais, comunitários e paisagísticos. O Parque é integrante dos bens culturais do município de Ouro Preto - MG listados pela UNESCO como patrimônio da humanidade (Suñer *et al.* 2016).

A região delimitada pelo Morro da Queimada, segundo registros historiográficos, compreende o antigo arraial do Ouro Podre, também conhecido como Morro do Pascoal da Silva, tendo essa delimitação imprecisa em meio a antigos arraiais que se desenvolveram ao longo da Serra, que hoje configuram os bairros Morro São João, Morro Santana, Morro São Sebastião e Lajes (Brito Bueno 2019).

O arraial do Ouro Podre foi o primeiro assentamento da região, originado em 1689 da ação bandeirante que objetivava a identificação de potencial para mineração (Suñer *et al.* 2016). O nome "Morro da Queimada" deriva do evento conhecido como "Sedição de Vila Rica de 1720", um motim ocorrido no referido período em oposição ao ordenamento da Coroa de instalar Casas de Fundição em regiões de exploração aurífera, sendo a Sedição liderada por Pascoal da Silva e Felipe dos Santos. O motim gerou conflitos com o "Conde de Assumar" (Dom Pedro de Almeira), que acabou por ordenar que seus subordinados ateassem fogo nas residências dos participantes de tal rebelião, gerando um incêndio e a destruição da referida região (Boxer 1969), o que acabou por fortalecer a imagem e a presença do governo da capitania (Ferreira 2011).

Segundo Sobreira (2014), no entorno do Morro da Queimada são nítidas escarpas e vales que tiveram origem devido a escavações antrópicas, sendo os terrenos de maior resistência (terrenos quartzíticos) "testemunhos" dos relevos anteriores (Figura 2.4). Estima-se que a Serra de Ouro Preto, na porção representativa do centro da cidade, apresenta 70% de suas encostas alteradas pela extração de ouro no século XVIII (Sobreira *et al.* 2001).



Figura 2.4 - Vista aérea das escavações no entorno dos bairros Morro da Queimada, Santana e Lajes, modificado de Sobreira (2014).

As principais estruturas arqueológicas remanescentes observáveis na região do Morro da Queimada e em regiões próximas consistem em vestígios de aquedutos, bocas de minas, sarilhos (*i.e.*, aberturas para ventilação em minas subterrâneas), reservatórios e mundéos (*i.e.*, tanques de deposição de ouro), além de remanescentes de edificações em alvenaria de pedra (Figura 2.5) (Domingues *et al.* 2006 *apud* Brito Bueno 2019).

Verdadeiros "labirintos" foram gerados durante a exploração mineira nessas regiões, por meio da construção de inúmeras minas subterrâneas, que, em sua maioria, atualmente apresentam difícil acesso, dificultando, assim, suas delimitações (Domingues *et al.* 2006 *apud* Brito Bueno 2019).

Ferreira (2011) alerta para o crescimento da cidade nas últimas décadas, que em conjunto com a falta de políticas públicas e de planejamento urbano, culminou em um processo de depredação e ocupação desordenada da área, que acarretou nos desmontes de ruínas e antigos canais de carregamento de lama aurífera. Ainda segundo a autora, a degradação ambiental e arqueológica no sítio continua a acontecer, extinguindo vestígios materiais que seriam importantes para o aprendizado sobre potencialidades e fragilidades dos sistemas ambientais que compõe o sítio.

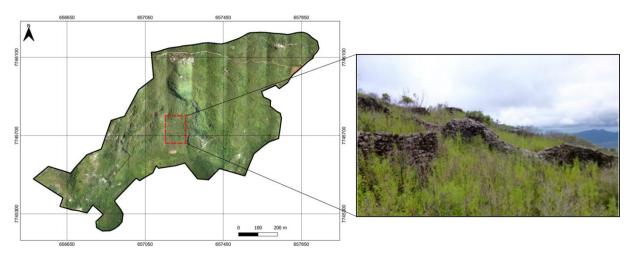


Figura 2.5 – Delimitação da área central das ruínas do Morro da Queimada associadas às atividades de mineração do século XVIII, modificado de Suñer *et al.* (2016) e Fundação Gorceix (2018).

3.1 INTRODUÇÃO

O termo Fotogrametria deriva das palavras gregas *photos*, que significa luz, *gramma*, que significa algo desenhado ou escrito e *metron*, que significa "medir". Portanto, Fotogrametria, de acordo com suas origens, significaria "medir graficamente usando luz" (Tomaselli 2009).

A Fotogrametria corresponde à arte, ciência e tecnologia de obter informações de confiança sobre objetos e meio ambiente com o uso de processos de registros, medições e interpretações das imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética registrados (ASB 1966 *apud* Temba 2000), em duas ou três dimensões, por meio de aplicações como medições de coordenadas planimétricas e quantificações de distâncias, alturas, áreas e volumes.

A Fotogrametria é uma importante ferramenta do Geoprocessamento, sendo relacionado o seu emprego principalmente ao processo de desenvolvimento de produtos como ortofotos, que correspondem a fotografias que representam imagens de objetos em suas verdadeiras posições ortográficas (Lopes 1989).

Dentre as diversas maneiras de dividir a Fotogrametria, existe a divisão em Fotogrametria Terrestre, Fotogrametria Espacial e Aerofotogrametria (Tomaselli 2009).

A Fotogrametria Terrestre representa a utilização de fotografias a partir de posições fixas em terrenos, possibilitando a geração de modelos de objetos ou edificações através de medições indiretas (Palermo *et al.* 2013). A Fotogrametria Espacial representa a utilização de fotografias e imagens extraterrestres e suas medições subsequentes. Já a Aerofotogrametria é definida como a vertente da Fotogrametria que se utiliza de fotografias aéreas para a geração de produtos (Tomaselli 2009). Por meio do emprego de veículos aéreos, equipados devidamente com câmeras fotográficas e sistemas de georreferenciamento, é possível a obtenção de imagens e informações necessárias para o desenvolvimento do Processamento Digital de Imagens – PDI.

Lopes (2019) classifica a Fotogrametria de acordo com os instrumentos utilizados para a técnica, sendo dividida em Fotogrametria Analógica, Fotogrametria Analítica e Fotogrametria Digital.

A Fotogrametria Analógica representa a obtenção de fotografias, processamento de imagens e saída de imagens/produtos de modo analógico (Lopes 2019). A Fotogrametria Analítica representa a obtenção de fotografias, processamento de imagens e saída de imagens/produtos de modos analógico, computacional e analógico, respectivamente (Lopes 2019). A Fotogrametria Digital representa a

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

obtenção de fotografias, processamento de imagens e saída de imagens/produtos de modo digital (Lopes 2019).

No presente estudo, a Aerofotogrametria foi realizada com a utilização de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também conhecido pela designação genérica de *drone*, que realizou a obtenção de fotografias aéreas da área de estudo, possibilitando a geração de produtos fotogramétricos representativos da região do Parque Arqueológico do Morro da Queimada. Tais produtos foram posteriormente integrados em sistemas geográficos de Cartografia Digital e em ambientes tridimensionais georreferenciados, facilitando a observação e caracterização da área investigada.

3.2 **AEROFOTOGRAMETRIA**

3.2.1 Método e aplicação

A Aerofotogrametria, integrada à área das Geotecnologias, mais precisamente ao Geoprocessamento no ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), representa um grande avanço recente, principalmente pelo crescimento e desenvolvimento de métodos e conceitos relacionados a utilização de VANT's, que muitas vezes barateiam, aceleram e simplificam as etapas e processos referentes à geração de produtos aerofotogramétricos.

A aplicação da Aerofotogrametria é fundamentada em conceitos específicos para o seu correto uso, sendo necessária a realização de protocolos, obtenção de licenças e planejamentos de aquisições, envolvendo desde os objetivos do estudo até condições climáticas e ambientais.

Segundo FHA (2008), cada projeto tem um conjunto único de condições que determinarão a escolha entre levantamentos topográficos e fotogramétricos, sendo os últimos de maior valia, segundo Carneiro *et al.* (2010), quando os benefícios inerentes são:

- eficiência para mapeamento de grandes extensões;
- maior segurança com relação a outros métodos de levantamento, principalmente em locais perigosos, acidentados e de tráfego intenso;
- maior praticidade na execução de levantamentos e mapeamentos de áreas inacessíveis ou de difícil acesso;
- geração de registros fotográficos da área do projeto, úteis também para outras etapas do projeto;
- fornecimento de produtos digitais de grande utilidade como ortofotomosaicos, modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital do terreno (MDT).

No presente estudo, a aplicação do levantamento aerofotogramétrico foi embasada, principalmente, pela possibilidade de realização de levantamentos de áreas inacessíveis ou de difícil acesso e por permitir a geração de ortofotomosaico, MDS e curvas de nível representativos e característicos da área em questão. Alguns dos problemas listados por Carneiro *et al.* (2010) para o uso da Fotogrametria, como ocorrência de vegetações densas, condições climáticas e nebulosidade se apresentam existentes no contexto ouro-pretano e local, sendo então levados em consideração durante a delimitação de datas para execução das atividades, aquisição e processamento dos dados.

3.2.2 Operação do equipamento

Com relação ao planejamento de voo, a delimitação da trajetória de aquisição deve ser representativa da região de interesse, respeitando suas dimensões e topografia, de maneira a diminuir possíveis erros. O planejamento é feito por meio do emprego de *softwares* específicos, como *Pix4dcapture*, *Skydrones* e *DroneDeploy*, por exemplo, permitindo a definição de angulação da câmera, altura de voo, velocidade de voo, sobreposições de imagens, amplitude das grades do percurso de rota, entre outros fatores (Gamarra 2020).

A definição da angulação é necessária, relacionada à diminuição de deformidades intrínsecas ao processamento dos dados, pois a posição de captação das imagens influencia no reconhecimento da posição dos limites de borda das imagens, e, assim, na assimilação de onde as imagens se reunirão umas nas outras (Gamarra 2020).

É aconselhável, em regiões como a tratada no presente estudo, a realização de voos sob uma altura constante e segundo malhas de voo propícias para modelagens em *software*, ou seja, que favoreçam a sobreposição de imagens necessária para a obtenção da estereoscopia entre as imagens do levantamento, reduzindo a ocorrência de deformações e anomalias nas etapas de processamento digital de imagens (Lopes 2019). A velocidade de voo também pode ser delimitada, e, de preferência, velocidades baixas devem ser escolhidas (abaixo de 10 m/s), pois altas velocidades, dependendo do equipamento, podem resultar em perda de qualidade e resolução das fotos aéreas executadas.

As dimensões da área de estudo são importantes no que tange à necessidade de múltiplas baterias para o desenvolvimento da aquisição com *drone*, pois a maioria das baterias utilizadas apresenta tempo de funcionamento geralmente baixo, de minutos a poucas horas (Gamarra 2020). Sendo assim, em aquisições robustas, é necessário que as mesmas sejam substituídas ao longo da atividade. Para tal substituição, são definidos pontos de aterrissagem/decolagem específicos, próximos à área de aquisição, para que o *drone* se desloque e possibilite o processo (Gamarra 2020).

Extrapolações de planejamentos de trajetória também representam um conceito interessante, pois em levantamentos com *drone* é de suma importância o entendimento de que o equipamento passa por acelerações e desacelerações ao realizar mudanças de sentido e direção, assim, podendo gerar dificuldades e incompatibilidades na modelagem fotogramétrica. É importante que a região de interesse esteja centralizada com relação ao planejamento de trajetória, resultando assim em uma sobreposição de imagens de maior qualidade associada, quando comparada com sobreposições de regiões periféricas, realizadas com conjuntos menores de imagens (Goetzendorf-Grabowski *et al.* 2017).

O sucesso de missões fotogramétricas está relacionado à qualidade do material fotográfico obtido, que apresenta dependência da estabilidade de voo e da capacidade da aeronave de se manter em altura e rota de voo planejadas (Goetzendorf-Grabowski *et al.* 2017). O sucesso também está atrelado à escolha dos demais parâmetros, como velocidade e sobreposição, devendo ser definidos de acordo com as características da área investigada e resolução esperada para os produtos.

3.2.3 Topografia

Etimologicamente, a palavra grega *topos* significa lugar e *graphen* significa descrição, sendo assim o significado de Topografia "descrição do lugar" (Veiga *et al.* 2012). Doubeck (1989) descreve a Topografia como tendo por objetivo o estudo dos instrumentos e métodos utilizados para obter a representação gráfica de uma porção do terreno sobre uma superfície plana.

As operações, realizadas em campo, com a finalidade de coleta de dados para posterior representação são denominadas "levantamentos topográficos" (Veiga *et al.* 2012). Em levantamentos aerofotogramétricos, é de grande contribuição a realização de levantamentos topográficos combinados, fornecendo informações acerca de coordenadas de pontos estabelecidos no terreno, chamados de pontos de apoio. Tais pontos, caracterizados por possuírem coordenadas geográficas de alta precisão, apresentam como função principal a elevação de precisão e acurácia dos levantamentos, auxiliando na criação de uma rede local de coordenadas conhecidas (Lopes 2019).

Os pontos de apoio são divididos em pontos de controle e pontos de verificação. Ferreira (2017) define pontos de controle como pontos que irão fazer parte do reconhecimento aéreo, utilizados para gerar uma relação entre o sistema de coordenadas provido pela imagem e o sistema de coordenadas referente ao terreno, sendo utilizados no processamento das tomadas de imagens com o objetivo de aumentar a precisão dos produtos gerados. Ferreira (2017) também define os pontos de verificação, diferindo dos pontos de controle de acordo com sua utilização. Os pontos de verificação são utilizados apenas para análises qualitativas do produto final, sendo a diferença entre valores de coordenadas obtidas na imagem e valores obtidos do terreno representativos da acurácia do levantamento (Ferreira 2007).

3.2.4 Processamento Digital de Imagens (PDI)

O Processamento Digital de Imagens apresenta como objetivo o tratamento de imagens obtidas (Lopes 2019). Câmara *et al.* (1996) definem o PDI como uma manipulação de imagens realizada computacionalmente, com o objetivo de melhoria do aspecto visual de feições, fornecendo os subsídios necessários para interpretação e realização de processamentos posteriores.

O Processamento Digital de Imagens, associado a levantamentos aerofotogramétricos, pode ser dividido em três etapas (pré-processamento, processamento e pós-processamento). O pré-processamento corresponde à análise inicial, feita em campo, das informações adquiridas pelo *drone*, permitindo ao piloto a obtenção de uma noção geral da qualidade das imagens geradas. O processamento, geralmente realizado em escritório, corresponde ao fluxo de trabalho realizado para geração de produtos fotogramétricos, por meio da utilização de *softwares* específicos para o processo. O pós-processamento, também geralmente realizado em escritório, corresponde à inserção dos produtos obtidos em *softwares* de integração com informações geográficas, sendo tal integração usualmente feita por meio do desenvolvimento de mapas e modelos.

3.2.4.1 Resolução

A resolução de produtos fotogramétricos, como ortofotomosaicos e modelos digitais de elevação, gerados no processamento, está diretamente associada ao seu *GSD* (*Ground Sample Distance*), que corresponde ao tamanho da menor porção de um *raster* ou imagem digital, ou seja, ao tamanho real do *pixel* da imagem digital do terreno. Segundo Ferreira (2017), o *GSD* representa uma referência para reprodução dos pixels da imagem em unidades reais de medida (unidades métricas). O *GSD* apresenta seu valor associado aos parâmetros definidos no planejamento de voo, devidamente expostos anteriormente.

3.2.4.2 Sistema Cinemático Pós-Processado

O Sistema Cinemático Pós-Processado (*PPK System*) apresenta como principal função o processamento de informações após a realização dos voos, sendo suas maiores vantagens com relação aos outros sistemas de georreferenciamento a possibilidade de diminuição considerável do número de pontos de controle dispostos ao longo das áreas de investigação (Zhang *et al.* 2019), e melhorias significativas na acurácia posicional dos "*geotags*" das imagens (Hill 2019).

Tal sistema consiste, geralmente, de uma estação de base/receptor *GNSS*, montada em um tripé, e um *drone* também equipado com receptor *GNSS* (Zhang *et al.* 2019). Grande parte dos *drones* mais acessíveis possibilitam a gravação de posições *GNSS*, porém, tais posições apresentam erros associados, variando de centímetros a metros, por serem utilizadas somente para a função de navegação. Sendo assim, o sistema *PPK*, com a gravação de dados *GNSS* realizada tanto pelo *drone* quanto pela estação

de base possibilita o pós-processamento e correção posicional de todas as imagens obtidas pelo *drone* referentes à missão de interesse (Hill 2019), apresentando níveis de ruído geralmente baixos (Cledat *et al.* 2020)

Com o desenvolvimento de tal tecnologia, que se apresenta cada vez mais acessível, tais equipamentos podem se tornar mais presentes em estudos e investigações arqueológicas, sendo até mesmo os equipamentos de menor preço associado efetivos na geração de produtos como ortofotomosaicos e modelos digitais representativos das áreas investigadas (Hill 2019).

3.2.4.3 Produtos

A Fotogrametria possibilita a geração de diversos produtos, com diferentes finalidades e utilidades, sendo as principais áreas de aplicação de tal ciência a Cartografia, Engenharia, Arqueologia, Geologia, Agronomia, Indústria e Medicina (Lopes 2019). Produtos como modelos digitais de elevação e ortofotomosaicos se apresentam como os principais representantes relacionados ao tema de estudo.

A representação, em perspectiva, de condições específicas de relevo espacialmente por meio da digitalização de imagens e posterior modelamento matemático recebe o nome de modelo digital de elevação. Representar os comportamentos de fenômenos que ocorrem nas superfícies analisadas, sem a real necessidade de presença física nos locais de estudo, possibilitando a realização de análises qualitativas e/ou quantitativas para fins de simulação e tomadas de decisão (Felgueiras 1999) é considerada uma das importantes vantagens de gerar modelos digitais de elevação.

O sistema de modelagem digital, que possibilita a geração de produtos, é separado em etapas (Felgueiras 1999):

- aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno a ser estudado;
- criação do modelo digital;
- definição dos processamentos de análises sobre os modelos, com a finalidade de extrair informações úteis ao geoprocessamento.

Um modelo digital de elevação (MDE) pode ser subclassificado, de acordo com os atributos de elevação associados, em modelo digital de superfície ("Digital Surface Model") e modelo digital do terreno ("Digital Terrain Model"); (Aspiazú et al. 1990). O modelo digital de superfície (MDS) corresponde a um Modelo representativo que inclui todos os objetos acima do terreno, como, por exemplo, árvores e edificações. Já o modelo digital de terreno (MDT) corresponde a um modelo representativo que remove todos os objetos distribuídos acima do nível do terreno, logo, possibilitando a partir do seu desenvolvimento a geração de curvas de nível representativas do terreno. Curvas de nível, por sua vez, apresentam-se como uma representação digital do terreno (Gamarra 2020), e são

caracterizadas pelo processo de interpolação de valores de altimetria do terreno, possibilitando a geração de linhas de isovalores ao longo da área de investigação.

Ortofotomosaicos correspondem a mosaicos de fotos ortorretificadas desenvolvidos a partir de uma sequência de técnicas fotogramétricas, chamada de restituição fotogramétrica digital, caracterizada pela análise de orientação da câmera, de parâmetros e condições dos registros fotográficos e de orientações interiores e exteriores (Lopes 2019). Tais mosaicos são qualificados como excelentes produtos para obtenção de informações espaciais das áreas investigadas, representando-as de modo fiel à realidade.

3.2.5 Legislação

A regulamentação de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) é direcionada por uma série de legislações, formada por Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Para a utilização em projetos, documentos legais do equipamento e do operador (cadastros e autorizações) são indispensáveis na operação de atividades e, além disso, documentos que asseguram a análise de risco da operação (plano de voo e *check list* com gestão de riscos) são fundamentais.

O equipamento em questão, utilizado no trabalho, é caracterizado como pertencente à Classe 3 (Tabela 3.1), e as operações ocorrem no modo Linha de Visada Visual (*VLOS operation*), ou seja, em condições meteorológicas visuais (VMC) que permitam ao piloto manter contato visual direto com a aeronave durante todo o voo, sem a necessidade de auxílio de observadores, lentes e outros equipamentos. Existem outras classificações vigentes segundo o modo de Linha de Visada, como Além da Linha de Visada Visual (*BVLOS operation*) e Linha de Visada Visual Estendida (*EVLOS operation*). A Figura 3.1 ilustra as principais diferenças entre as operações descritas, com relação ao distanciamento entre observador e VANT e a necessidade de observadores adicionais.

Tabela 3.1 - Classes de RPA conforme peso máximo de decolagem, modificado de Gamarra (2020).

	, 1
CLASSE	Peso de decolagem (kg)
CLASSE I	> 150
CLASSE II	> 25e < 150
CLASSE III	≤ 25

Classificação RPA quanto ao peso

23

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

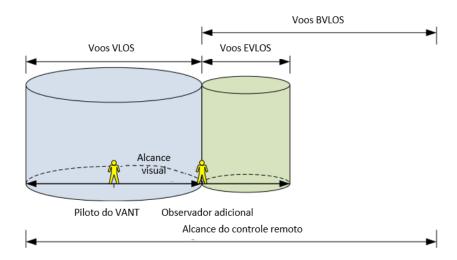


Figura 3.1 - Diferenciação entre as operações VLOS, EVLOS e BVLOS, modificado de Davies et al. (2018).

MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1 INTRODUÇÃO

A Geofísica é definida como a Ciência que aplica princípios físicos ao estudo da Terra, envolvendo a realização de medidas que, por sua vez, são influenciadas pela distribuição interna das propriedades físicas da Terra (Kearey *et al.* 2009). A Geofísica, como Ciência, apresenta uma divisão em duas vertentes, sendo elas Geofísica Global e Geofísica Aplicada.

A Geofísica Global corresponde aos estudos da Terra em escala global-universal, envolvendo estudos sobre morfologias, estruturas e fenômenos planetários (sismológicos, magnéticos, geodinâmicos, entre outros). A Geofísica Aplicada tem a origem de sua nomenclatura relacionada à exploração do subsolo, com o objetivo de localizar e estudar estruturas favoráveis à acumulação de substâncias úteis para a sociedade humana, tais como petróleo, água subterrânea e minerais (Braga 2006), sendo as profundidades de investigação usualmente menores que 100 metros (Reynolds 2011).

A Geofísica Aplicada também está vinculada a estudos de caráter ambiental, principalmente a caracterização de poluentes e identificação de contaminações e vazamentos (Reynolds 2011) e estudos urbanos, possibilitando a identificação e cadastro de interferências como tubulações, construções e fiações elétricas (Henderson 1992). Até mesmo estudos arqueológicos podem ser vinculados à Geofísica Aplicada, por meio da observação de feições anômalas em profundidade, auxiliando na exploração de ruínas não aflorantes, como vestígios de construções, cavernas, e até mesmo na visualização de túmulos e fósseis em profundidade (Witten 2017).

No presente estudo, foi utilizado o método geoelétrico da Eletrorresistividade, com o objetivo de gerar informações de geofísica rasa que, ao serem interpretadas e confrontadas entre si, pudessem permitir o desenvolvimento de interpretações e conclusões, relacionadas principalmente a associações de anomalias de resistividade elétrica com os contextos geológico e arqueológico locais, confrontando-as também com dados de projetos e estudos anteriores.

Os métodos geoelétricos, como o próprio nome sugere, correspondem aos métodos que utilizam correntes elétricas artificiais, diretas ou alternadas, de baixa frequência, ou correntes elétricas naturais, para investigar as propriedades elétricas de subsuperfície (Kearey *et al.* 2009). Os estudos relacionados aos métodos, envolvendo conceitos atualmente extremamente fundamentados, tiveram seus desenvolvimentos primordiais, de maneira incipiente, no início do século XX, ganhando maior notoriedade na década de 1970, devido ao início do emprego de computadores para processamento e análise de dados, sendo os estudos desenvolvidos e aperfeiçoados até os dias atuais (Reynolds 2011).

Como principais representantes dos métodos geoelétricos, podem ser citados o método da Eletrorresistividade, método da Polarização Induzida (IP) e método do Potencial Espontâneo (SP). Como elucidado anteriormente, o presente trabalho foi realizado com o emprego do método da Eletrorresistividade, que apresenta a resistividade elétrica como principal propriedade de análise, sendo as informações obtidas dispostas e interpretadas sob diferentes maneiras, principalmente por meio de mapas, seções, modelos, gráficos, perfis e tabelas.

É importante salientar a diferenciação entre métodos, técnicas e arranjos, pois muitas vezes é perceptível certa confusão por parte de profissionais com relação às nomenclaturas e denominações corretas, sendo a classificação proposta na Figura 4.1 uma simplificação que visa maior entendimento para usuários.



Figura 4.1 - Classificação de métodos, técnicas e arranjos (Braga 2006).

4.2 ELETRORRESISTIVIDADE

4.2.1 Método

A Eletrorresistividade pode ser explicitada como um método geofísico que possibilita o entendimento de subsuperfície por meio do emprego de uma corrente elétrica, caracterizando materiais com diferentes resistividades (Herman 2001).

A corrente elétrica empregada é artificial e alternada, sendo necessário o uso de baterias elétricas para o funcionamento de resistivímetros e realização de aquisições. O emprego de correntes alternadas está relacionado à diminuição de interferências nos dados obtidos, devido a fenômenos como polarização eletrolítica e correntes telúricas naturais.

O princípio físico envolvido nos estudos de Eletrorresistividade é a resistividade elétrica, sendo definida a resistividade de um material como a resistência em ohms entre as faces opostas de um cubo unitário do material (Kearey $et\ al.\ 2009$), ou simplesmente como uma medida de quanto o material retarda o fluxo de corrente elétrica (Herman 2001). A resistividade elétrica (ρ) é caracterizada como uma propriedade inversamente proporcional à condutividade elétrica, sendo, fisicamente, relacionada à expressão de resistência elétrica (R), que ao considerar um condutor cilíndrico homogêneo, de forma

cilíndrica ou prismática (Figura 4.2), apresentando comprimento L e área de seção transversal S (Braga 2016), é denotada por:

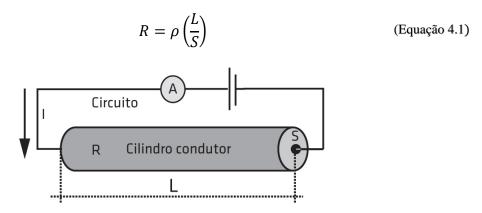


Figura 4.2 - Sistema representativo para a definição da relação resistividade-resistência (Braga 2016).

Sendo assim, a resistividade elétrica (ρ) pode ser denotada por:

$$\rho = R(\frac{S}{L})$$
 (Equação 4.2)

A resistividade elétrica, no Sistema Internacional (SI), é representada e medida em ohm.m, sendo as fórmulas apresentadas anteriormente derivadas de relações associadas à primeira Lei de Ohm, que postula que para condutores ôhmicos, à temperatura constante, a intensidade (I) de corrente elétrica é proporcional a diferença de potencial (V) aplicada entre suas extremidades, sendo representada pela fórmula a seguir:

$$V = RI$$
 (Equação 4.3)

Em corpos tridimensionais, a corrente elétrica não se propaga por um único caminho, sendo, no caso de uma bateria conectada ao solo por meio de cabos e um eletrodo, conduzida segundo uma geometria de "semiesfera" (Figura 4.3), propagando-se radialmente e uniformemente sob as linhas de equipotencial, ao considerar a subsuperfície como homogênea, por meio das linhas de corrente. As linhas de equipotencial representam superfícies de voltagem constante, sendo definidas como "cascas hemisféricas" no semiespaço homogêneo (Kearey *et al.* 2009).

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

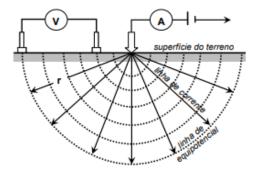


Figura 4.3 - Fluxo de corrente a partir de um único eletrodo em subsuperfície (Kearey et al. 2009).

Ao considerar a aplicação da Equação 4.1 à situação acima exposta, a resistência elétrica (R) pode ser representada por:

$$R = \frac{\rho \cdot r}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r}$$
 (Equação 4.4)

Sendo assim, a resistividade elétrica (ρ) pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\rho = 2\pi r(\frac{V}{I})$$
 (Equação 4.5)

Na equação acima, ρ representa a resistividade, V a diferença de potencial em subsuperfície, I a corrente empregada e r a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto de medição do potencial (Braga 2016).

Como, na maioria das situações, existe uma inomogeneidade nas condições e distribuição de materiais em subsuperfície, a propagação da corrente elétrica não ocorre na mesma intensidade ao longo das linhas de corrente, sendo o fluxo direcionado com maior intensidade para regiões de maior condutividade elétrica. Sendo assim, a propriedade calculada por resistivímetros é a resistividade aparente, correspondente a uma média ponderada de valores de resistividade verdadeiras ao seu redor, em um volume de material (Kearey *et al.* 2009).

A resistividade elétrica é uma propriedade que apresenta, para diferentes materiais e condições, valores específicos, chamados de assinaturas geofísicas. Por causa da grande variação de unidades de grandeza relacionadas a resistividade em si (aproximadamente 10²⁴, segundo Reynolds (2011)), podem ser previstos intervalos aproximados de valores esperados para determinados materiais, como exemplifica a Figura 4.4:

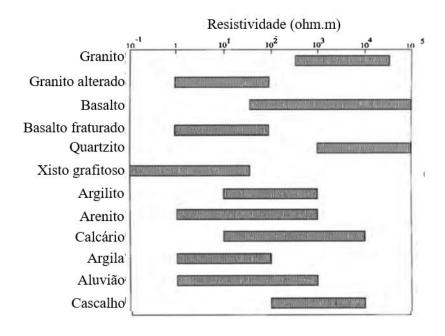


Figura 4.4 - Intervalos típicos de resistividade para diferentes materiais geológicos, modificado de Ward (1990).

A resistividade elétrica também é influenciada por condições e características da área de estudo, resultando em alterações (aumento ou diminuição) de valores de materiais consolidados na literatura (Tabela 4.1). Os principais processos envolvidos em alterações de resistividade são argilomineralizações, dissoluções, falhamentos, precipitação de carbonatos, intemperismo, metamorfismo, entre outros.

Tabela 4.1 - Processos geológicos e suas influências nos valores de resistividade elétrica, modificado de Ward (1990).

Processos geologicos e sua influencia nos valores de resistividade eletrica			
ARGILOMINERALIZAÇÃO	•	INTEMPERISMO	
DISSOLUÇÃO	•	ENDURECIMENTO 	
FALHAMENTOS	•	PRECIPITAÇÃO CARBONÁTICA 👚	
INTRUSÕES DE SAL	•	SILICIFICAÇÃO 1	
CISALHAMENTO	+	METAMORFISMO 1	

Características como temperatura, saturação, textura, porosidade, permeabilidade, petrologia e idade também são importantes influenciadoras na determinação de valores de resistividade elétrica, e então, é de suma importância que o pesquisador detenha a maior quantidade de informações possível sobre a área de estudo, devendo essas serem detalhadamente evidenciadas para que as interpretações e balizamentos acerca dos dados disponíveis sejam representativas e assertivas.

De maneira simplificada e elucidativa, rochas ígneas tendem a apresentar altas resistividades e rochas sedimentares tendem a apresentar baixas resistividades, ou seja, serem mais condutivas, principalmente em casos de ocorrências de grandes conteúdos de fluidos presentes nos poros. Rochas metamórficas tendem a apresentar resistividades determinadas como intermediárias (Reynolds 2011).

4.2.2 Tipos de levantamentos

Os tipos de levantamentos geofísicos referentes ao método da Eletrorresistividade são indicados por meio de técnicas de campo, e antes de introduzir as técnicas, é necessário discorrer brevemente sobre a metodologia empregada em aquisições geofísicas. Os equipamentos introduzidos anteriormente, no Item 1.5.4, são utilizados de maneira que o eletrorresistivímetro é conectado à bateria e aos multímetros (dependendo do modelo, os multímetros são embutidos no eletrorresistivímetro), para a realização das aquisições.

A "interface" do equipamento com a subsuperfície (Figura 4.5) corresponde aos eletrodos metálicos, que são fincados no terreno, com a utilização de martelos, marretas ou furadeiras, de maneira a propiciar possível contato elétrico com o meio (subsuperfície), de modo que a corrente elétrica artificial possa se propagar pelo mesmo. A corrente elétrica é transportada aos eletrodos por meio de conexões dos eletrodos com o cabo, que por sua vez, transporta corrente elétrica artificial proveniente do resistivímetro. Os eletrodos são separados em "eletrodos de corrente" (representados geralmente por A e B), responsáveis pela propagação da corrente elétrica, e "eletrodos de potencial" (representados geralmente por M e N), responsáveis pela medição da diferença de potencial em um determinado intervalo de distância.

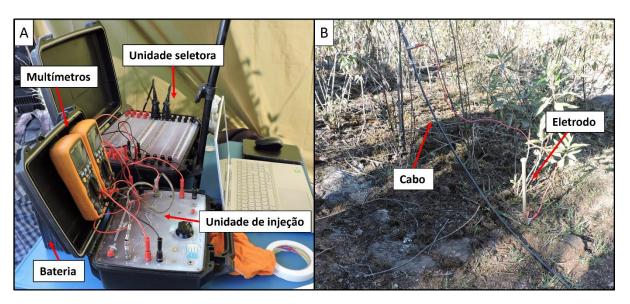


Figura 4.5 - Representação dos elementos envolvidos em uma aquisição de Eletrorresistividade.

O método da Eletrorresistividade é dividido, sumariamente, em duas técnicas de aquisição geofísica de campo, sendo elas a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e a técnica do Caminhamento Elétrico (CE). Técnicas como a Sondagem Elétrica Dipolar (SED) e a Perfilagem de resistividade não serão apresentadas ao longo deste trabalho devido a sua relevância diminuta em relação às técnicas supracitadas de acordo com as finalidades do estudo.

Sondagens Elétricas Verticais (Figura 4.6) são utilizadas principalmente em estudos de interfaces horizontais ou quase horizontais (Kearey et al. 2009), sendo, como o próprio nome sugere, parcialmente semelhantes a sondagens perfurativas, pois por meio do emprego dessa técnica, são obtidos valores de resistividade aparente, com relação a um ponto fixo em superfície, para diferentes profundidades à partir das variações de espaçamento entre eletrodos, definidas por diferentes configurações de eletrodos (arranjos). São citadas por Braga (2016) como principais vantagens das SEV's o recobrimento de extensas áreas de maneira rápida e precisa, redução de custos e versatilidade em termos de profundidade de investigação, e como limitações, influência de estruturas, que podem gerar efeitos nos dados além de espaço disponível para locação dos eletrodos de corrente, ao longo da aquisição.

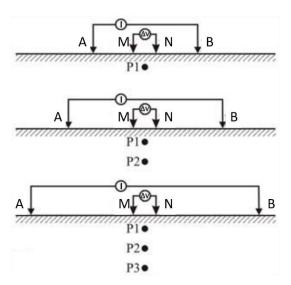


Figura 4.6 - Representação de uma aquisição por Sondagem Elétrica Vertical (Borges 2007).

Caminhamentos Elétricos (Figura 4.7), ao contrário das SEV's, têm sua utilização principalmente em estudos de interfaces verticalizadas ou oblíquas, sendo, como o nome sugere, um "caminhamento" horizontalizado ao longo de uma ou mais profundidades, sendo obtidos valores de resistividade aparente para diferentes posições.

A locação e o comprimento das linhas de aquisição em CE's são delimitados de acordo com os objetivos do estudo e os aspectos geológicos locais, sendo preferencialmente a direção de expansão

ABMN perpendicular às estruturas de interesse, como falhas e contatos, e as linhas paralelas e distantes entre si a um espaçamento preferencialmente de duas vezes o espaçamento dos dipolos (Braga 2016).

Outra aplicação difundida em estudos por Caminhamentos Elétricos corresponde ao *cross-check*, que representa em muitos casos um balizamento entre os próprios dados geofísicos, devido ao cruzamento de linhas de aquisição, realizado usualmente de modo perpendicular. O *cross-check* permite ao pesquisador observar a continuidade de morfologias e comportamentos em diferentes direções, auxiliando interpretações e incrementando os *data sets* obtidos (Reynolds 2011).

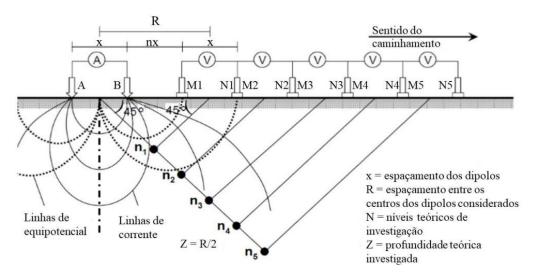


Figura 4.7 - Técnica do Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo (Magalhães 2021).

4.2.3 Arranjos de campo

Existem diversas possibilidades de disposição de eletrodos referentes ao método da Eletrorresistividade, a depender da técnica utilizada, sendo tais possibilidades classificadas como arranjos geoelétricos. A escolha entre os diferentes arranjos de campo envolve variações de resoluções horizontal e vertical no imageamento, profundidade de investigação, ocorrência de ruídos, disponibilidade de eletrodos, condições do terreno, entre outros fatores, sendo os objetivos da aquisição preponderantes no processo de seleção do arranjo.

É relevante salientar a importância dos arranjos na determinação da resistividade aparente, uma vez que a configuração dos eletrodos (disposição do arranjo) é um fator ativo em cálculos de resistividade aparente (ρ_a), por meio do coeficiente geométrico (k). Sua aplicação é denotada a seguir:

$$\rho_a = k(\frac{V}{I})$$
 (Equação 4.6)

O objetivo dos mais modernos métodos de aquisição é principalmente a obtenção de modelos de resistividade verdadeira de subsuperfície, a partir de modelamentos de valores de resistividade

aparente e posteriores inversões que apresentem significado geológico/representatividade das condições reais em profundidade (Reynolds 2011).

Existem diversos tipos de arranjos geoelétricos desenvolvidos, sendo alguns dos mais importantes e empregados em estudos e projetos explicitados a seguir:

4.2.3.1 Arranjo Wenner

Nesse arranjo (Figura 4.8), os eletrodos empregados são mantidos a um mesmo espaçamento entre si, denominado "a", sendo o coeficiente geométrico nesse caso representado por $2\pi a$, e assim, denotando a resistividade aparente por:

$$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{V}{I}\right)$$
 (Equação 4.7)

Durante as aquisições, o espaçamento "a" entre os eletrodos pode ser aumentado, resultando em leituras mais profundas, sendo os quatro eletrodos envolvidos no processo movidos de acordo com as sucessivas leituras (Kearey *et al.* 2009). O arranjo *Wenner* é caracterizado por apresentar baixa resolução horizontal e alta resolução vertical (Ward 1990).

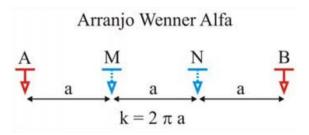


Figura 4.8 - Arranjo Wenner (Borges 2007).

4.2.3.2 Arranjo Schlumberger

Nesse arranjo (Figura 4.9), os eletrodos de potencial são mantidos a um espaçamento "a" entre si, sendo o espaçamento entre os eletrodos de corrente um múltiplo proporcional de "a", denotado por "2L", conforme ilustra a Figura 4.9. O coeficiente geométrico nesse caso é representado por $\frac{\pi L^2}{a}$, sendo possível denotar a resistividade aparente por:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{a} \left(\frac{V}{I} \right)$$
 (Equação 4.8)

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

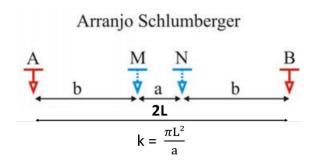


Figura 4.9 - Arranjo *Schlumberger*, modificado de Borges (2007).

Durante as aquisições, para a obtenção de leituras mais profundas, é necessário o movimento somente dos eletrodos de corrente, sendo expandidos simetricamente na direção do arranjo. O arranjo *Schlumberger* também é caracterizado, como o *Wenner*, por apresentar baixa resolução horizontal e alta resolução vertical (Ward 1990).

4.2.3.3 Arranjo Dipolo-Dipolo

Nesse arranjo, os eletrodos de corrente e potencial são assumidos como pares de eletrodos, ou dipolos, sendo o nome "Dipolo-Dipolo" proveniente dessa característica (Figura 4.7). O dipolo "AB" é responsável pela injeção de corrente, sendo o dipolo "MN" responsável pela medição da diferença de potencial.

Os eletrodos apresentam espaçamento "x" constante entre si, e o dipolo "MN" pode ser replicado diversas vezes, a diferentes espaçamentos do dipolo de corrente, possibilitando aquisições em diferentes níveis "n", representativos de diferentes profundidades (Braga 2016). O coeficiente geométrico nesse caso é representado por $2\pi Gx$, sendo G denotado pela Equação 4.9. O arranjo Dipolo-Dipolo é caracterizado por apresentar aceitável resolução horizontal e aceitável resolução vertical (Ward 1990).

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$
 (Equação 4.9)

Logo, a resistividade aparente pode ser denotada por:

$$\rho_a = 2\pi G x \left(\frac{V}{I}\right)$$
 (Equação 4.10)

4.2.3.4 Arranjo Gradiente

O arranjo gradiente (Figura 4.10) corresponde a um arranjo utilizado principalmente em condições de diminuta disponibilidade de espaço ou de terrenos com impossibilidades de locomoção. Nesse arranjo, os eletrodos de corrente e potencial são dispostos em diferentes linhas, paralelas entre si,

para a realização das aquisições, apresentando aplicação nos métodos da Eletrorresistividade, Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP). O arranjo Gradiente é caracterizado por apresentar alta resolução horizontal e baixa resolução vertical (Ward 1990).

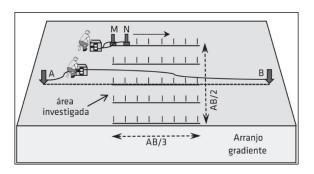


Figura 4.10 – Arranjo Gradiente (Braga 2016).

O coeficiente geométrico é representado por:

$$K = \frac{2\pi}{MN} \left(\frac{\cos \alpha}{OA^2} + \frac{\cos \beta}{OB^2} \right)$$
 (Equação 4.11)

Logo, a resistividade aparente pode ser denotada por:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{MN} \left(\frac{\cos \alpha}{OA^2} + \frac{\cos \beta}{OB^2} \right) \left(\frac{V}{I} \right)$$
 (Equação 4.12)

4.3 INVERSÃO GEOFÍSICA

O objetivo das mais modernas aquisições por Caminhamento Elétrico é a obtenção de modelos de resistividade verdadeira de subsuperfície, a partir de processos de inversão, que atribuam significado geológico/representatividade das condições reais em profundidade para a área de aquisição (Reynolds 2011).

A aquisição de dados em campo, sem a realização de tratamentos, retorna para o usuário a chamada resistividade aparente, que possibilita a construção das chamadas pseudosseções (Magalhães 2021), que representam a disposição dos *datum points* adquiridos de resistividade aparente ao longo de profundidades teóricas (Loke 2004).

O processo de inversão de dados de Eletrorresistividade tem por objetivo a delimitação de um modelo que apresente respostas similares às dos valores medidos, sendo o mesmo idealizado matematicamente como a representação de uma seção da terra em subsuperfície (Loke 2004). *Softwares* como o *RES2DINV* apresentam métodos de otimização em que os modelos medidos são modificados a partir de uma série de iterações, até que a diferença entre a resposta do modelo invertido e a resposta

dos dados medidos apresente reduções (Loke 2004). Por meio do método de inversão "smoothness-constrained", o RES2DINV apresenta como objetivo a suavização de variações de resistividade, minimizando mudanças nas profundidades entre pontos adjacentes em um mesmo limite (Loke 2004) e buscando convergências entre conjuntos de dados brutos, de dados calculados e modelos finais invertidos (Prosdocimi 2019). A Figura 4.11 ilustra uma rotina de inversão geofísica exemplificativa, obtida a partir do software RES2DINV.

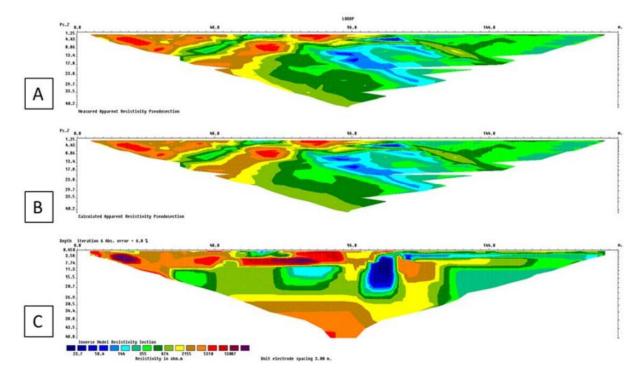


Figura 4.11 – Exemplo de dados de Eletrorresistividade em uma rotina de inversão. A: dado medido; B: dado calculado; C: dado invertido (Prosdocimi 2019).

4.4 GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA

A Arqueologia pode ser caracterizada como uma ciência que se debruça sobre o estudo da materialidade elaborada pelas sociedades humanas, como um dos aspectos de sua cultura, sem limitar-se ao caráter cronológico (Funari 2003), correspondendo então a uma das disciplinas científicas que estudam relações entre cultura material e sociedades estabelecidas ao longo da história.

A utilização da Geofísica Aplicada à Arqueologia vem ganhando notoriedade no meio científico, sendo aplicada principalmente em etapas preliminares e iniciais de investigações arqueológicas. Trabalhos como Papadopoulos *et al.* (2009, 2010), Noel *et al.* (1991), Mol *et al.* (2010), Van Schoor (2002) e Campana *et al.* (2008) correspondem a algumas das principais referências representativas da utilização da Geofísica em estudos arqueológicos, por meio do emprego de diferentes métodos em auxílio a investigações com os mais variados objetivos.

Estudos com objetivos de identificação de estruturas enterradas, subterrâneas ou submersas (tubulações, túmulos, fósseis e cavernas) representam as principais aplicações presentes na bibliografia científica.

Os métodos geofísicos que apresentam destaque quando relacionados à Arqueologia são os métodos gravimétricos, magnetométricos, eletromagnéticos, sísmicos e elétricos (Witten 2017). O método elétrico da Eletrorresistividade, empregado no presente estudo por meio da técnica da Tomografia Elétrica, também conhecida como Caminhamento Elétrico, apresenta-se como uma ferramenta que fornece alta resolução nos dados adquiridos, considerando a escala de investigação rasa da maioria dos estudos arqueológicos, e pode auxiliar no processo de conservação de sítios arqueológicos (Mol *et al.* 2010).

O método eletromagnético Radar de Penetração no Solo (*GPR*) também se apresenta como um dos principais métodos geofísicos associados à Arqueologia. Tal método, que apresenta alta resolução em profundidades rasas, é caracterizado pela emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, em um meio físico, com a posterior recepção dos sinais refletidos, a partir da ocorrência de descontinuidades no meio, sendo considerado um método de facilitada aquisição de dados em campo (Witten 2017).

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

5.1 AEROFOTOGRAMETRIA

A aquisição dos dados aerofotogramétricos, por meio da utilização de *drone* equipado com sistema *PPK*, pôde ser subdividida nas etapas de "pré-aquisição" e "aquisição". A aquisição ocorreu em um único dia, com a presença de piloto e observador, tendo sido planejadas malhas de voo de acordo com as condições operacionais e climáticas evidenciadas em período próximo à data definida para a atividade.

5.1.1 Etapa pré-aquisição

Tal etapa foi caracterizada por diversas atividades, desenvolvidas tanto em escritório quanto em campo:

- definição da malha de voo a ser realizada pelo *drone*, configurada de modo a ser representativa da área investigada (Parque Arqueológico do Morro da Queimada);
- definição de posicionamento dos pontos de apoio (pontos de controle e pontos de verificação),
 distribuídos de modo a serem representativos da área investigada;
- definição do modo de voo do drone (Voo básico no modo GPS GPS, acelerômetro, bússola e sensores de aproximação ativos);
- definição de parâmetros associados à aquisição aerofotogramétrica, como angulação da câmera,
 altura de voo, velocidade de voo, sobreposições de imagens e amplitude das grades do percurso;
- observação de condições meteorológicas (chuva, vento e índice Kp) durante o período programado para as aquisições;
- realização de pedido para autorização de voo.

A definição preliminar da malha de voo foi realizada de modo a englobar a maior extensão possível do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, de maneira que as porções representativas do Parque não estivessem localizadas em "bordas" da malha, assim, resultando em maiores sobreposições de imagens e então em maior qualidade e resolução dos produtos referentes ao mesmo.

Por meio de visitas de campo prévias e observações de ortofotomosaicos anteriores, desenvolvidos pela Fundação Gorceix, em 2018, foram definidas as posições dos pontos de apoio ao

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

longo da área, sendo os mesmos caracterizados por regiões identificáveis das ruínas ou pontos representativos de construções recentes (Figura 5.1).

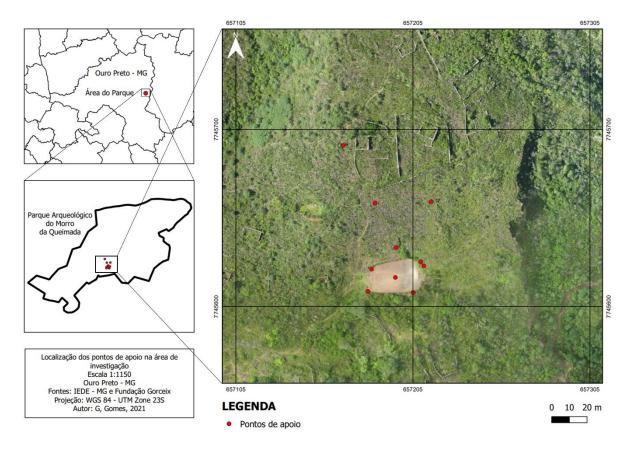


Figura 5.1 - Mapa de localização dos pontos de apoio na área de investigação.

O modo de voo do *drone* foi definido de acordo com as próprias especificações do equipamento utilizado e de acordo com as condições necessárias à aquisição fotogramétrica, sendo os parâmetros associados à aquisição apresentados na Figura 5.2, por meio de capturas de tela do *software Pix4Dcapture*.



Figura 5.2 - Parâmetros referentes às missões dos voos realizados. A: missão 1; B: missão 2.

Nos dias que antecederam a aquisição, foi realizado o acompanhamento de condições meteorológicas referentes à cidade de Ouro Preto e região, a fim de assegurar as condições ideais para a realização da atividade.

5.1.2 Etapa de aquisição

Tal etapa foi caracterizada por diversas atividades, desenvolvidas tanto em escritório quanto em campo:

- locação de áreas de pouso/decolagem para o drone;
- realização de testes de equipamentos (*drone*, cartão de memória e *groundstation*) e identificação de cargas em baterias;
- locação topográfica dos pontos de apoio;
- adequação da malha de voo devido a impossibilidades operacionais;
- voo e aquisição dos dados aerofotogramétricos.

O equipamento de aquisição aerofotogramétrica utilizado no trabalho foi o *drone Phantom* 4 *Pro V.* 2.0 (fabricante *DJI*), com sistema cinemático de pós-processamento (*post processed kinematic*) acoplado. Tal sistema é caracterizado pela interação do *drone* com um receptor *GNSS* em solo, que permite a coleta de dados georreferenciados com alta precisão e acurácia posicional, inseridos na etapa de processamento por meio da utilização de *softwares* específicos.

As áreas de pouso e decolagem foram definidas de acordo com as condições operacionais do terreno (vegetação, declividade, facilidade de acesso), sendo escolhidas uma área dentro do campo de futebol do Morro da Queimada (decolagem) e outra próxima ao referido campo (pouso). As áreas de

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

pouso e decolagem tiveram suas coordenadas obtidas, sendo utilizadas então como pontos de apoio (Figura 5.3).

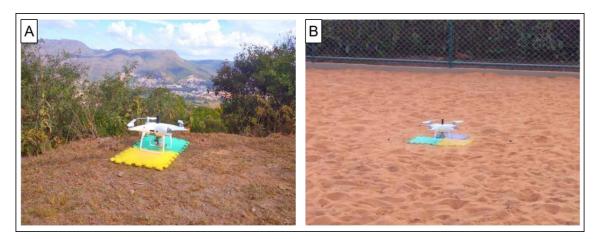


Figura 5.3 - A: drone posicionado na área de pouso; B: drone posicionado na área de decolagem.

Os testes dos equipamentos foram realizados por meio de *softwares* específicos, no caso do *drone* (*PIX4Dcapture* e *Ctrl+DJI*), e por inspeções visuais no caso dos outros equipamentos e componentes. Para locação topográfica dos pontos de apoio, foi utilizada a estação de base e o receptor instalado no próprio *drone* para aquisição das coordenadas geográficas referentes aos mesmos.

Devido à grande dimensão da área investigada, ao número restrito de baterias disponíveis e à necessidade de voar a altitudes acima de 120 metros na porção superior do Parque (nesse caso, seria necessária permissão da ANAC para voo), a malha de voo foi readequada (Figura 5.4), sendo dividida em duas missões para permitir o recobrimento da área de investigação, sem a ocorrência de voos acima de 120 metros de altura (com relação à superfície).



Figura 5.4 - Malhas de voo readequadas para a realização das aquisições. A: missão 1; B: missão 2.

O tempo total de voo foi de cerca de 27 minutos, e para isso foram utilizadas 2 (duas) baterias, sendo necessária a troca das mesmas entre as missões. O voo foi realizado com a presença de piloto e observador, com o acompanhamento visual do *drone* ao longo de todo o período de aquisição (Figura 5.5).

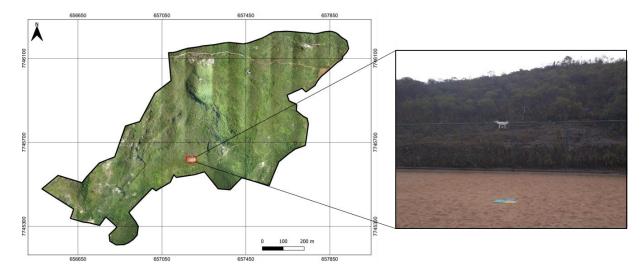


Figura 5.5 – Delimitação da área de decolagem no contexto do Parque e visualização do momento de decolagem da primeira missão de aquisição, modificado de Fundação Gorceix (2018).

5.1.3 Etapa de processamento

A etapa de processamento dos dados aerofotogramétricos foi realizada de acordo com o seguinte fluxograma, representativo de procedimentos a serem adotados em *softwares* específicos (Figura 5.6):

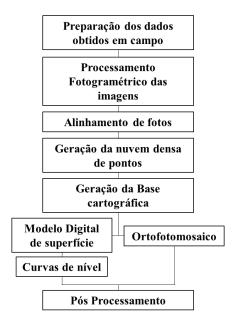


Figura 5.6 - Fluxograma representativo da etapa de processamento de dados aerofotogramétricos, modificado de Lopes (2019).

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

A etapa de preparação dos dados obtidos em campo se deu por meio da separação dos *data sets* referentes à base, ao *rover* e às fotos obtidas em diferentes diretórios, devidamente nomeados, com o objetivo de facilitar as etapas posteriores, referentes ao processamento dos dados em si.

Posteriormente, tais dados organizados foram processados com o emprego dos *softwares RTKconv* (Figura 5.7), responsável pela conversão de dados brutos, *e RTKpost* (Figura 5.8), responsável pela inserção de dados das aquisições feitas pela estação base, pelo *drone* e de informações necessárias para o processamento de alta precisão com o posicionamento *GNSS*.

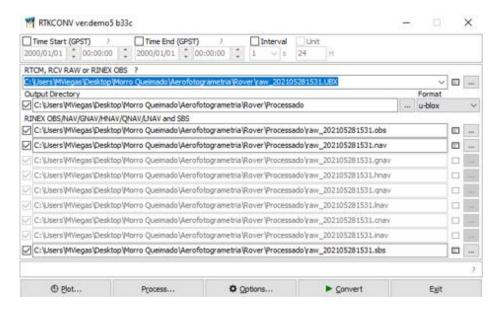


Figura 5.7 - Interface do software RTKconv e inserção dos dados adquiridos durante os voos.

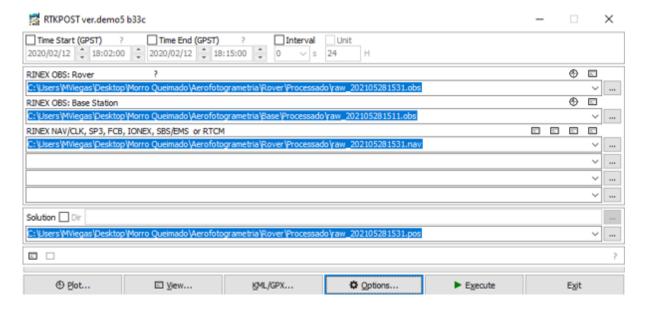


Figura 5.8 - Interface do software RTKpost e inserção dos dados adquiridos no RTKconv.

Após tais procedimentos, foi realizada a amarração, ou "tagging" das imagens obtidas pelo drone durante o voo, por meio da utilização do software T2R-Geotagger, que possibilitou o acurado georreferenciamento dos centros perspectivos de tais imagens (Figura 5.9).

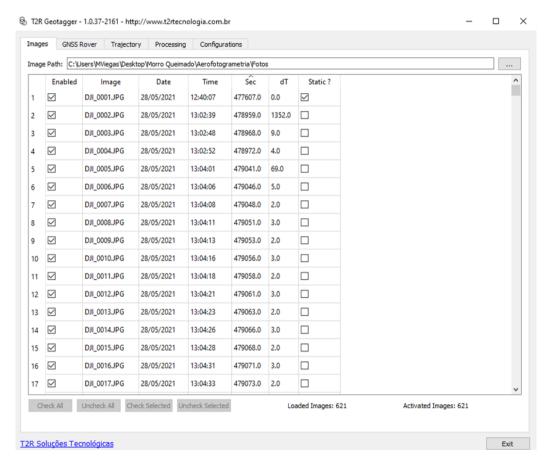


Figura 5.9 - Interface do software T2R Geotagger.

O processamento fotogramétrico do projeto foi realizado com o emprego do *software Agisoft Metashape*. No *software*, inicialmente foram inseridas as fotos devidamente georreferenciadas na etapa anterior e informações de calibração da câmera utilizada, como distância focal e tamanho do *pixel*.

Após, foi realizado um procedimento inicial de alinhamento de fotos, sendo desenvolvido de acordo com uma resolução baixa. As fotos não alinhadas em tal processo foram então removidas do conjunto. Logo em seguida foram adicionadas ao programa as informações dos pontos de apoio coletados, possibilitando então a filtragem de posição dos mesmos para cada fotografia associada (pontos de verificação e de controle foram separados de acordo com a seleção de caixas de preenchimento).

Na etapa seguinte, foi realizado um novo alinhamento de fotos, com resolução elevada, gerando assim uma *sparse cloud*. Com a *sparse cloud* gerada, foi possível a realização do procedimento de

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

geração de nuvem densa de pontos (*dense cloud*), que apresentou uma quantidade de aproximadamente 224 milhões de pontos (Figura 5.10).



Figura 5.10 - Nuvem densa de pontos gerada para o projeto no software Agisoft Metashape.

Para as etapas seguintes, foi adotado o procedimento de duplicação do arquivo referente ao projeto no *Agisoft Metashape*, para que diferentes produtos fossem gerados a partir de diferentes fluxos de trabalho. Para a geração de modelo digital de superfície (Figura 5.11), foi realizado um fluxo simples, sem classificação de pontos de acordo com seus atributos, enquanto para a tentativa de geração de modelo digital de tereno foi realizada uma classificação rigorosa da nuvem de pontos, por meio do emprego de funções presentes no *software*, porém, devido a algumas condições que serão explicitadas nas discussões dos resultados, o mesmo não foi passível de geração. Com o modelo digital de superfície finalizado, foi possível gerar curvas de nível representativas de superfície na região, interpoladas de acordo com variações de 1 metro (Figura 5.12) e 5 metros, com prevenção de interseções, na topografia do modelo.

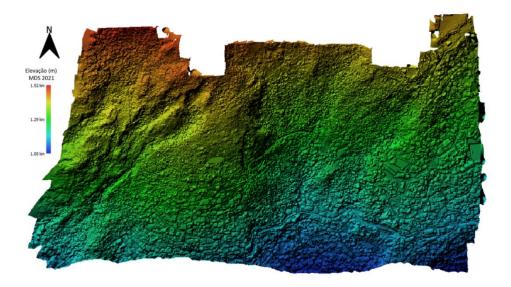


Figura 5.11 - Modelo digital de superfície gerado no software Agisoft Metashape.

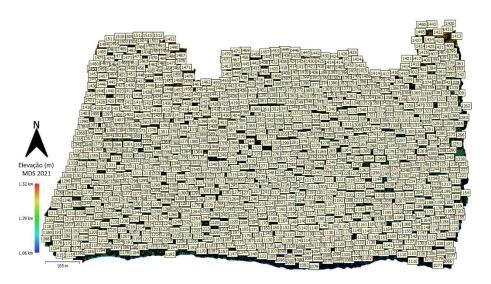


Figura 5.12 - Modelo digital de superfície e respectivas curvas de nível geradas a partir do mesmo no *software Agisoft Metashape*.

Para a geração de um ortofotomosaico (Figura 5.13), após a geração da nuvem densa de pontos foi feita a retirada de pontos espúrios e deslocados, a partir de ferramentas de seleção disponíveis no *software*, e então foi gerado um modelo *mesh*, representativo de uma superfície *heigth field*, utilizando como dados de fonte a nuvem densa filtrada. Foram então desenvolvidas texturas associadas à tal *mesh*, por um mapeamento do tipo ortofoto adaptativo, e após, foi construído o ortofotomosaico. O *pixel size* (x,y) localizado ao lado da aba referente ao ortofotomosaico no *Agisoft Metashape* corresponde ao *GSD* (3.9 cm/*pixel*) associado ao mesmo.

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

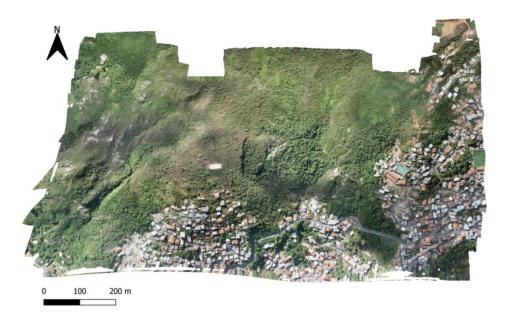


Figura 5.13 - Ortofotomosaico gerado no software Agisoft Metashape.

Posteriormente, tanto o ortofotomosaico quanto o modelo digital de superfície foram exportados do *software Agisoft Metashape*, e então inseridos no *software* de Cartografia Digital *Qgis*, com o objetivo de recortar os produtos de acordo com uma malha retangular, possibilitando a confecção de mapas temáticos (Figuras 5.14 e 5.15).

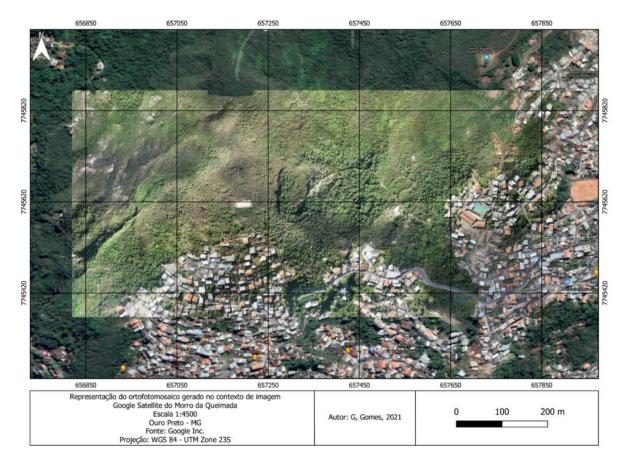


Figura 5.14 - Mapa com ortofotomosaico recortado e sobreposto à imagem *Google Satellite*.

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

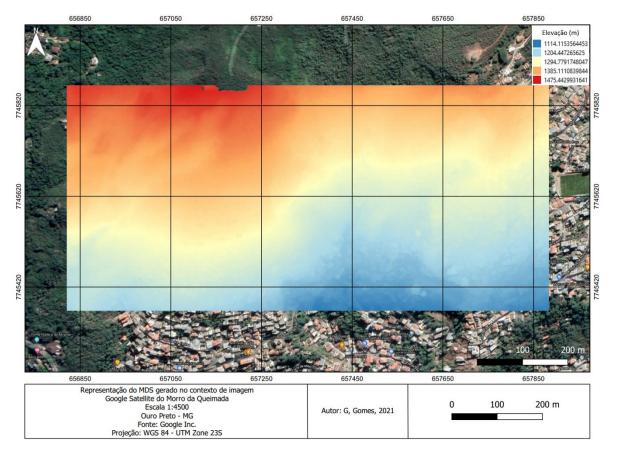


Figura 5.15 - Mapa com modelo digital de superfície recortado e sobreposto à imagem Google Satellite.

5.2 ELETRORRESISTIVIDADE

A aquisição dos dados geoelétricos, por meio do emprego do método da Eletrorresistividade na área de investigação, pôde ser subdividida nas etapas de "pré-aquisição" e "aquisição. O método da Eletrorresistividade foi utilizado com o objetivo de delimitar contrastes de resistividade elétrica, em subsuperfície, possivelmente associados aos contextos geológico e arqueológico do Parque Arqueológico do Morro da Queimada, facultando discussões e conclusões acerca dos mesmos A técnica empregada (Caminhamento Elétrico) possibilitou a investigação da variação de resistividade tanto lateralmente quanto verticalmente, ao longo dos diferentes perfis realizados. O Arranjo Dipolo-Dipolo foi o escolhido para o estudo, devido a fatores como versatilidade de sua disposição em campo, aceitável relação sinal-ruído, maior densidade de pontos de coleta, relação profundidade-resolução lateral adequada e histórico favorável de utilização em estudos com objetivos semelhantes.

5.2.1 Etapa pré-aquisição

Tal etapa foi caracterizada por diversas atividades, desenvolvidas tanto em escritório quanto em campo:

- campo de reconhecimento geral da área de estudo;
- análise bibliográfica referente ao Contexto Geológico local;
- definição da metodologia (Eletrorresistividade), técnica de campo (Caminhamento Elétrico) e arranjo de eletrodos (Dipolo-Dipolo) de acordo com os objetivos pretendidos;
- análise e localização de regiões propícias à realização dos levantamentos geofísicos;
- definição preliminar da posição das seções geofísicas, de seus comprimentos e do espaçamento entre os eletrodos, de modo a serem concordantes com os objetivos pretendidos;
- confecção de mapas e arquivos auxiliares para a etapa de Aquisição.

No dia 04/10/2019, foi realizada uma atividade de campo, em conjunto com pesquisadores do DEMUL-UFOP, inseridos na vertente da Arqueologia, para integração de conhecimentos e identificação de possíveis regiões de maior interesse para a realização dos levantamentos geofísicos no Parque Arqueológico do Morro da Queimada. Foi definida como área de maior interesse, na época, a região central das ruínas. Em tal atividade também foram verificadas prováveis impossibilidades operacionais, como ocorrências de vegetações densas, terrenos acidentados e/ou de difícil acesso.

Posteriormente, foi analisado o Contexto Geológico local, sendo identificada a área de aquisição geofísica como pertencente aos contextos do Supergrupo Minas, Grupo Itabira e Formação Cauê. Na área de aquisição, mostrou-se predominante a ocorrência de itabiritos friáveis e compactos, além de cangas lateríticas e terrenos arenosos, estes últimos dispostos antropicamente.

A metodologia (Eletrorresistividade) foi definida de acordo com o objetivo de imagear indiretamente a subsuperfície, possibilitando a realização de interpretações acerca de condições subsuperficiais da região, e a técnica do Caminhamento Elétrico, por possibilitar a obtenção de informações tanto horizontais quanto verticais, foi a escolhida para a realização das aquisições. O Arranjo Dipolo-Dipolo, por ser versátil, apresentar aceitável relação sinal-ruído, satisfatória relação profundidade-resolução lateral e ampla aplicação em estudos similares, foi o escolhido.

A partir do ortofotomosaico e do modelo digital de superfície gerados por meio dos processamentos referentes ao projeto, foram definidas regiões propícias à realização de levantamentos geofísicos. Tal etapa foi de extrema importância, uma vez que os produtos citados foram representativos das condições da área no período de aquisição (os levantamentos aerofotogramétricos foram realizados em maio e os levantamentos geofísicos em junho de 2021), sendo assim, esperado que as características

do terreno identificadas pelos produtos fossem condizentes com as características identificadas durante as aquisições geofísicas em campo.

O planejamento inicial das seções geofísicas foi dividido em malhas, sendo a malha 1 representativa das linhas 1 e 2, e a malha 2 das linhas 3 e 4. A malha 1, de sentido SW-NE, apresentava linhas com 150 metros de comprimento, com eletrodos espaçados a cada 10 metros e espaçamento entre linhas de 10 metros. A malha 2, de sentido NW-SE, apresentava as mesmas configurações de comprimento e espaçamento que a malha 1. Tal planejamento objetivava a obtenção de informações de subsuperfície em profundidades de até 30 metros, aproximadamente.

5.2.2 Etapa de aquisição

Tal etapa foi caracterizada por diversas atividades, desenvolvidas tanto em escritório quanto em campo:

- realização de testes de equipamentos (resistivímetro e cabos) e de cargas em baterias;
- locação das seções geofísicas pré-definidas na área de interesse;
- alteração de posições e orientações de seções geofísicas pré-definidas, devido a impossibilidades operacionais e proibição de aberturas de picadas;
- aquisição dos dados de Eletrorresistividade;
- obtenção de coordenadas planimétricas das linhas com o uso de GPS Garmin.

O equipamento de aquisição geofísica utilizado no trabalho foi o resistivímetro X5xtal (fabricante Auto Energia), acompanhado de uma bateria, dois multímetros digitais, cabo e eletrodos metálicos.

Inicialmente, foram realizados os testes de equipamentos e baterias, realizando medições e aquisições de teste, para verificação de correto funcionamento dos mesmos.

Posteriormente, os locais de aquisição planejada (pré-definida) foram identificados, e foram constatadas impossibilidades operacionais associadas aos mesmos. Tais impossibilidades, caracterizadas por grandes desníveis topográficos, dificuldades de locomoção e presença de vegetações densas, já haviam sido identificadas a partir da análise do ortofotomosaico, modelo digital de superfície e curvas de nível desenvolvidos durante o presente estudo, e foram confirmadas no campo de aquisição. Somada às condições anteriores, a proibição de abertura de picadas na área do Parque também contribuiu para a definição de necessidade de readequação das seções previamente planejadas.

Assim, as seções geofísicas planejadas foram readequadas, de acordo com critérios de exequibilidade e proximidade das ruínas, e então as seções referentes à malha de aquisição 2 (linhas 3 e 4) tiveram suas posições alteradas, sendo deslocadas para área adjacente ao campo de futebol do Morro da Queimada, tendo os seus quantitativos de aquisição diminuídos (80 metros de comprimento cada), seus espaçamentos entre eletrodos e entre linhas alterados (alterados para 5 metros cada) e suas orientações alteradas para E-W. A malha 1 teve somente o seu espaçamento entre linhas alterado (de 10 metros para 5 metros).

Após tal etapa, foram realizadas as aquisições dos dados de Eletrorresistividade (Figura 5.16), realizadas em ordem cronológica, da linha 1 à linha 4. Os valores de resistividade aparente, diferença de potencial e resistência de contato obtidos para cada seção durante as aquisições foram dispostos em planilhas *Excel*, desenvolvidas para esse tipo de aquisição, para posterior análise e processamento.



Figura 5.16 - Equipamentos em campo durante as aquisições geofísicas.

Foram coletadas coordenadas planimétricas com a utilização de um GPS *Garmin*, sendo os pontos de coleta referentes às posições dos eletrodos ao longo das linhas de aquisição. Tais coordenadas foram inseridas em planilhas e posteriormente inseridas em *softwares* CAD e GIS, para visualização das seções geofísicas executadas (Figura 5.17). Como a Figura 5.17 mostra, evidenciou-se que as seções referentes à malha de aquisição 1 (L-01 e L-02) não apresentaram uma orientação estritamente linear, devido a impossibilidades operacionais como proibição de abertura de picadas e ocorrência de vegetações densas, por exemplo, mas que ainda assim foram interpretadas como aceitáveis em relação às impossibilidades associadas às malhas do primeiro planejamento das aquisições, e portanto, deu-se continuidade às demais etapas do projeto mesmo com a ocorrência de tais desvios de linearidade.

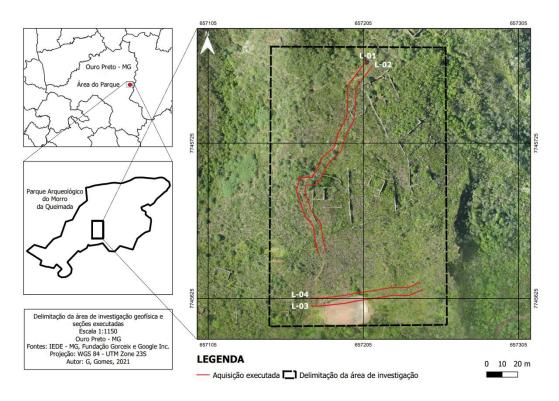


Figura 5.17 - Mapa de delimitação, em planta, da área de investigação geofísica e seções executadas.

5.2.3 Etapa de processamento

Inicialmente, foram realizadas análises qualitativas dos dados adquiridos, presentes em planilhas desenvolvidas, objetivando a identificação de possíveis erros de leituras e problemas na aquisição, para posteriores remediações. Em seguida, os dados foram organizados e separados de acordo com as linhas de aquisição, e então inseridos no *software* de inversão de dados geoelétricos *RES2DINV*.

Então, foram realizadas análises das pseudo-seções adquiridas, representativas das distribuições aproximadas dos pontos de resistividade aparente medida em subsuperfície, permitindo a filtragem de dados, por meio da identificação de pontos com valores incomumente altos ou baixos, destoantes dos demais. Por razão da ocorrência de alguns pontos com valores extremamente altos nos *data sets* obtidos, interpretados como erros de leitura, foi aplicado um filtro de *cut off* nas medidas de resistividade aparente, no valor de 20.000 ohm.m., com a finalidade de refinar as informações dos modelos invertidos posteriormente gerados no intervalo 0-20.000 ohm.m.

Após, foram realizadas as rotinas de inversão para os dados adquiridos. Devido à grande variação de resistividade observada no conjunto de dados, foi utilizado um modelo de blocos com *damping factor* inicial de 0,25 (fator que restringe os valores de resistividade no modelo invertido, aproximando-os dos valores medidos). As inversões, para cada linha, ocorreram a partir de 7 iterações,

com redução do efeito de bordas de seção e aplicação de filtros para horizontalização de feições, e o *RMS error* (diferença entre o modelo observado e o calculado) variou entre 10 e 21%, aproximadamente, configurando então modelos invertidos relativamente atendíveis. Os modelos invertidos foram desenvolvidos com a presença da topografia das aquisições, sendo os dados planimétricos obtidos com GPS *Garmin* e os dados altimétricos selecionados a partir do MDS gerado.

Após a realização das inversões, foi executado um processo de normalização das resistividades representativas da escala de cores, para todas as seções invertidas, devido à grande variação de valores de resistividade elétrica, intrínseca ao parâmetro e à maioria das aquisições de Eletrorresistividade. Em consequência ao fato de todas as seções terem sido adquiridas em um mesmo terreno, representando condições relativamente semelhantes de subsuperfície, tal ferramenta apresenta-se interessante, uma vez que facilita a execução de correlações e interpretações para as seções invertidas inseridas em um mesmo contexto geológico/hidrogeológico.

Posteriormente, os valores de coordenadas e resistividade de cada bloco dos modelos foram exportados em extensão ASCII, possibilitando a importação de tais conjuntos de dados em *softwares* específicos, como *Surfer* e *Leapfrog Works*, para posterior geração de modelos 2D e contextualizações em 3D. No *Surfer*, foram gerados *grids* a partir do método de "Triangulação com Interpolação Linear", então, resultando nos modelos 2D representativos das seções invertidas de cada linha de aquisição geofísica, que foram posteriormente inseridos em uma contextualização tridimensional e georreferenciada, com os demais produtos do trabalho, no *software Leapfrog Works*.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação das informações adquiridas durante as etapas de levantamento bibliográfico, aquisição de dados de campo, processamento, análise, interpretação conjunta dos resultados aerofotogramétricos e geofísicos e modelagem permitiu assumir algumas considerações que serão expostas a seguir.

Os dados gerados por Aerofotogrametria e Geofísica, descritos anteriormente, aliados a informações presentes na bibliografia, forneceram informações acerca da validação dos procedimentos ordenados de aquisição adotados.

Os produtos gerados permitiram caracterizações qualitativas e quantitativas acerca da área investigada, realizadas inclusive a partir de perspectivas temporais, por meio da realização de comparações com resultados de projetos anteriores, também referentes ao Parque. Além disso, possibilitaram a sugestão e/ou caracterização de possíveis materiais em subsuperfície, da presença de zonas possivelmente saturadas e de possíveis especificações arqueológicas.

6.1 **AEROFOTOGRAMETRIA**

Os produtos gerados a partir do processamento dos dados aerofotogramétricos (ortofomotosaico e modelo digital de superfície) permitiram a obtenção de informações e a determinação de condições associadas ao Parque Arqueológico do Morro da Queimada por meio de fotointerpretação. A Figura 6.1 ilustra a representatividade dos produtos obtidos acerca dos limites do Parque. Como citado no Item 5.1.2, condições como a baixa disponibilidade de baterias e a necessidade de voos acima de 120 metros de altura foram fatores limitantes que impediram um maior recobrimento amostral da região de investigação.

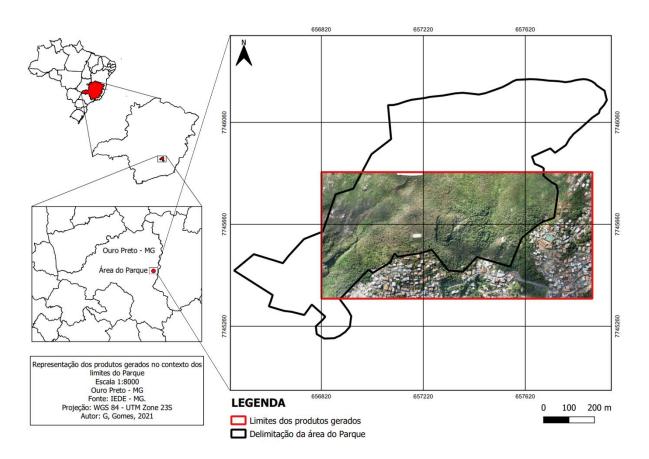


Figura 6.1 - Mapa representativo dos limites dos produtos gerados, contextualizados com os limites do Parque.

Por meio da análise e interpretação do ortofotomosaico obtido, foi possível observar que grande parte da área de investigação encontra-se em um contexto de vegetações densas, de médio a grande porte, caracterizadas, principalmente, por porções com predomínio arbustivo e porções com predomínio de espécies de maiores dimensões. Também foi possível identificar porções residenciais, caracterizadas pela ocorrência de casas, ruas e demais construções associadas, referentes aos bairros Morro da Queimada e Morro Santana, além de porções com vegetações de pequeno porte e/ou desmatadas, principalmente na porção caracterizada como circundante ao campo de futebol do Morro da Queimada.

Além disso, o ortofotomosaico possibilitou a observação de grandes escavações, citadas por Sobreira (2014), como resquícios e evidências da atividade mineira de séculos anteriores. Tais escavações são observadas como porções de topografia mais baixa em relação a porções adjacentes, reologicamente mais resistentes, e contínuas, principalmente, nas direções NE-SW e N-S (Figura 6.2), o que permitiu a vetorização de lineamentos representativos da existência das mesmas no *software Qgis*. Além da associação anterior, tais lineamentos também podem ser representativos da ocorrência de zonas fraturadas, devido ao contexto polideformado da área.

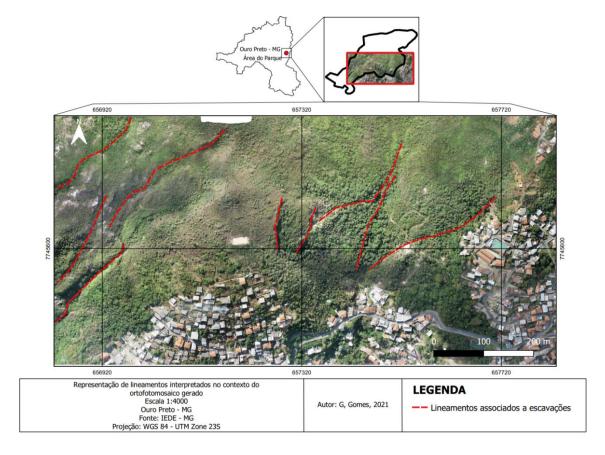


Figura 6.2 - Identificação das porções classificadas e de feições associadas a escavações a partir do ortofotomosaico obtido.

Por meio da análise e integração ao modelo digital de superfície, da aplicação de processos de sombreamento (Figura 6.3) e da observação das curvas de nível obtidas, foi possível identificar a variação e a conformidade topográfica da região. De modo geral, foi perceptível que a porção caracterizada, no ortofotomosaico, como circundante ao campo de futebol, apresentou baixa variação topográfica quando comparada às demais porções do modelo, e que as porções com maior variação topográfica foram justamente as porções próximas aos *trends*, identificados no ortofotomosaico e associados a escavações mineiras de séculos passados. As porções residenciais também apresentaram variações topográficas significativas, o que se relaciona principalmente com a condição de ocorrência de tais construções, localizadas no contexto de morros do município de Ouro Preto. A aplicação de processos de sombreamento no modelo digital de superfície possibilitou um balizamento das interpretações referentes aos lineamentos/*trends* identificados no ortofotomosaico, uma vez que, a partir do produto gerado, foi possível identificar certa consonância de padrões associados à contrastes topográficos com os lineamentos supracitados. Tais padrões são caracterizados tanto por cores frias (azuladas), associadas à "vales" (porções de menor topografia com relação ao redor), quanto por cores quentes (avermelhadas), associadas à testemunhos de relevos anteriores (porções de maior topografia e

possivelmente maior resistência), e se mostraram parcialmente contínuos, espacialmente, com relação aos lineamentos interpretados.

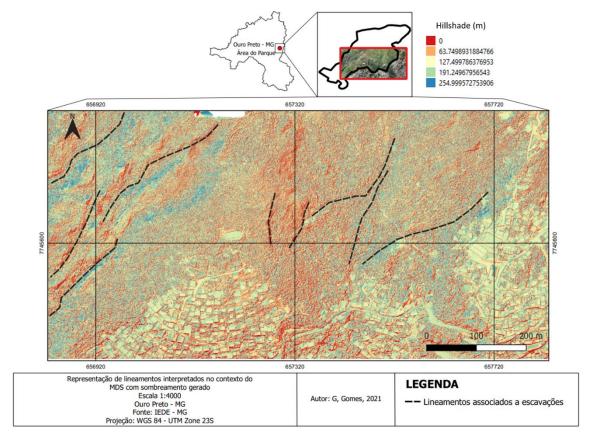


Figura 6.3 - Identificação das porções classificadas e de feições associadas a escavações a partir do ortofotomosaico obtido, confrontadas com o modelo digital de superfície sombreado.

6.1.1 Comparação de produtos

Após a realização das análises e interpretações anteriores, os produtos obtidos no presente estudo foram confrontados e comparados com produtos de uma aquisição realizada no ano de 2018, pela Fundação Gorceix, uma instituição filantrópica vinculada à Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Inicialmente foi realizado o recorte dos produtos obtidos pela Fundação, uma vez que os mesmos abrangeram uma região de maiores dimensões com relação aos produtos do presente trabalho, possibilitando, assim, as análises dispostas a seguir. Os modelos digitais de superfície foram caracterizados de acordo com a mesma escala cromática (banda simples falsa cor), e interpolados linearmente de acordo com os valores de elevação associados. As curvas de nível do presente trabalho

foram geradas, interpretadas e comparadas a partir de um mesmo intervalo de 5 metros, com prevenção de interseções.

Por meio da comparação dos ortofotomosaicos (Figura 6.4), foi possível observar que, no período de 2018 a 2021, houve crescimento e expansão da vegetação na região, identificados por certo incremento de rugosidade associada, sendo tal identificação visível principalmente na região central das ruínas. Por meio da comparação visual das condições da vegetação, a partir de visitas de campo nos anos de 2019 e 2021, tal constatação mostrou-se aderente e verdadeira.

Além disso, com relação ao crescimento urbano na região, não foi observado um avanço aparente de construções, no intervalo temporal de análise, em direção ao território pertencente ao Parque, sendo assim constatado que os limites referentes ao Parque Arqueológico estão sendo respeitados e mantidos. Também foi constatado que ambos os ortofotomosaicos, com relação à imagem *Google Satellite* da área, apresentaram maior resolução de imageamento e melhor representação cromática das condições de superfície.

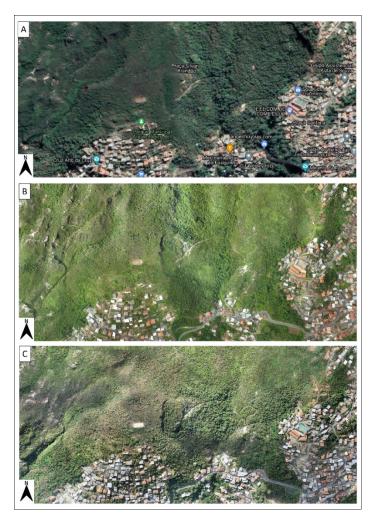


Figura 6.4 - Comparação dos ortofotomosaicos referentes às aquisições com imagem *Google Satellite*. **A:** *Google Satellite*, 2020; **B**: Fundação Gorceix, 2018; **C**: presente estudo, 2021.

Por meio da comparação dos modelos digitais de superfície, em suas versões originais e sombreadas, e das curvas de nível obtidas (Figuras 6.5 a 6.7), foi possível observar que, no período de 2018 a 2021, não ocorreram tantas diferenciações nos padrões de distribuição topográfica na região. Modelos digitais de superfície não são necessariamente representativos das condições de terreno, uma vez que a superfície pode ser definida por topos de árvores, topos de construções e outras estruturas, diferentemente do terreno, definido como a porção de menor altimetria com relação ao eixo vertical, ou seja, o chão propriamente dito, mas ainda assim, forneceram, no presente trabalho, um bom indicativo das condições topográficas na região.

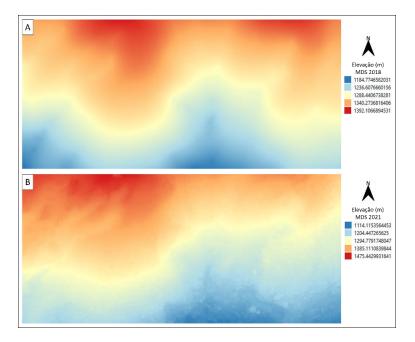


Figura 6.5 - Comparação dos modelos digitais de superfície. **A**: Fundação Gorceix, 2018; **B**: presente estudo, 2021.

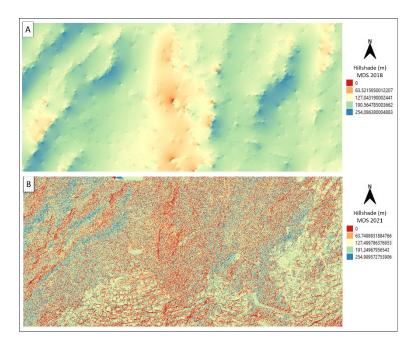


Figura 6.6 - Comparação dos modelos digitais de superfície com aplicação de sombreamento. **A**: Fundação Gorceix, 2018; **B**: presente estudo, 2021.

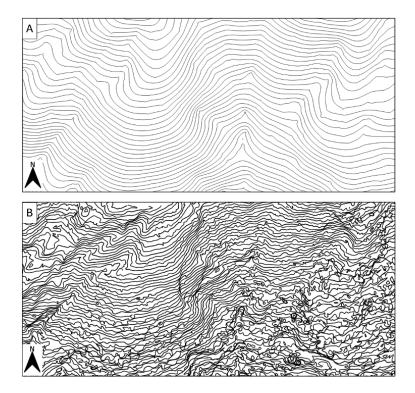


Figura 6.7 - Comparação das curvas de nível geradas a partir dos modelos digitais de superfície. **A**: Fundação Gorceix, 5 em 5 metros, 2018; **B**: presente estudo, 5 em 5 metros, 2021.

Como apresentado anteriormente, tanto os modelos digitais de superfície quanto as curvas e nível, representativos das aquisições em 2018 e 2021, apresentaram padrões de distribuição e geometria

contínuos ao longo do tempo. As aquisições de 2021, como pode ser observado nos produtos supracitados, apresentaram maior resolução nos dados obtidos e utilizados, tornando menor a suavização e a continuidade de feições e geometrias.

Devido às condições intrínsecas à área, como a presença de vegetações densas e de médio/grande porte, interpolações para a geração de modelos digitais de terreno não se mostraram efetivas, não permitindo a separação terreno/superfície a partir da nuvem densa de pontos gerada e a consequente classificação representativa de terreno. Logo, reafirmando, as curvas de nível geradas a partir do modelo digital de superfície atual não são necessariamente representativas das condições topográficas de terreno, e sim de suas condições de superfície.

6.2 ELETRORRESISTIVIDADE

Os modelos de resistividade elétrica gerados (Figura 6.8) a partir dos perfis adquiridos (Figura 5.17) atingiram profundidades reais de até 35 metros, aproximadamente. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes, possibilitando a realização de interpretações acerca de diferentes características do meio, em subsuperfície.

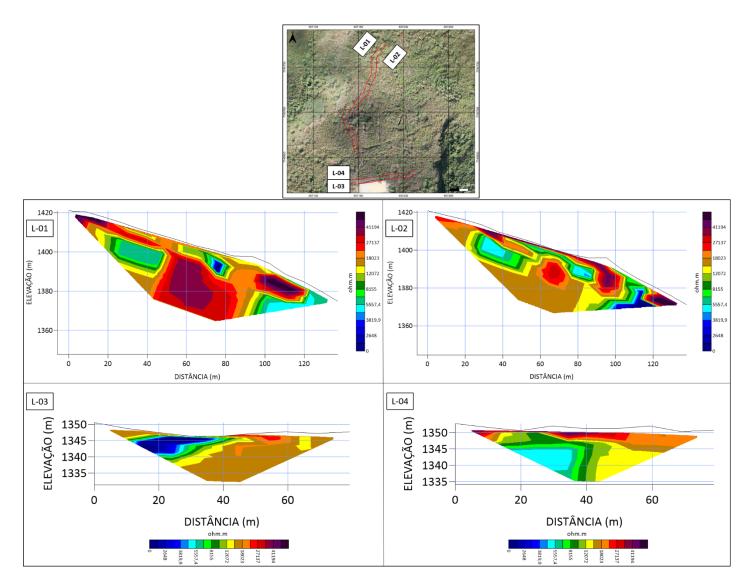


Figura 6.8 - Modelos de resistividade representativos das seções invertidas L-01, L-02, L-03 e L-04.

Em função da orientação evidenciada dos perfis geofísicos, os modelos foram interpretados em conjunto (L-01 a L-04), de modo generalizado, e em grupos separados (L-01 e L02, L-03 e L-04), de modo mais específico, devido à proximidade e paralelismo entre os perfis presentes em um mesmo grupo.

É importante salientar que as interpretações desprendidas a partir dos modelos geofísicos desenvolvidos, adquiridos a partir de medições indiretas, apresentam-se como possibilidades, e devido à falta de estudos balizadores associados ao presente trabalho, como trabalhos de sondagem e escavação, mapeamentos espeleológicos e monitoramentos de nível d'água, não são necessariamente representativas das condições reais de subsuperfície, uma vez que diferentes materiais e condições em subsuperfície podem assinalar respostas geofísicas semelhantes.

6.2.1 Análise conjunta dos dados de Eletrorresistividade

Em análise conjunta, os resultados obtidos possibilitaram a diferenciação dos valores obtidos em intervalos de resistividades baixas, intermediárias e altas. Tal diferenciação foi realizada em caráter comparativo, possibilitando um entendimento mais claro dos resultados e a realização de discussões e interpretações baseadas e auxiliadas por tal artifício.

As zonas de resistividade alta apresentam valores acima de 18.023 ohm.m e as zonas de resistividade baixa valores abaixo de 3.819,9 ohm.m, sendo os valores existentes entre os dois limites identificados associados a zonas de resistividade intermediária (Figura 6.9).

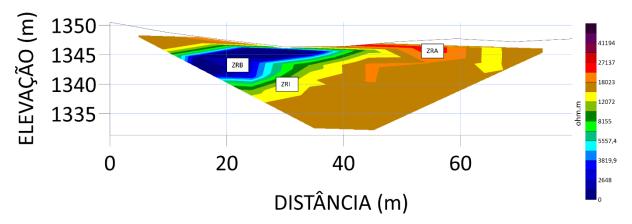


Figura 6.9 - Modelo de resistividade da seção invertida L-03, com a identificação de porções representativas das zonas definidas. ZRB: zona de resistividade baixa; ZRI: zona de resistividade intermediária; ZRA: zona de resistividade alta.

A partir da definição de intervalos de resistividade, as seções foram analisadas em virtude de características do contexto geológico local. Para essas análises, foi realizada uma contextualização no software Qgis, na qual as coordenadas planimétricas das seções geofísicas adquiridas foram inseridas

como pontos (coordenadas das posições dos eletrodos e de pontos intermediários entre eles, coletadas com GPS), e confrontadas com informações SIG do Mapa Geológico de Mariana (Baltazar *et al.* 2005), em escala 1:50.000. Tal contextualização possibilitou a identificação das regiões de locação das seções geofísicas como inseridas em domínios da Formação Cauê e de depósitos cenozoicos.

Na área de aquisição dos dados geofísicos, em superfície, é predominante a identificação de itabiritos e cangas lateríticas com a ocorrência de capeamentos limoníticos (Figura 6.10), segundo mapeamento de Baltazar *et al.* (2005).

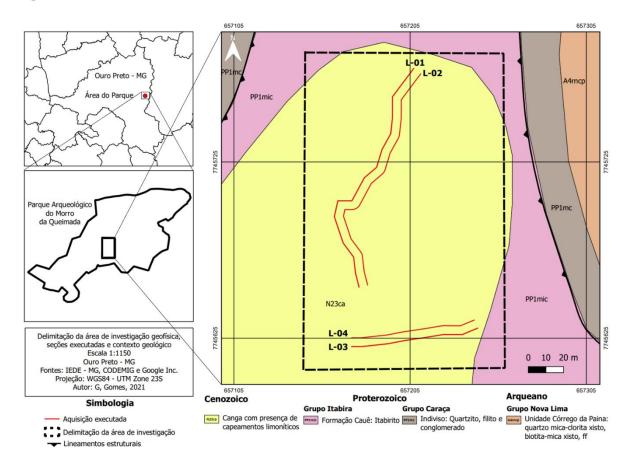


Figura 6.10 - Mapa de delimitação, em planta, da área de investigação geofísica e seções executadas, em contextualização com o mapeamento geológico de Baltazar *et al.* (2005) e dados estruturais de Endo *et al.* (2019a).

De modo geral, rochas cristalinas e possíveis materiais de alteração como cangas lateríticas tendem a apresentar altos valores de resistividade associados, principalmente em razão de suas altas densidades e baixas permeabilidades atreladas. Entretanto, a presença de fraturas nesses materiais pode induzir diminuições de suas resistividades, justamente pela razão de fraturas serem descontinuidades que podem possibilitar a ocorrência de possíveis caminhos preferenciais de percolação de materiais saturados, condutivos. Fraturas geralmente se apresentam em dados geofísicos como zonas de menores resistividades encaixadas em padrões mais resistivos, e devido ao metamorfismo da Formação Cauê, de

baixo a médio grau, e à Zona de Cisalhamento São Bento, evidenciada no contexto do Parque, é esperada certa ocorrência de materiais fraturados no cenário das aquisições geofísicas.

A partir das constatações anteriores, foi definida uma conexão entre os intervalos de resistividade definidos (zonas de resistividade) e a geologia local, possibilitando a realização de interpretações acerca de possíveis materiais geológicos em subsuperfície.

De modo geral, as zonas de resistividade alta (ZRA) podem estar associadas a materiais/rochas com características mais compactas, sãs, que apresentam baixa porosidade e permeabilidade associadas, tornando o meio mais resistivo. As zonas de resistividade baixa (ZRB) podem estar associadas a materiais/rochas com características mais friáveis, fraturadas, que tendem a apresentar maior permeabilidade secundária associada, e assim, possibilitam a ocorrência de percolações, tornando o meio menos resistivo, e as zonas de resistividade intermediária (ZRI), por sua vez, podem estar associadas a materiais/rochas com características que se encontram em condições interpostas entre as condições descritas para ZRA e ZRB.

6.2.2 Análise em grupos dos dados de Eletrorresistividade

Tal análise foi realizada a partir da segregação dos resultados em Grupo 1 (L-01 e L-02) e Grupo 02 (L-03 e L-04), de acordo com a proximidade entre as linhas, que foi de aproximadamente 5 metros, e o paralelismo entre as mesmas, facultando a realização de interpretações acerca da continuidade de feições e possíveis causas para as mesmas.

A análise das seções pertencentes ao Grupo 1 possibilitou a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si (Figura 6.11), que foram analisadas particularmente e em associação aos contextos geológicos e arqueológicos da área de investigação.

Com relação ao contexto arqueológico, o objetivo de interpretação foi direcionado à identificação de anomalias possivelmente associadas a zonas de acúmulo de saturação/água, que eventualmente permitiram a instalação de residências e todo o processo de extração de ouro na área, uma vez que a mesma representa um alto topográfico no contexto da Serra de Ouro Preto, e, portanto, é apropriado ponderar que dificuldades na captação de água poderiam ocorrer no passado. Sem água, os processos de separação de ouro nos mundéus e tarefas domésticas e cotidianas não seriam possíveis, e a partir da evidência de vestígios de aquedutos e reservatórios em regiões próximas (Brito Bueno 2019), é plausível uma associação de tais estruturas com a ocorrência de zonas fraturadas, que possibilitam acúmulo de água.

A tendência geral de observação de zonas fraturadas com presença de água em dados geofísicos é a de ocorrência de valores de baixa resistividade (água é muito condutiva), enquanto zonas fraturadas sem a presença de água, ou com menor saturação associada, apresentam tendências mais intermediárias.

A feição identificada como 1 é representada por um padrão de alta resistividade, de morfologia aproximadamente circular, contínua lateralmente, que se apresenta com maiores dimensões no modelo da seção L-01 em relação ao modelo da seção L-02. Tal feição, de acordo com as características descritas anteriormente, pode ser representativa da ocorrência de material/rocha mais preservado(a) e compacto(a), e a continuidade da feição ao longo de modelos desenvolvidos a partir de aquisições paralelamente dispostas corrobora com tal interpretação.

A feição identificada como 2, mais superficial com relação à feição 1, é representada por um padrão de baixa resistividade, de morfologia aproximadamente circular, encaixado em um padrão mais resistivo, que se apresenta com dimensões similares nos dois modelos. Também de acordo com as características descritas anteriormente, tal feição pode ser representativa da ocorrência de material/rocha menos preservado(a), menos compacto(a) e mais fraturado(a), nesse caso, parcialmente saturado(a) e/ou com a presença de percolações.

A feição identificada como 3 é similar à feição 2, porém, apresenta maior continuidade lateral, e assim, maiores dimensões com relação à supracitada. De acordo com suas características, também pode ser representativa de materiais mais fraturados, parcialmente saturados e/ou com a presença de percolações.

A feição identificada como 4, localizada na porção final dos modelos, apresenta-se como uma interface entre um horizonte mais superficial, de alta resistividade, e um horizonte mais profundo, de baixa resistividade, que em algumas porções apresenta certo espraiamento em direção a elevações mais superficiais. De acordo com as características descritas, com a expressão lateral, a disposição horizontalizada e a conexão subvertical com áreas condutivas superficiais que a porção de baixa resistividade apresenta, a mesma pode ser associada a um possível nível saturado, de ocorrência em materiais fraturados, que possivelmente recebe aportes de superfície, caracterizando assim uma possível zona de recarga.

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

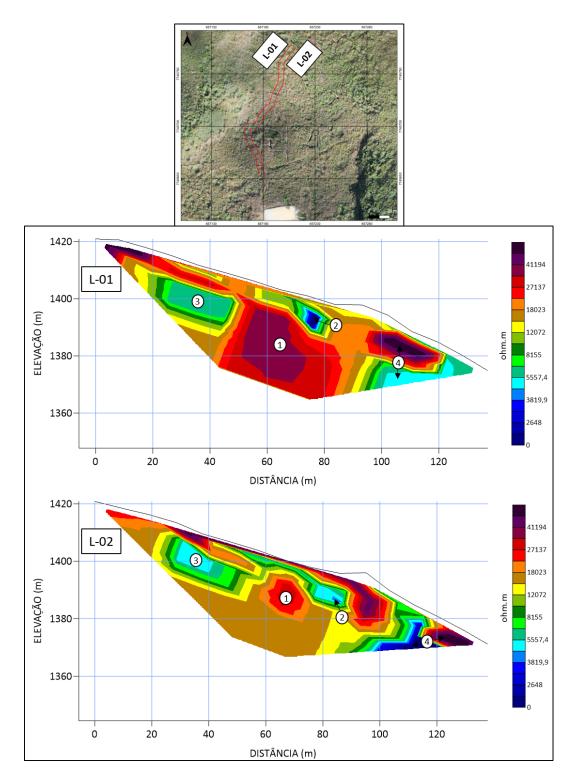


Figura 6.11 - Modelos de resistividade das seções invertidas L-01 e L-02, com a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si.

A análise das seções pertencentes ao Grupo 2 possibilitou a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si (Figura 6.12), que foram analisadas particularmente e em associação aos contextos geológicos e arqueológicos da área de investigação.

Com relação ao contexto arqueológico, o objetivo de interpretação foi direcionado à identificação de anomalias possivelmente associadas a níveis saturados em profundidade, uma vez que os perfis do Grupo 2 foram executados em região relativamente próxima de ruínas de mundéus presentes no Parque. Por serem estruturas que demandavam grandes volumes de água para a separação do ouro, os cursos naturais de água, nos séculos passados, eram desviados em direção aos mesmos, possibilitando então os processos de beneficiamento mineral do passado.

A feição identificada como 1 é representada por um padrão de baixa resistividade, de morfologia aproximadamente horizontalizada, que se apresenta mais superficial no modelo da seção L-03 em relação ao modelo da seção L-04, indicando, de acordo com as elevações associadas aos dados, nas proximidades de 1345 m, certo aplainamento do comportamento condutivo. Tal feição, de acordo com as características descritas anteriormente, pode ser representativa da ocorrência de um nível parcialmente saturado, apresentando a porção da feição 1 na seção L-03 um comportamento mais próximo ao de uma zona de recarga, próximo de superfície. A continuidade da feição ao longo de modelos desenvolvidos a partir de aquisições paralelamente dispostas corrobora com tal interpretação.

As feições identificadas como 2 e 3, mais superficial e mais profunda, respectivamente, podem estar associadas a materiais mais compactos, menos fraturados, sendo a interface das mesmas com a feição 1 delimitada por contatos laterais abruptos entre resistividades altas/intermediárias e baixas, tendendo à verticalidade. Tal comportamento é típico da ocorrência de descontinuidades em dados geoelétricos, e sua persistência ao longo de seções paralelamente dispostas é um fator que possibilita tal interpretação.

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

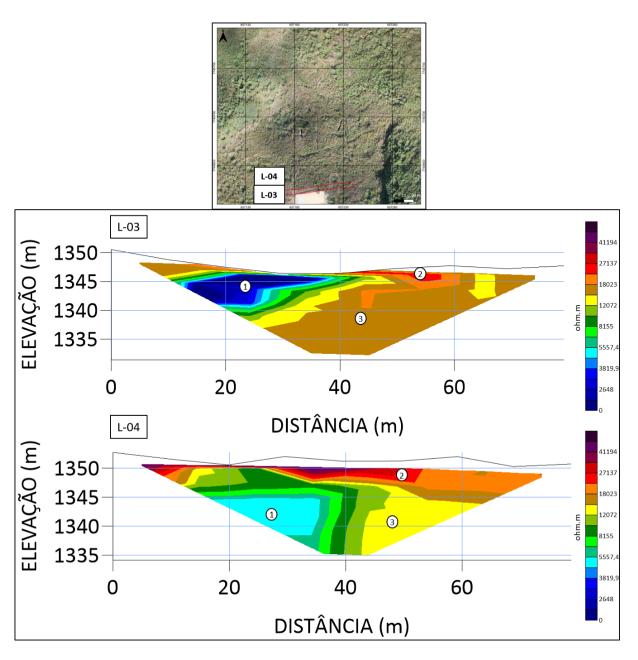


Figura 6.12 - Modelos de resistividade das seções invertidas L-03 e L-04, com a identificação de feições contínuas e espacialmente concordantes entre si.

É interessante constatar que as aquisições geofísicas ocorreram em período de estiagem (seca), e, sendo assim, os dados analisados tenderam a apresentar maiores resistividades associadas, que perfis geofísicos em direção NW-SE, propostos inicialmente de acordo com os objetivos pretendidos, não foram realizados devido a impossibilidades operacionais, e que os resultados obtidos a partir do emprego do método da Eletrorresistividade não foram satisfatórios para a delimitação de possíveis ruínas em profundidade.

Possíveis novas aquisições na área em períodos chuvosos poderiam balizar e assegurar as interpretações elaboradas neste trabalho, sendo recomendado, no caso de objetivos voltados à identificação de ruínas, a realização de malhas mais densas de perfis geoelétricos, distribuídas ao longo da região central das ruínas, com menor espaçamento entre eletrodos, possibilitando assim maior resolução em subsuperfície, e com a utilização de cabos multieletrodo com maior quantidade de conexões, que auxiliariam na preservação de comprimento dos perfis, resultando no imageamento de profundidades próximas das investigadas neste trabalho.

Além das novas aquisições com o método da Eletrorresistividade, é sugerido o emprego do método Radar de Penetração no Solo (*GPR*). Devido a cangas lateríticas e itabiritos possivelmente causarem alta atenuação do sinal eletromagnético emitido pelo equipamento, seu emprego é sugerido principalmente nas porções, segundo o mapeamento de Baltazar *et al.* (2005), associadas ao Grupo Caraça, representadas por quartzitos, filitos e conglomerados, e ao Grupo Nova Lima, representadas essencialmente nesse caso por xistos. O método, extensamente aplicado em estudos arqueológicos, apresenta alta resolução de imageamento em baixas profundidades, e poderia auxiliar possíveis delimitações de ruínas em subsuperfície.

6.3 INTEGRAÇÃO DOS PRODUTOS

O *software* de modelagem e contextualização tridimensional *Leapfrog Works* foi utilizado para a integração dos produtos gerados por Aerofotogrametria e Geofísica.

Inicialmente, no *software*, foram inseridas as curvas de nível geradas, como *polylines*, possibilitando a geração de uma superfície *mesh* e posteriormente a geração de uma superfície topográfica (Figura 6.13). Após o processo, foi realizado um *drap* do ortofotomosaico gerado, sobre a superfície topográfica gerada anteriormente, dando origem a uma representação tridimensional do terreno investigado que facilita a visualização e o entendimento das condições da área (Figura 6.14).

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

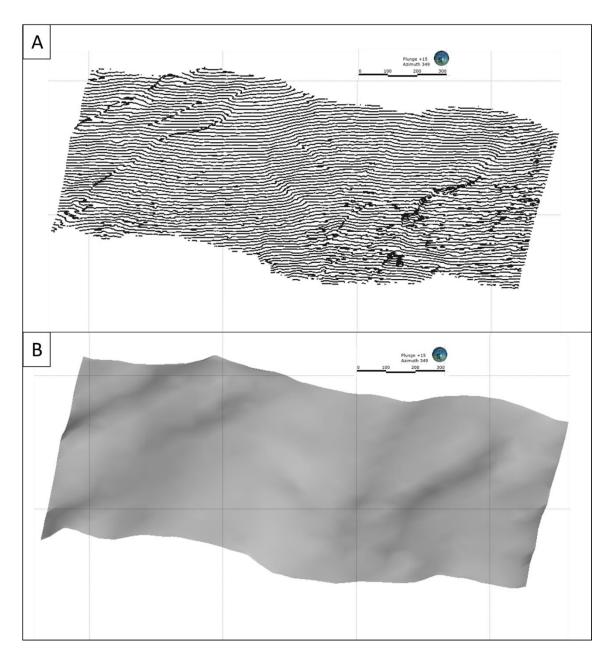


Figura 6.13 - Produtos contextualizados no *software Leapfrog Works*. **A**: curvas de nível geradas; **B**: superfície topográfica gerada.

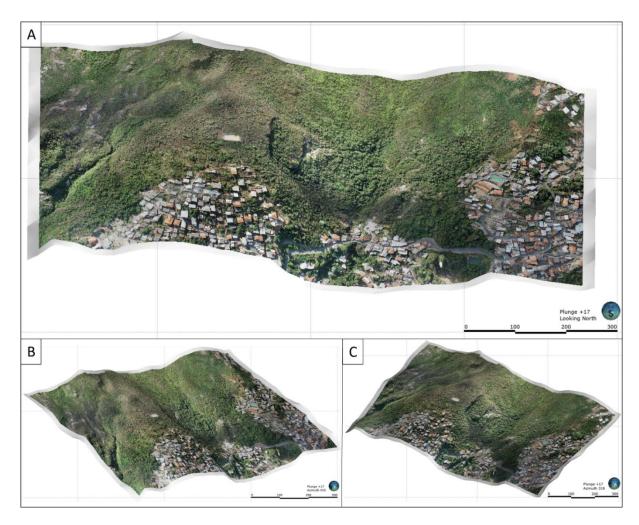


Figura 6.14 - Ortofotomosaico contextualizado de acordo com a superfície topográfica gerada. **A**: visada para Norte; **B**: visada NE-SW; **C**: visada NW-SE.

Após o desenvolvimento de tal representação, foram então inseridos na contextualização os modelos de resistividade das seções invertidas, a partir da inserção dos modelos como imagens e posterior georreferenciamento das mesmas, resultando então em uma representação georreferenciada e integrada de produtos obtidos para o trabalho (Figura 6.15)

Gomes, G. W. 2021, Eletrorresistividade e Aerofotogrametria aplicadas à Arqueologia: Parque Arqueológico do Morro da...

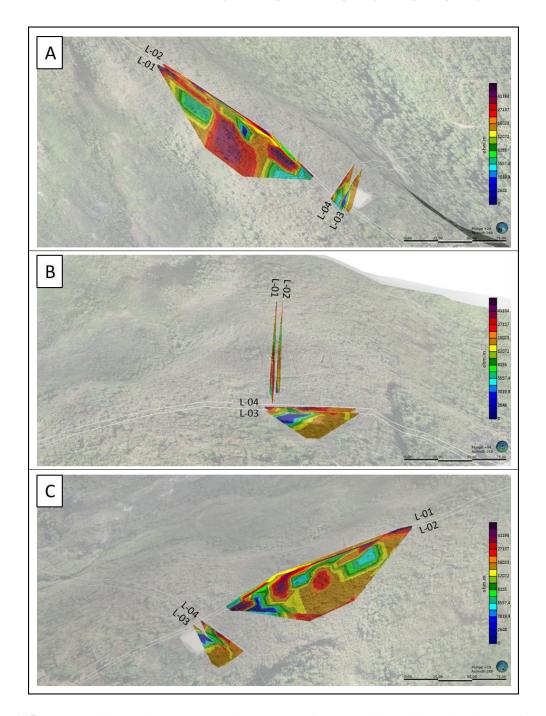


Figura 6.15 - Contextualização de produtos gerados para o trabalho, em ambiente tridimensional georreferenciado. A: visada NE-SW; B: visada para Norte; C: visada NW-SE.

Então, foram traçadas *polylines* representativas das direções de possíveis lineamentos caracterizados a partir da continuidade de feições condutivas ao longo de seções paralelamente dispostas (Figura 6.16), que foram exportadas posteriormente do *Leapfrog Works* e contextualizadas no *Qgis* com

os lineamentos e medidas estruturais do mapeamento de Endo *et al.* (2019a) e com os lineamentos traçados a partir da fotointerpretação dos produtos aerofotogramétricos desenvolvidos (Figura 6.17).

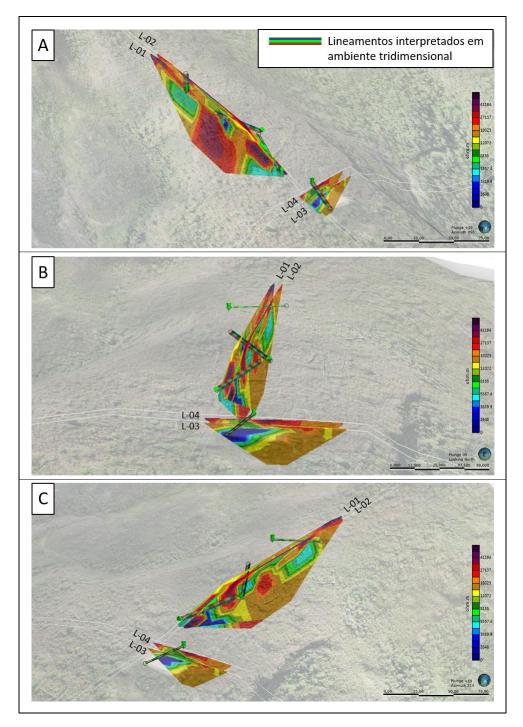


Figura 6.16 - Visualização dos lineamentos vetorizados a partir dos dados geofísicos no *software Leapfrog Works*. A: visada NE-SW; B: visada para Norte; C: visada NW-SE.

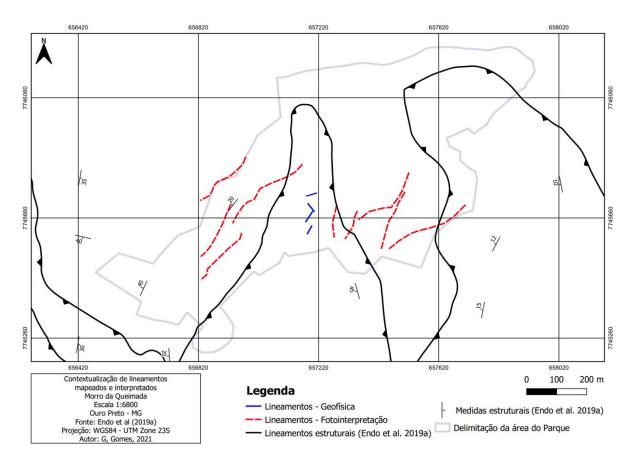


Figura 6.17 - Mapa de contextualização dos lineamentos interpretados com lineamentos e medidas estruturais presentes em Endo *et al.* (2019a).

A Figura 6.17 possibilitou a identificação de certa concordância entre os lineamentos interpretados a partir de diferentes metodologias. A tendência geral NE-SW reconhecida, tendo como limite de análise as porções periféricas dos lineamentos fotointerpretados, certamente têm influência da ocorrência da Zona de Cisalhamento São Bento ao longo da região do Parque. Tal falha de empurrão, em seu desenvolvimento, provavelmente possibilitou a formação de famílias de fraturas adjacentes, primariamente com sua mesma direção e secundariamente em direção ortogonal.

Ademais, foi novamente identificado que, para os objetivos relacionados à Arqueologia pretendidos pelo trabalho, a realização de uma quantidade maior e mais adensada de perfis geofísicos, dispostos ao longo de diferentes áreas com presença de ruínas, possivelmente auxiliaria no desenvolvimento de interpretações mais elaboradas acerca do contexto arqueológico do Parque, visto que, a partir da observação dos produtos no *software Leapfrog Works*, evidenciou-se que os perfis geofísicos foram representativos de porções de dimensões relativamente pequenas com relação ao todo, no que diz respeito à ocorrência de ruínas arqueológicas.

Em adição, o objetivo relacionado a procedimentos operacionais foi alcançado, uma vez que o procedimento de aquisição combinada e ordenada de dados aerofotogramétricos e geofísicos em área com dificuldades operacionais foi realizado, sendo os produtos da Aerofotogrametria determinantes na delimitação de possíveis áreas de aquisição geofísica, e então propiciando os levantamentos de Eletrorresistividade e a geração de produtos de geofísica rasa.

A presença de dados adicionais para integração e contextualização no modelo tridimensional, como *logs* de sondagens, mapeamentos espeleológicos e informações de nível d'água, que agregariam ao balizamento de resultados, não foi possibilitada, o que acabou limitando, de certa forma, as interpretações realizadas no trabalho aos dados gerados e disponíveis.

CONCLUSÕES

As aquisições aerofotogramétricas e geofísicas, realizadas no Parque Natural Municipal Arqueológico do Morro da Queimada, possibilitaram o desenvolvimento de interpretações e discussões acerca das condições superficiais e subsuperficiais da região de estudo.

Os principais produtos gerados a partir do processamento aerofotogramétrico, sendo eles o ortofotomosaico, o modelo digital de superfície e consequentemente as curvas de nível, possibilitaram o entendimento das condições atuais de relevo e topografia na área de investigação. O ortofotomosaico possibilitou a identificação de porções residenciais, vegetações e feições que foram associadas a escavações, e o modelo digital de superfície, em conjunto com as curvas de nível, possibilitaram a observação de conformidades topográficas, facultando interpretações relacionadas aos contextos residencial e histórico da região do Parque.

Os produtos gerados por Aerofotogrametria também foram submetidos a comparações com produtos de aquisições do ano de 2018, realizadas pela Fundação Gorceix. Os produtos foram analisados a partir de recortes com limites idênticos, sendo realizadas considerações acerca de condições topográficas, urbanas e vegetais da área de acordo com a variação temporal evidenciada.

Em complemento, os produtos da Aerofotogrametria foram utilizados para a identificação de regiões favoráveis para o desenvolvimento das aquisições geofísicas, visto que a área do Parque, devido à suas condições topográficas e de acesso, apresenta certo nível de dificuldade operacional. Sendo assim, as aquisições foram planejadas para ocorrer em áreas de topografia mais regularizada e com certa facilidade de locomoção e operação.

Os modelos de resistividade gerados a partir do emprego do método geofísico da Eletrorresistividade, interpretados e organizados em conjunto e em grupos separados, permitiram a constituição de análises acerca de possíveis características geológicas, hidrogeológicas e arqueológicas, balizadas principalmente em informações prévias de mapeamentos geológicos, estudos históricos e arqueológicos.

Os produtos desenvolvidos a partir dos levantamentos aerofotogramétricos e geofísicos, realizados de forma ordenada e combinada, foram então inseridos em *software* de modelagem e contextualização tridimensional. Tal integração de produtos possibilitou a visualização da região de investigação sob diferentes perspectivas de análise, validando o procedimento de aquisição de dados proposto para o presente estudo.

A análise integrada dos produtos gerados possibilitou a vetorização de lineamentos a partir dos dados geofísicos, que foram posteriormente contextualizados no *software Qgis*, em planta, com os lineamentos traçados a partir da fotointerpretação e com dados estruturais da área. Foi identificada uma tendência geral NE-SW a partir dos mesmos, associada ao contexto estrutural da Zona de Cisalhamento São Bento.

Foi constatada, ao final do projeto, baixa representatividade das seções geofísicas com relação ao contexto das ruínas presentes no Parque, e sugerida a realização de novas aquisições ao longo da região, inclusive com o emprego de outras metodologias, que possivelmente auxiliariam no desenvolvimento de interpretações arqueológicas mais refinadas.

Ainda assim, é esperado que a divulgação do presente estudo e dos produtos nele desenvolvidos norteie novos projetos de pesquisa no Parque, nas mais diversas áreas do conhecimento, auxiliando na realização de interpretações arqueológicas e na elevação da condição de patrimônio histórico e cultural do Parque Arqueológico do Morro da Queimada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrifero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7:349-364.

Aspiazú C., Alves L.M., Valente O.F. 1990. Modelos digitais de terrenos conceituação e importância. *Boletim de Pesquisa Florestal*, **21**:27-36.

Baltazar O.F., Baars F.J., Lobato L.M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005. *Mapa Geológico Mariana na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa*. *In*: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. Belo Horizonte, Lobato *et al.* (2005) CODEMIG.

Baltazar O.F. & Zuchetti M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, **32**:471-499.

Borges W.R. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Doctoral Dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, 260 p.

Boxer C.R. 1969. A idade de ouro do Brasil:(dores de crescimento de uma sociedade colonial). Brasiliana.

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. *Thesis*, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 121 p.

Braga A.C.O. 2016. Geofísica Aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia. Oficina de textos, 160 p.

Brito Bueno F.A. 2019. A paisagem de Outro Preto como espacialização do tempo: a experiência e a vivência do Morro da Queimada. PhD Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 560p.

Calógeras J.P. 1905. As minas do Brasil e sua legislação: XII. As origens do direito mineiro. XIII. A propriedade das minas e a constituição federal. XIV. A competencia da união. XV. As limitações a bem da industria extractiva. XVI. Tentativas codificadoras. XVIII. Conclusões e projectos de lei. Annexos. Imprensa nacional.

Câmara G., Souza R.C.M., Freitas U.M., Garrido J. 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & graphics*, **20**(3):395-403.

Campana S. & Piro S. 2008. Seeing The unseen. Geophysics and landscape archaeology. London, CRC Press, 376 p.

Carneiro D. & Costa S.G.C. 2010. Aerofotogrametria em projetos de estradas. *In*: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias de Geoinformação. Recife, p.001-013.

Castro P.T.A., Endo I., Gandini E.A. 2020. O Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. 3i Editora, 480 p.

Cledat E., Jospin L.V., Cucci D.A. Skaloud J. 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped microdrones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **167**:24-38.

Davies L., Bolam R.C., Vagapov Y., Anuchin A. 2018. Review of unmanned aircraft system technologies to enable beyond visual line of sight (BVLOS) operations. *In*: 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk, p. 1-6.

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

Dossin I.A., Dossin T.M., Chaves M.L.S.C. 1990. Compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais – Os grupos Diamantina e Conselheiro Mata. *Revista Brasileira de Geociências*, **20**(1-4):178-186.

Doubeck A. 1989. Topografia. Curitiba, Universidade Federal do Paraná.

Duque T.R.F. 2018. O grupo Itacolomi em sua área tipo: estratigrafia, estrutura e significado tectônico. MS Dissertation, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 102 p.

Dussin I.A. & Dussin T.M. 1995. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. Geonomos, 3(1).

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.

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., Suita 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.

Felgueiras C. 1999. Análises sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas. DPI/INPE.

Ferreira M.R.A. 2011. *A gestão do patrimônio arqueológico pelo estado brasileiro: o caso do sítio arqueológico do Morro da Queimada, Ouro Preto-MG*. MS Dissertation, Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 167 p.

Ferreira T.R. 2017. *Volume útil de pilha de granel com retomada inferior*. MS Dissertation, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 102 p.

FHA. 2008. Project Development and Design Manual. Washington-DC: U.S. Department of Transportation.

Funari P.P. 2003. Arqueologia. São Paulo, Editora Contexto, 126 p.

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

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

Goetzendorf-Grabowski T. & Rodzewicz M. 2017. Design of UAV for photogrammetric mission in Antarctic area. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G. Journal of Aerospace Engineering*, **231**(9): 1660-1675.

Henderson R.J. 1992. Urban geophysics: a review. Exploration Geophysics, 23(4):531-542.

Herman R. 2001. An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*, **69**(9):943-952.

Hill A.C. 2019. Economical drone mapping for archaeology: Comparisons of efficiency and accuracy. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **24**:80-91.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de exploração*. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo, Oficina de Textos, 422 p.

Ladeira E.A. & Roeser H.M. P. 1983. Petrography of the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Zentralblatt Geologie Palaeontologie*, **3/4**:430-450.

Lipski M. 2002. *Tectonismo cenozóico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. MS Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 171 p.

Loke M.H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Lopes J.A. 1989. Ortofoto. Revista Brasileira de Cartografia, 43:32-36.

Lopes T. 2019. *Avaliação do uso de RPA quadrimotor para aplicações de mapeamento*. MS Dissertation, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 128 p.

Machado N., Schrank A., Noce C.M., Gauthier G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, Southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, **141**(1-4):259-276.

Magalhães G.G. de. 2021. Análise eletrorresistiva de materiais lateríticos no Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – MG. Graduation Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 72 p.

Mol L. & Preston P.R. 2010. The writing's in the wall: a review of new preliminary applications of electrical resistivity tomography within archaeology. *Archaeometry*, **52**(6):1079-1095.

Noce C.M., Machado N., Teixeira W. 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Brazilian Journal of Geology*, **28**(1):95-102.

Noel M. & Xu B. 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, **107**(1):95-102.

Oliveira B.T. 2009. The Morro da Queimada Archaeological Park Project, Ouro Preto, MG-Brazil. *In*: Proceedings of the Third International Congress on Construction History. Cottbus.

Palermo R.A. & Leite T.C. 2013. Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com o uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões. Graduation Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 174 p.

Papadopoulos N.G, Sarris A., Yi M.J., Kim J.H. 2009. Urban archaeological investigations using surface 3D ground penetrating radar and electrical resistivity tomography methods. *Exploration Geophysics*, **40**(1):56-58.

Papadopoulos N.G. Yi M.J. Kim J.H. Tsourlos P., Tsokas G.N. 2010. Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, **70**(3):192-205.

Prosdocimi G.A.S. 2019. Avaliação das relações lito-estruturais em cavidades ferríferas, com base em métodos geofísicos—estudo de caso: cavidade ferrífera da província Carajás/PA. MS Dissertation, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 188 p.

Ramanaidou E.R., Nahon D., Decarreau A., Melfi A. 1996. Hematite and goethite from duricrusts developed by lateritic chemical weathering of Precambrian Banded Iron Formations, Minas Gerais, Brazil. *Clays and Clay minerals*, **44**(1):22-31.

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, Brasil. *Geonomos*, **2**(1):1-11.

Reynolds J.M. 2011. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester, John Wiley & Sons, 799 p.

Romano A.W, Rezende L.F.S, Macedo B.O.P. 2017. *Mapa Geológico o Folha Ouro Preto -SF.23-X-A-III Escala 1:100.000*. Belo Horizonte, Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais.

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.

Spier C.A., de Oliveira S.M., Sial A.N., Rios F.J. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **152**(3-4):170-206.

Suñer M.A., Laia O.P, Mattos Y., Bueno F.B.B. 2016. Patrimônio e Arqueologia comunitária no Morro da Queimada: desafios para a gestão compartilhada. *In*: IV Seminário de Preservação do Patrimônio Arqueológico. São Cristóvão, p. 1-10.

Tavares R.B. 2009. Ordenamento territorial e impacto ambiental: riscos geológicos em área de preservação arqueológica mineira com ocupação desordenada. Exemplo de Ouro Preto, Minas Gerais. *In*: Calaes G.D & Oliveira L.C.D. 2009. *A Estrada Real e a transferência da corte portuguesa*. CETEM/MCT/CNPq/CYTED, p. 119-140.

Temba P. 2000. Fundamentos da fotogrametria. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 26 p.

Tomasselli A.M.G. 2009. Introdução. *In*: Tomasselli A.M.G. Fotogrametria Básica. 1. ed. [S.l.: s.n.], cap. 1, v. 1, p. 1-2.

Van Schoor M. 2002. Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, **50**(4):393-399.

Vaz de Melo M.T., Seabra Jr. A.A.G. 2000. Geologia econômica do jazimento de minério de ferro da Mina de São Vicente, Itabiritomina de Capanema, MG. Belo Horizonte, MTV, 69 p. (Relatório Interno).

Veiga L.A., Zanetti M.A.Z., Faggion P.L. 2012. *Fundamentos de topografia*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 288 p.

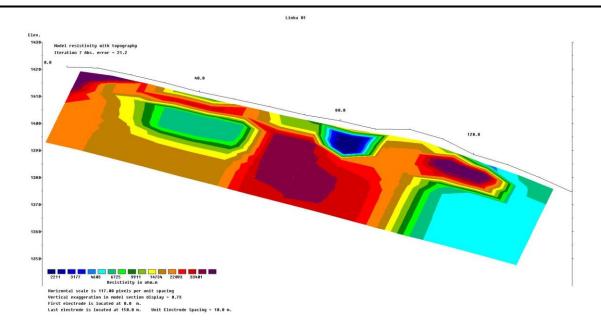
Villaça J.N. 1981. Alguns aspectos sedimentares da Formação Moeda. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia de Minas Gerais*, **2**:93-137.

Ward S.N. 1990. Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysicists, p. 191-218.

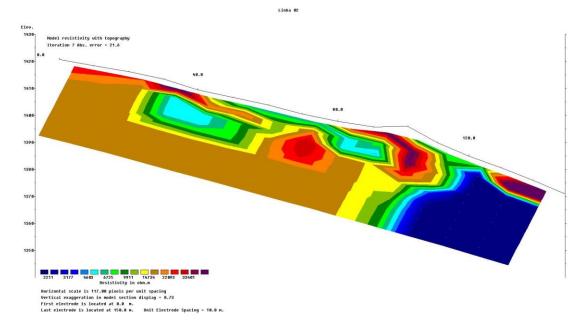
Witten A.J. 2017. Handbook of geophysics and archaeology. London, Routledge. 320 p.

Zhang H., Aldana-Jague E., Clapuyt F., Wilken F., Vanacker V., Van Oost K. 2019. Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. *Earth surface dynamics*, **7**(3):807-827.

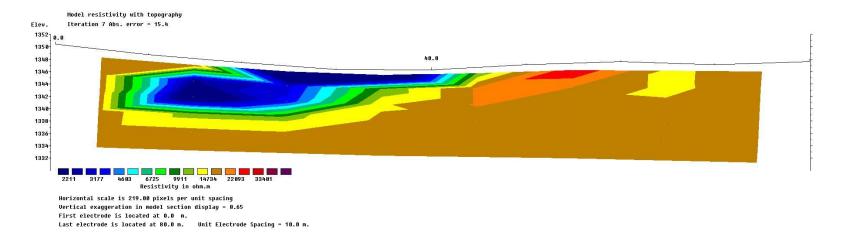
Apêndice(s)



Seção após inversão L-01, obtida no software RES2DINV.

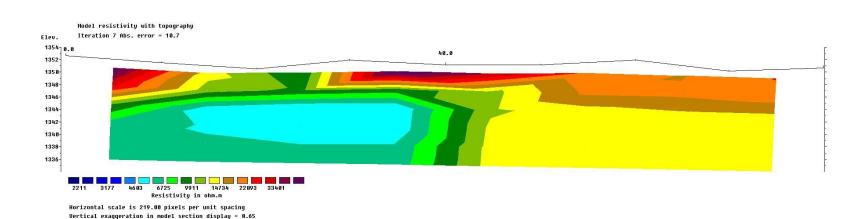


Seção após inversão L-02, obtida no software RES2DINV.



Seção após inversão L-03, obtida no software RES2DINV.

Linha 04



First electrode is located at 0.0 m.

Last electrode is located at 80.0 m. Unit Electrode Spacing = 10.0 m.

Seção após inversão L-04, obtida no software RES2DINV.