

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

YASMIN ALVES FACCHINETTI LEONE

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA,
ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA – APLICAÇÃO NO
ESTUDO DE ÁREAS COM MINERALIZAÇÃO AURÍFERA NA MINA CERRO
RICO, LAVRAS DO SUL, RS.**

Caçapava do Sul

2016

YASMIN ALVES FACCHINETTI LEONE

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA,
ELETRORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA – APLICAÇÃO NO
ESTUDO DE ÁREAS COM MINERALIZAÇÃO AURÍFERA NA MINA CERRO
RICO, LAVRAS DO SUL, RS.**

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Jesus Tomas
Rosales

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

Caçapava do Sul

2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

L583i Leone, Yasmin Alves Facchinetti
INTEGRAÇÃO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA,
ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA -
APLICAÇÃO NO ESTUDO DE ÁREAS COM MINERALIZAÇÃO
AURÍFERA NA MINA CERRO RICO, LAVRAS DO SUL, RS. /
Yasmin Alves Facchinetti Leone.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2016.
"Orientação: Mário Jesus Tomas Rosales".

1. Lavras do Sul. 2. Aerogamaespectrometria. 3.
Eletorresistividade. 4. Polarização Induzida. 5.
Alterações hidrotermais. I. Título.

YASMIN ALVES FACCHINETTI LEONE

**INTEGRAÇÃO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA,
ELETORRESISTIVIDADE E POLARIZAÇÃO INDUZIDA – APLICAÇÃO NO
ESTUDO DE ÁREAS COM MINERALIZAÇÃO AURÍFERA NA MINA CERRO
RICO, LAVRAS DO SUL, RS.**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02/12/2016

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mário Jesus Tomas Rosales

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Éverton Frigo

UNIPAMPA

Prof^a. Dra. Cristiane Heredia Gomes

UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais Tadeu e Eloina (*in memoriam*), com todo meu amor e gratidão por tudo que fizeram por mim até hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Tadeu e Eloina (*in memoriam*), por terem acreditado na minha capacidade e determinação em estudar tão longe de casa e por terem me auxiliado de todas as maneiras possíveis para que eu concluísse o curso. Aos meus irmãos, Tadeu e Rafael por todos puxões de orelha e por serem meus maiores exemplos de sucesso.

Ao meu amigo, companheiro e colega Guilherme, pelo seu apoio incondicional nos momentos mais difíceis da minha graduação. Aos meus colegas de curso, em especial Larissa, Eduardo, Victor e Carol, pelo auxílio nas saídas de campo.

Ao meu orientador Prof. Mário Rosales, pela orientação para que eu realizasse este trabalho de conclusão e também ao meu coorientador, Prof. Tiago Gregory.

A Amarillo Gold Corporation por ter cedido gentilmente os dados aerogamaespectrométricos, tornando possível a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Pampa, seus professores, técnicos e funcionários, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

RESUMO

A Mina Cerro Rico localiza-se geologicamente a leste do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, a mesma já foi explorada e estudada por diversas empresas. Atualmente, sua licença de exploração pertence à empresa Amarillo Gold Corporation. Na área é destacável a presença de zonas com alterações hidrotermais causadas pela intrusão de corpos ígneos conforme estudos anteriores. A pesquisa visa um estudo geofísico, em escala de detalhe, de prováveis setores anômalos que possam estar associados a mineralizações auríferas e metais base, além da identificação de falhas e fraturas que possam estar servindo de conduto para circulação de água com associação de mineralizações. Inicialmente foi identificado os setores anômalos a partir do processamento de dados aerogamaespectrométricos e em seguida realizou-se levantamentos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida nestes setores. Os contornos anômalos de Fator F mostraram uma ordem de grandeza de 1,04 e são associados a zonas de alteração hidrotermal. Os modelos estimados para as curvas de resistividade elétrica exibiram uma ordem de grandeza entre 49 e 28.859 ohm m e os modelos estimados para as curva de cargabilidade mostraram uma ordem de grandeza variando entre 0,01 e 14 mV/V, onde os baixos resistivos que coincidem com valores anômalos de cargabilidade nas SEV 04, 05 e 06, indicam possivelmente a presença de mineralizações de pirita associadas a ouro. A partir da integração dos dados aerogamaespectrométricos, geoeletricos de eletrorresistividade e os furos de sondagem da Amarillo Gold Corporation foi possível verificar indícios de possíveis mineralizações nas SEV 03 e 06, além da identificação de uma provável zona fraturada com soerguimento do embasamento entre as SEV 03 e SEV 04. A finalidade da pesquisa, além de caracterizar zonas com alterações hidrotermais, é demonstrar o potencial da aplicação conjunta dos métodos de aerogamaespectrometria, Eletrorresistividade e Polarização Induzida com o objetivo de contribuir para o estudo da caracterização geológica - geofísica do Complexo Intrusivo Lavras do Sul.

Palavras chave: Lavras do Sul, aerogamaespectrometria, eletrorresistividade, polarização induzida, alterações hidrotermais.

ABSTRACT

The Cerro Rico Mine is geologically located at east from the *Complexo Intrusivo Lavras do Sul* and it was already studied and explored by several different companies. Currently, its exploration license belongs to the Amarillo Gold Corporation. The main remark for the area is the presence of zones with hydrothermal changes, caused by the intrusion of igneous bodies, according to previous studies. This research intends to perform a geophysical study, in detailed scale, of most likely anomalous sectors that may be associated to the gold and base metal producing mineralization, in addition to the identification of faults and fractures that may be serving as a conduct to the circulation of water with minerals association. Initially, the anomalous sectors were identified through airborne gamma-ray spectrometric data processing followed by Eleetroresistivity and Induced Polarization studies through the sectors. The F factor anomalous contours shown a magnitude order of 1.04 and they are associated to hydrothermal change zones. The estimated models for the electrical resistivity curves showed an order of magnitude between 49 and 28,859 ohm m and the models estimated for the loadability curve showed an order of magnitude ranging from 0.01 to 14 mV / V, where the matching resistive lows With anomalous values of chargeability in SEV 04, 05 and 06, possibly indicates the presence of pyrite mineralizations associated with gold. Based on the integration of the aerogamaespectrometric, eleetroresistivity data and probing holes of the Amarillo Gold Corporation it was possible to verify evidence of possible mineralization in SEV 03 and 06, in addition to the identification of a probable fractured zone with uplift of the basement between SEV 03 and SEV 04. The goal of the research, beyond the characterization of hydrothermal change zones, is to demonstrate the potential from the conjunct application of the airborne gamma-ray spectrometric data processing, eleetroresistivity and Induced Polarization methods in order to contribute for the geologic – geophysical characterization of the Cerro Rico Mine.

Keywords: Lavras do Sul, gamma-ray spectrometry, eleetroresistivity, induced polarization, hydrothermal changes

LISTA DE SIGLAS

ΔV – Diferença de potencial

∞ – Infinito

% – Porcentagem

ρ_a – Resistividade elétrica aparente

Au – Ouro

AB – Eletrodos de corrente

Backgorund – Valores de fundo

CE – Caminhamento Elétrico

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

CT – Contagem Total

ESrg – Escudo Sul rio-grandense

eTh – Equivalente de Tório

eU – Equivalente de Urânio

Ga – Giga anos

IP – Polarização Induzida

K – Potássio

km – Quilômetros

m – Metros

Ma – Milhões de anos

MDT – Modelo Digital de Elevação

mV – Milivolts

MN – Eletrodos de potencial

ms – Milissegundos

NE – Nordeste

NW – Noroeste

ppm – Partes por milhão

Si – Sílica

SE – Sudeste

SW – Sudoeste

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

Th – Tório

U – Urânio

V – Volts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acesso e localização da área de estudo.....	17
Figura 2 – Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul-riograndense.....	18
Figura 3 – Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul.....	21
Figura 4 – Mapa da geologia local da área de estudo.....	22
Figura 5 – Modelo Digital de Elevação de Terreno.	23
Figura 6 – Esquema da distribuição espacial das alterações hidrotermais em torno de uma intrusão porfirítica.	25
Figura 7 – Janelas padrão dos radioelementos.	28
Figura 8 – Representação gráfica do teor de Si e concentração dos radioelementos nas rochas.	29
Figura 9 – Valores de resistividade em rochas e solos.	34
Figura 10 – Ilustração de como ocorre a polarização de eletrodo.	35
Figura 11 – Ilustração de como ocorre a polarização de membrana.	36
Figura 12 – O fenômeno de Polarização Induzida no domínio do tempo.	37
Figura 13 – Arranjo Dipolo – Dipolo.	38
Figura 14 – Arranjo Polo – Dipolo.....	39
Figura 15 – Arranjo Schlumberger.....	40
Figura 16 – Arranjo Wenner.....	40
Figura 17 - Curvas de cargabilidade e resistividade aparente da região do CILS.....	43
Figura 18 – Geologia local com linhas de vôo do aerolevanteamento (2007).....	45
Figura 19 – Fluxograma de processamento dos dados aerogamaespectrométricos.	46
Figura 20 – Mapa de contagem individual de K (%).	47
Figura 21 – Mapa de contagem individual eTh (ppm).	47
Figura 22 – Mapa de contagem individual eU.	48
Figura 23 – Mapa de Contagem Total.	48
Figura 24 – Mapa de razão eU/eTh (a), mapa de razão eU/K (b), mapa de razão eTh/K (c)...	50
Figura 25 – Mapa de Fator F (a) e Ternário (b).....	52
Figura 26 – Setores anômalos de Fator F.	53
Figura 27 – Contornos anômalos aerogamaespectrométricos e levantamentos de eletrorresistividade.....	54
Figura 28 – Localização das SEV's no perfil topográfico.	55

Figura 29 – Fluxograma de processamento dos dados geoeletricos.....	55
Figura 30 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 01	56
Figura 31 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 01.	57
Figura 32 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 02.	58
Figura 33 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 02.	59
Figura 34 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 03.	60
Figura 35 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 03.	60
Figura 36 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 04.	61
Figura 37 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 04.	62
Figura 38 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 05.	63
Figura 39 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 05.	63
Figura 40 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 06.	64
Figura 41 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 06.	65
Figura 42 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 07.	66
Figura 43 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 07.	67
Figura 44 – Descrição litológica do furo 1 realizado pela Amarillo Gold Corporation localizado no mapa da Figura 27.	68
Figura 45 - Descrição litológica do furo 1 realizado pela Amarillo Gold Corporation localizado no mapa da Figura 27.	69
Figura 46 - Integração de dados aerogamaespectrométricos e geoeletricos.....	71
Figura 47 – Integração de dados geoeletricos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida.	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Geral.....	16
1.1.2 Específicos.....	16
1.2 Justificativa.....	16
2 ÁREA DE ESTUDO.....	17
2.1 Localização.....	17
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	18
3.1 Geologia regional.....	18
3.2 Geologia local.....	19
3.2.1 Modelo digital de elevação do terreno.....	23
3.3 Alterações hidrotermais.....	23
3.3.1 Tipos de depósitos relacionados a alterações hidrotermais.....	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 Método Gamaespectrométrico.....	27
4.1.1 Radioatividade.....	27
4.1.2 Elementos radioativos.....	28
4.1.3 Interação da radiação gama com a matéria.....	29
4.1.4 Correções para dados aerogamaespectrométricos.....	30
4.1.5 Produtos do processamento de dados aerogamaespectrométricos.....	31
4.2 Método Geométrico.....	32
4.2.1 Método da Eletroresistividade.....	33
4.2.2 Método da Polarização Induzida.....	35
4.2.3 Técnicas de investigação.....	37
5 TRABALHOS ANTERIORES NA ÁREA DE ESTUDO.....	41
5.1 Trabalhos geológicos.....	41

5.2 Trabalhos geofísicos	41
5.2.1 Levantamento geométrico na área de estudo	41
5.2.1 Levantamento aerogeofísico na área de pesquisa	44
7 RESULTADOS	46
7.1 Resultados, processamento e interpretação dos dados aerogamaespectrométricos	46
7.2 Resultados, processamento e interpretação dos dados geométricos	53
7.2.1 SEV 01	56
7.2.2 SEV 02	57
7.2.3 SEV 03	59
7.2.4 SEV 04	61
7.2.5 SEV 05	62
7.2.6 SEV 06	64
7.2.7 SEV 07	65
7.3 Integração dos dados aerogamaespectrométricos e geométricos	67
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

No município de Lavras do Sul existem inúmeras ocorrências e depósitos metálicos de ouro-cobre, pirita, ferro e cromo, a maioria parcialmente minerada no passado, onde as mineralizações auríferas estavam principalmente associadas a rochas graníticas e vulcânicas (ROJAS, 2007). A Mina Cerro Rico foi descoberta pela Empresa *Brazilian Gold Field Ltda*, atuando até meados de 1915. Logo após foi pesquisada pela Companhia Estrada de Ferro e Minas São Gerônimo. A partir de 1938, passou a ser explorada pela Companhia de José Hipólito de Souza até 1952, em seguida passou a ser propriedade da Empresa Minesul (REICHEL, 1998, apud ROJAS, 2007) e atualmente a licença de exploração da Mina Cerro Rico pertence à Amarillo Gold Corporation.

A área de pesquisa possui 15,758 km² e é delimitada pelas longitudes 53°47'42,7" W e, 53°50'56,4" W e pelas latitudes 30°48'5,7" S e, 30°49'46" S. Localiza-se a 7 km ao leste da cidade de Lavras do Sul, que é uma cidade a 300 km de distância de Porto Alegre e 63 km de Caçapava do Sul, o que viabiliza o acesso à área de estudo. O Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) é um corpo com dimensões de 12 x 18 km, alongado com direção N-S (RIBEIRO, 1983) e intrusivo em rochas do arco São Gabriel (900-700 Ma) e unidades basais da Bacia do Camaquã (Formação Hilário e Maricá, 540 Ma) (GASTAL 1998). Na região de Lavras do Sul os bens minerais são constituídos pelas mineralizações auríferas do Complexo Granítico de Lavras do Sul e mineralizações cupro-auríferas das vulcânicas do Membro Hilário (KAUL; RHEINHEIMER, 1974).

A presente pesquisa visa a integração de dados aerogamaespectrométricos e dados geoeletricos com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), utilizando os parâmetros dos métodos de Eletroresistividade e Polarização Induzida (IP), para a identificação e a caracterização de áreas com alteração hidrotermal associadas a zonas de falhamentos e/ou de fraturas, que possam estar servindo de condutos para a circulação de água e suas prováveis associações com a presença de mineralização.

Os dados aerogamaespectrométricos foram levantados pela Empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda e fornecidos pela Empresa *Amarillo Gold Corporation*. Após processamento e interpretação dos dados aéreos, foram realizados levantamentos geoeletricos em setores que apresentaram assinaturas anômalas nos mapas gerados como produtos gráficos geofísicos para cada radioelemento. A partir da integração destes dados,

torna-se possível melhorar a resolução espacial das informações geológicas, visando as ocorrências minerais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

A pesquisa possui como objetivo geral a atualização do mapeamento geofísico e geológico da área de estudo em uma escala aproximada de 1: 2000, a partir do método aerogamaespectrométrico e dos dados geoeletricos levantados em campo, visando a identificação e caracterização de zonas com alterações hidrotermais possivelmente associadas a mineralizações de Ouro (Au) e metais base.

1.1.2 Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Identificar assinaturas anômalas geofísicas a partir da interpretação dos resultados dos dados aerogamaespectrométricos, que possam estar associadas à presença de zonas de alteração hidrotermal;
- Elaborar um modelo geofísico-geológico para a área a partir da integração e interpretação dos dados geofísicos oriundos dos levantamentos aerogamaespectrométrico e dos dados de Eletrorresistividade e de Polarização Induzida (IP), subsidiados com a interpretação dos parâmetros estimados a partir dos modelos obtidos para os dados de Sondagem Elétrica Vertical (SEV);
- Identificar a presença de fraturas e caracterizar geofisicamente aquelas que possam estar servindo de condutos para a circulação de água e suas prováveis associações com a presença de mineralizações.

1.2 Justificativa

A Mina Cerro Rico foi escolhida para o trabalho pelo fato desta área contar com vastas informações oriundas de trabalhos geofísicos anteriores realizados no local, sendo um deles o da Empresa *Amarillo Gold Corporation*, que cedeu gentilmente os dados aéreos sobre a área

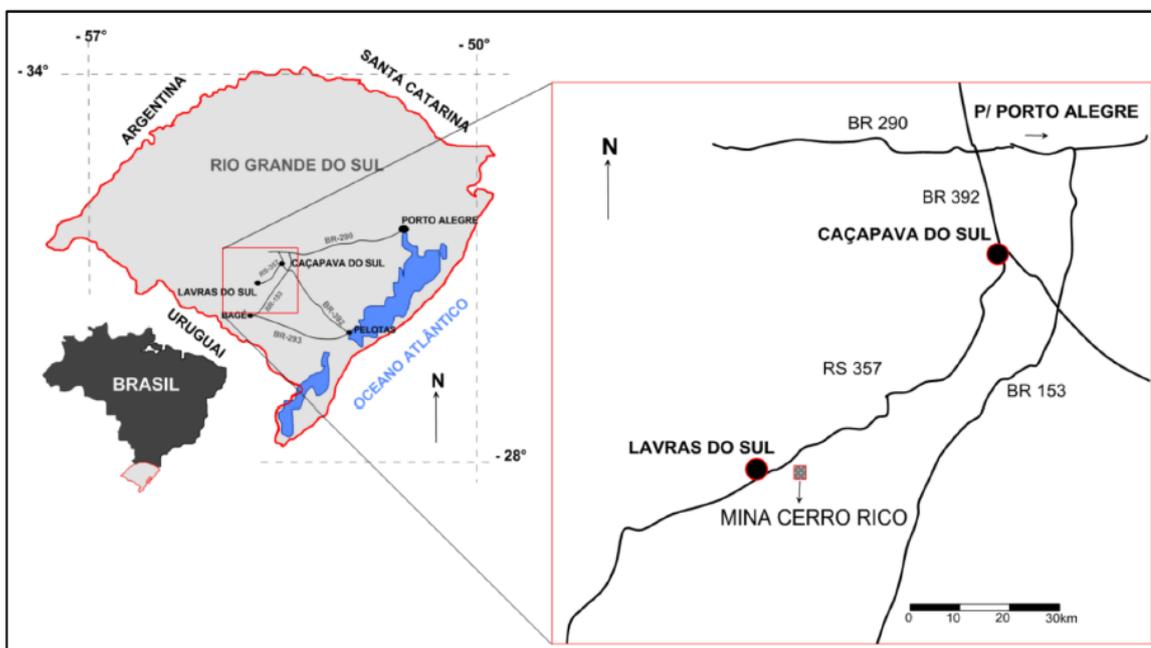
de estudo e o trabalho realizado por Rigoti e Blanco (1985) utilizando métodos geolétricos. Sendo assim, é oferecido um marco favorável para aplicação de métodos de eletrorresistividade e de gamaespectrometria.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área de pesquisa localiza-se a 7 km ao leste da cidade de Lavras do Sul, que é uma cidade que está a 300 km de distância de Porto Alegre (Figura 1). Saindo da capital, o acesso rodoviário tem cerca de 250 km pela rodovia BR-290, sentido W, até o entroncamento com a BR-392, seguindo no sentido sul até o município de Caçapava do Sul, por cerca de 20 km. Percorre-se 57 km pela RS-357, sentido SW, até os limites do município de Lavras do Sul.

Figura 1 – Acesso e localização da área de estudo.



Fonte: Araujo (2016).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

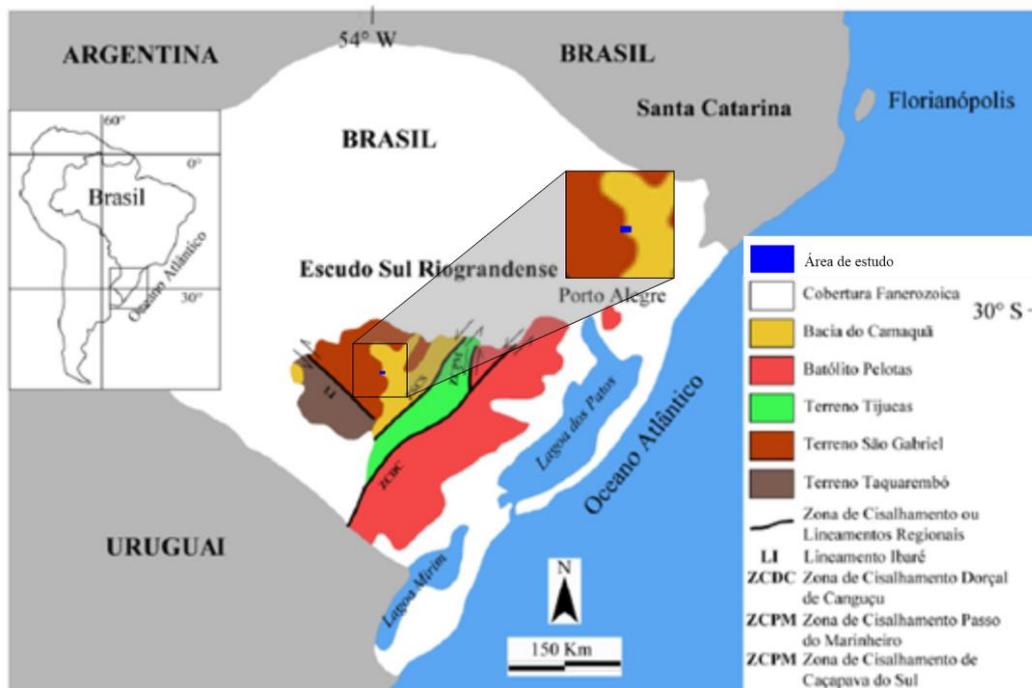
3.1 Geologia regional

A geologia do Rio Grande do Sul registra uma história prolongada de colisões entre continentes, acreção de arcos de ilha, subducção de assoalhos oceânicos, construção de arcos magmáticos e instalação de bacias vulcanossedimentares, registrado atualmente nas rochas que compõem a superfície do estado (CHEMALE, 2000; HARTMANN et al., 2007).

Segundo Hartmann (1998), o Escudo Sul-rio-grandense (ESrg) é o resultado de processos de geração e deformação de crosta continental, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos: o Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e o Brasileiro (900-535 Ma).

O ESrg é composto predominantemente por três grandes unidades de idade neoproterozoica (Figura 2), sendo elas o Batólito Pelotas (BP), o Terreno Tijucas (TT) e o Terreno São Gabriel (TSG), que juntos formam o Cinturão Dom Feliciano. Associados a estes terrenos ocorreram as unidades paleoproterozoicas aflorantes no Terreno Taquarembó (TTa) (HARTMANN et al., 2007).

Figura 2 – Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo Sul-rio-grandense.



Fonte: modificado de Phillip (2010).

O Batólito Pelotas consiste em um complexo granítico dividido em seis suítes intrusivas, descritas por Philipp e Machado (2005), relacionadas à atuação de zonas de cisalhamento, sendo elas: Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e Dom Feliciano.

O Terreno Tijucas tem forma alongada com orientação NE-SW e ocorre a leste do Terreno São Gabriel (HARTMANN et al., 2007). De uma forma abrangente, esta unidade é composta por unidades gnáissicas, graníticas e anfibolíticas de idade paleoproterozoica (2,3 – 2,0 Ga), retrabalhadas ou não por um evento orogênico de 800-770 Ma, e por unidades vulcanossedimentares geradas entre 800-770 Ma a partir de material de idade predominantemente paleoproterozoica (CHEMALE, 2000).

O Terreno São Gabriel, de uma forma geral, é representado por rochas granítico-gnáissicas e vulcanossedimentares com uma assinatura isotópica juvenil de idade neoproterozoica, tendo os principais processos magmáticos e deformacionais ocorrido entre 850-700 Ma (CHEMALE, 2000). Possui gnaisses cálcico-alcálicos juvenis cortados por metagranitoides, ambos englobados no Complexo Cambaí, intrusivos em uma sequência vulcanossedimentar (Complexo Palma/Bossoroca) (HARTMANN et al., 2007).

O Terreno Taquarembó está localizado na porção sudoeste do ESrg e é limitado ao norte pelo lineamento de Ibaré, a leste pela anomalia magnética de Caçapava do Sul e, a oeste e sul, é recoberto pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná (HARTMANN et al., 2000 apud BICCA, 2013).

A Bacia do Camaquã localiza-se na porção central do ESrg e consiste em uma bacia alongada segundo direção preferencial NE-SW (PAIM et al., 2000). Esta bacia é comumente relacionada aos estágios finais do Ciclo Brasileiro/PanAfricano (PAIM et al., 2000). Segundo Paim (2000), a bacia foi depositada em uma depressão tectônica no qual estão preservados os registros de uma série de bacias que se sucederam no tempo, cada uma apresentando características geológicas e tectônicas próprias.

3.2 Geologia local

O Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) é um corpo com dimensões de 12 x 18 km, alongado segundo direção N-S (RIBEIRO, 1983). O CILS é um corpo intrusivo em rochas do arco São Gabriel (900-700 Ma) e unidades basais da Bacia do Camaquã (Formação Hilário e Maricá, 540 Ma) (GASTAL, 1998).

A Formação Hilário inclui lavas traquiandesíticas intercaladas a rochas particuladas diversas (LIMA, 1995), em estratos NNW-SSE, com mergulho suave para nordeste (GASTAL

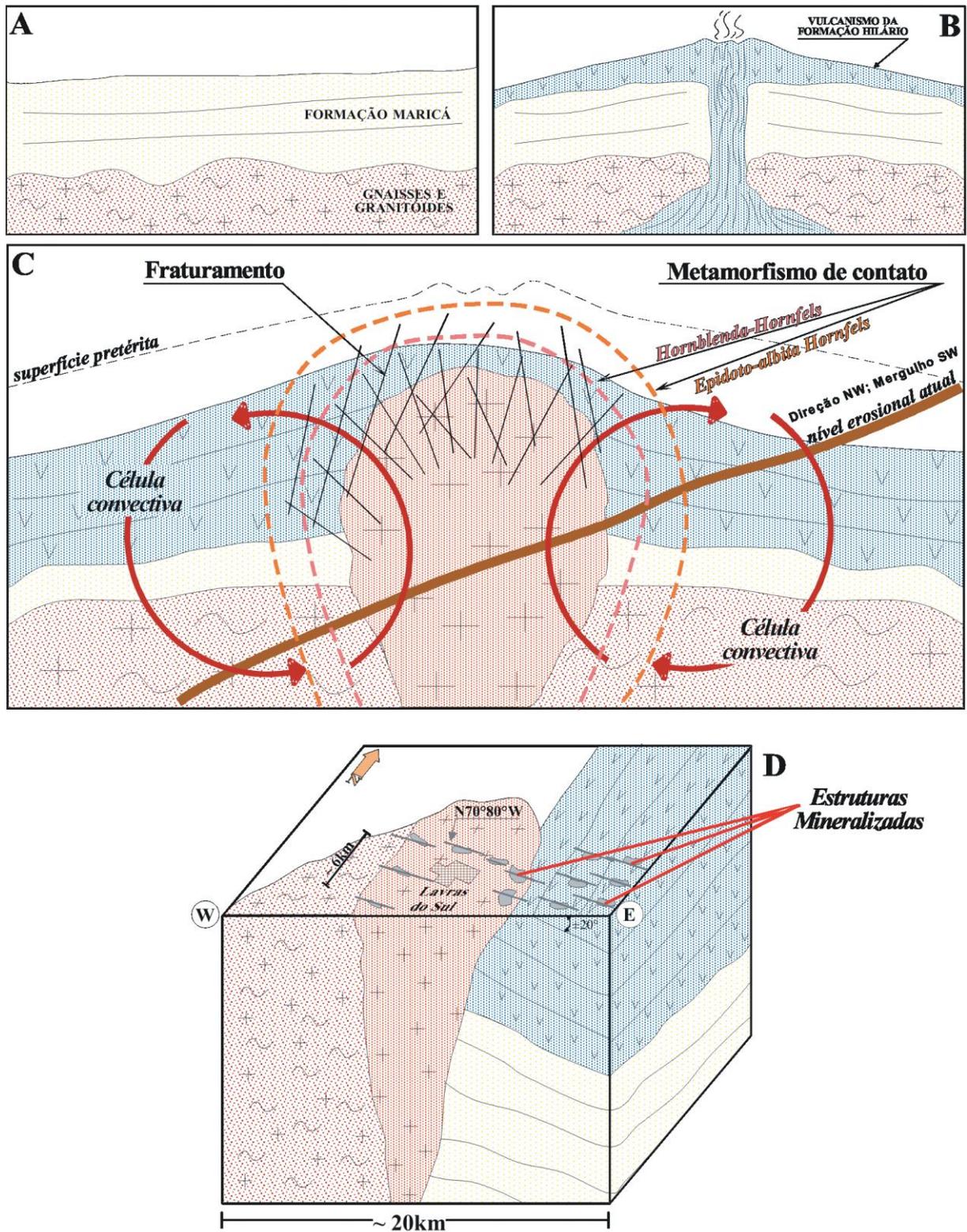
et al., 2015). Camadas de direção NW-SE e alto ângulo para sudoeste ocorrem a nordeste e sudeste do monzonito Tapera. Esta sequência é intrudida por *stocks* de quartzo monzonito porfirítico e pelo granito peralcalino Estrela (GASTAL et al., 2015).

A Formação Maricá tem o limite inferior definido pela idade U-Pb em zircão de 630 Ma (BORBA et al., 2008). Consiste de arenitos arcoseanos a conglomeráticos com nível intermediário de pelitos, que afloram a sul e a norte do complexo intrusivo (GASTAL et al., 2015). Os estratos, com direção NNW-SSE a NNE-SSW e mergulho suave para leste, estão basculados e rotados próximo a falhas NW-SE e NE-SW (GASTAL et al., 2015). No sul, os arenitos basais estão a oeste e os pelitos a leste (UFRGS, 2004), onde os estratos mostram maior movimentação tectônica (GASTAL et al., 2015).

A partir da compilação de trabalhos e suas teorias desenvolvidas baseadas em dados de campo, geoquímicos e isotópicos, Mexias et al. (2007) estudaram a proposta de uma evolução geológica da região de Lavras do Sul. Seguindo as etapas da evolução esquemática da Figura 3, tem-se: 1) Deposição dos sedimentos da Formação Maricá sobre um embasamento constituído de gnaisses e metagranitoides, gerando depósitos aluviais, deltaicos e marinho rasos entre 620 e 592 Ma. Segundo Chemale (2000), a deposição destes sedimentos pode representar uma sedimentação de retroarco da Orogênese Brasileira. 2) Ocorrência de uma instabilidade no Neoproterozoico, associada a um processo de magmatismo, inicialmente vulcânico, com produtos piroclásticos e epiclásticos, porém de filiação geoquímica shoshonítica a partir de magmas parentais basálticos (LIMA; NARDI, 1998). 3) O extravasamento das lavas andesíticas foi seguido pela intrusão de um complexo de corpos ígneos (GASTAL; LAFON, 1998) com dimensões e composições diversas (sienogranitos, monzogranitos, monzodioritos, granodioritos, monzonitos e quartzo dioritos), de caráter plutônico e também hipoabissal, que geraram importante influência térmica sobre as rochas vulcanoclásticas, com o metamorfismo de contato atingindo até a fácies hornblenda-hornfels (RIBEIRO, 1983; MEXIAS, 1990).

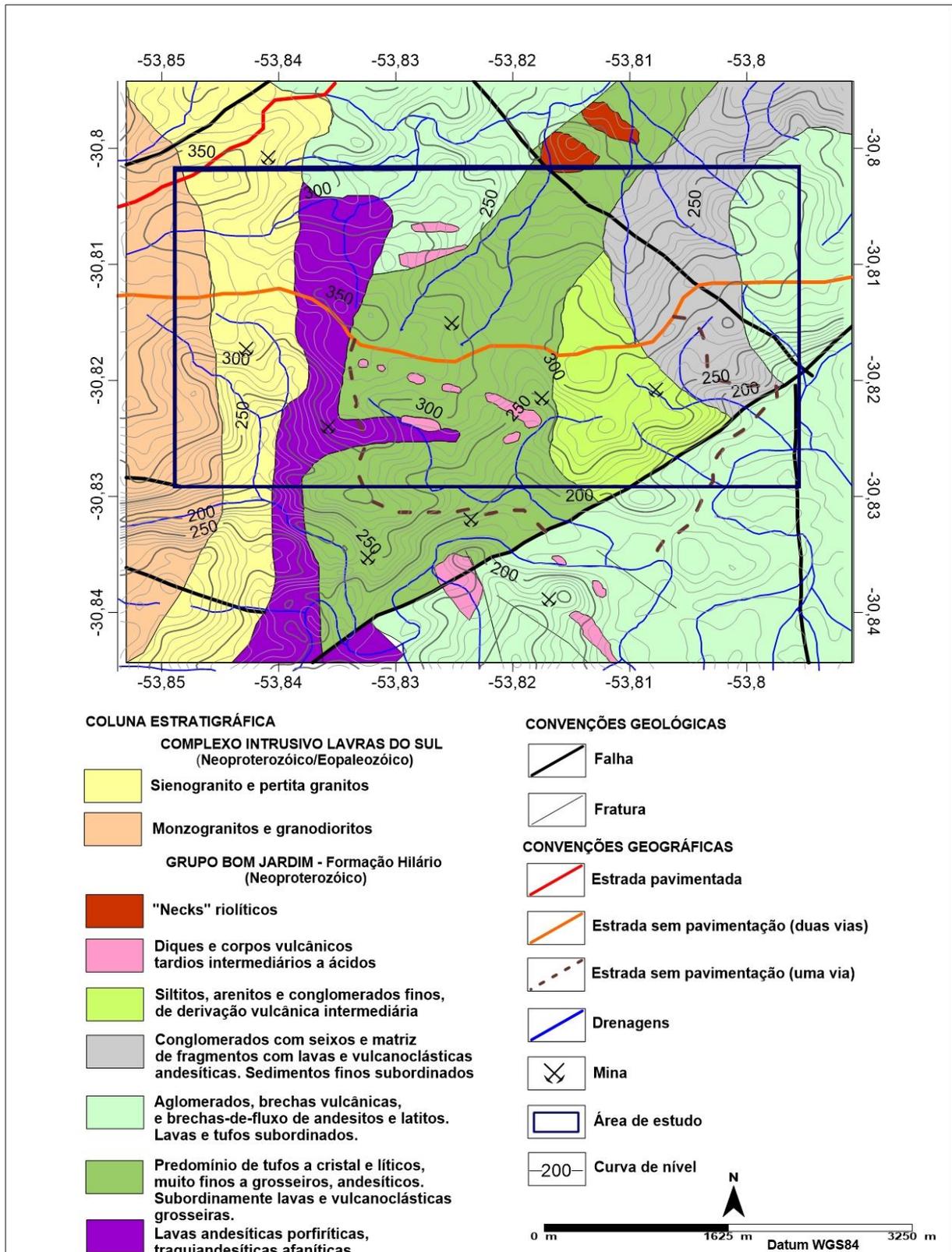
A área estudada (Figura 4) está localizada no Complexo Intrusivo Lavras do Sul e possui as seguintes litologias: sienogranito, pertita granito, monzogranitos e granodioritos (MINERAR, 1998).

Figura 3 – Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul.



Fonte: Mexias et al. (2007).

Figura 4 – Mapa da geologia local da área de estudo.

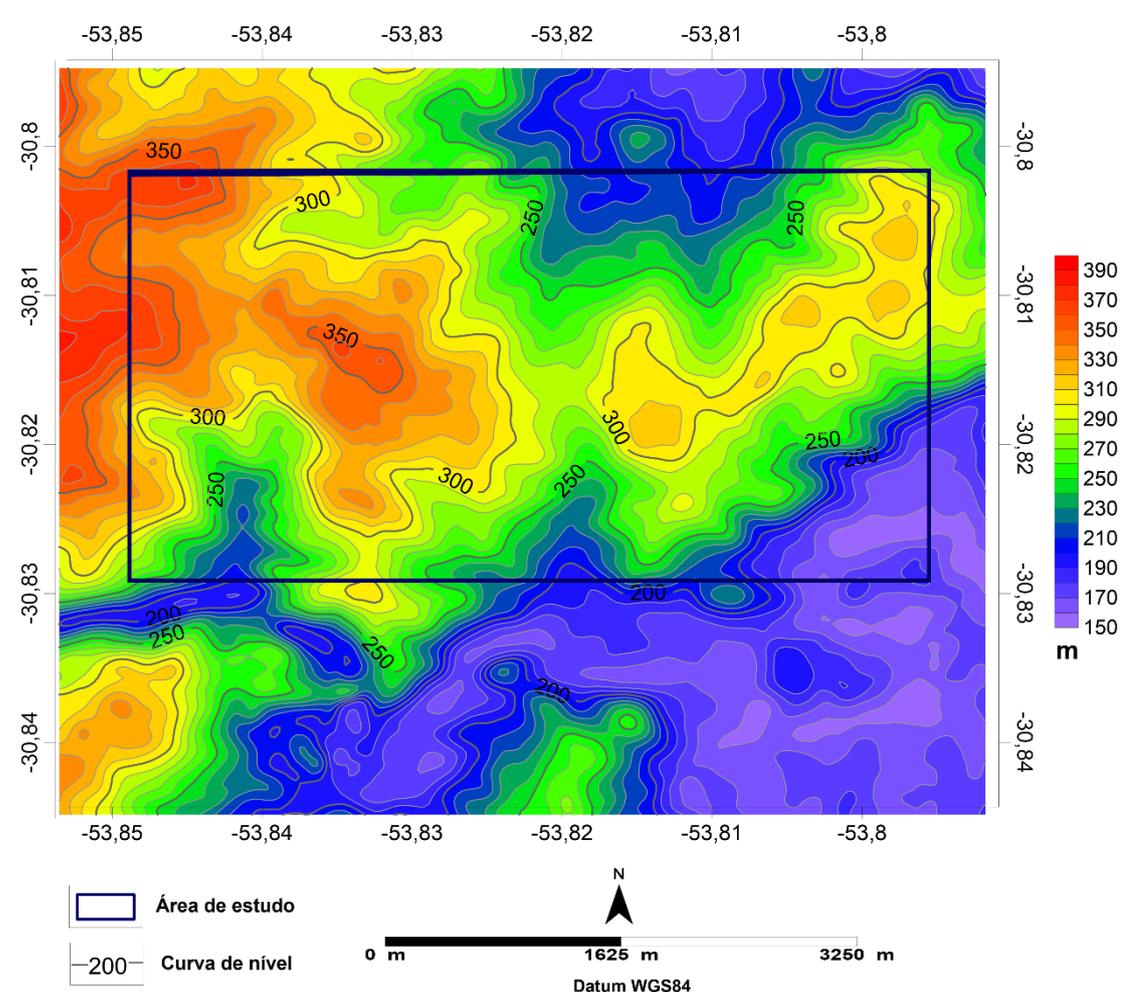


Fonte: modificado de Minerar (1998).

3.2.1 Modelo digital de elevação do terreno

A Figura 5 apresenta o modelo digital de elevação do terreno (MDT) baseado nos dados topográficos da Minerar (1998). Observa-se que as maiores elevações topográficas estão localizadas a NW na área de estudo, com cotas variando de 300 a 350 metros. Na porção SE da área nota-se uma topografia mais baixa, variando de 150 a 200 metros.

Figura 5 – Modelo Digital de Elevação de Terreno.



Fonte: modificado de Minerar (1998).

3.3 Alterações hidrotermais

Segundo Lobato (2001), as alterações hidrotermais são processos complexos que mudam texturalmente e mineralogicamente a rocha e quimicamente rocha e fluido percolante. É um processo metamórfico, entretanto, diferencia-se porque não ocorre somente em resposta

a pressão e temperatura, mas sim em função do aumento da pressão dos fluidos e da natureza dos mesmos.

De acordo com Henrichs (2013), as alterações hidrotermais podem ser pervasivas, seletivas e não pervasivas. A primeira ocorre com a substituição da maioria dos minerais da rocha original, na segunda são substituídos minerais específicos como biotita e plagioclásios (substituídos por cloritas e sericita, respectivamente) e na última são alteradas apenas porções onde há veios e fraturas mineralizadas, mantendo a rocha encaixante sem a influência deste evento mineralizador (HENRICHS, 2013 apud ARAUJO, 2016).

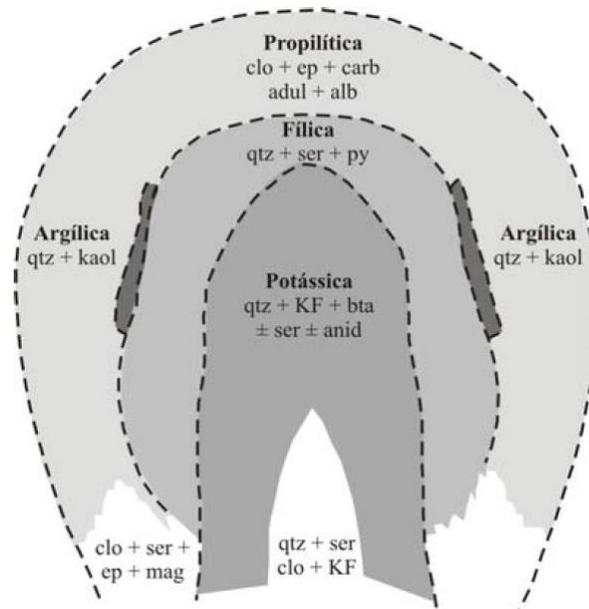
3.3.1 Tipos de depósitos relacionados a alterações hidrotermais

Serão descritos depósitos classificados por Bongioio (2006) como de Sistemas Fósseis, sendo eles o depósito tipo Pórfiro e o Epitermal, uma vez que estes são presentes na região de estudo.

3.3.1.1 Depósitos tipo pórfiro

Os depósitos do tipo pórfiro são reconhecidos, em geral, pela presença de veios e vênulas (*stockworks*) contendo sulfetos disseminados, mineralização espacial e geneticamente associada a corpos intrusivos porifíricos e grandes volumes de rocha afetados por alteração-mineralização hidrotermal (BONGIOLO, 2006). Nestes ambientes foram reconhecidas, por diversos autores, seis zonas de alteração chamadas de Ca-Na silicática, potássica (K silicática), propilítica, fílica (ou sericítica), argílica intermediária e argílica avançada (Figura 6) (MEYER; HEMLEY, 1967 apud BONGIOLO, 2006).

Figura 6 – Esquema da distribuição espacial das alterações hidrotermais em torno de uma intrusão porfírica.



Fonte: adaptado de Lowell e Guibert (1970).

A alteração Ca-Na silicática é uma denominação informal (SILLITOE, 2000), este tipo de alteração é precoce, associado às porções profundas dos depósitos, geralmente deficiente em sulfetos e pouco desenvolvida. Geralmente é difícil de separá-la espacialmente da alteração potássica, pela formação de zonas híbridas. Quando a alteração potássica é subordinada, essas zonas são locais preferenciais de ocorrência das mineralizações metálicas (BONGIOLO, 2006).

A alteração potássica ocorre em praticamente todos os depósitos. É causada pela interação de fluidos residuais que afetam tanto a rocha intrusiva quanto as encaixantes. A alteração hidrotermal é o resultado de mudanças pós magmáticas em temperaturas entre 500°C e 700°C (ROEDDER, 1984; MCMILLAN, PANTELEYV, 1988; PIRAJNO, 1992).

A alteração propilítica constitui halos externos às intrusões, ocorrendo preferencialmente nas encaixantes sobre um grande volume de rochas. É comum a alteração dos minerais máficos originais da rocha para clorita, que coexistem com epidoto, calcita e magnetita. Veios e vênulas de pirita (calcopirita, tetraedrita, esfalerita e galena) são os sulfetos dominantes, associados com quartzo-carbonato. Podem ocorrer ainda minerais não essenciais, como sericita, montmorilonita e hematita. Este estágio de alteração necessita de uma quantidade menor de fluidos para se desenvolver, e assim, utiliza predominantemente os fluidos situados na porosidade das rochas (BERGER; VELDE, 1992 apud BONGIOLO, 2006).

A alteração argílica intermediária tem intensidade e mineralogia variada, superimposta às assembleias do tipo potássica em zonas superiores de depósitos porfíricos. Os minerais de alteração incluem muscovita de granulação fina, illita, clorita, calcita e esmectita, sendo esta

última por vezes associadas aos estágios finais de substituição de plagioclásios (BONGIOLO, 2006).

A alteração fílica é reconhecida como zonas de alteração contendo a assembleia mineralógica quartzo-sericita-pirita. Esta alteração age destruindo parcial e completamente a textura e mineralogia primárias. Ela se desenvolve comumente nas partes superiores dos depósitos, superpondo-se às alterações potássica e argílica intermediária, constituindo grande parte do minério. A pirita ocorre como o sulfeto principal na forma de veios (quartzo) e disseminada (BONGIOLO, 2006).

A alteração argílica avançada ocorre na porção superior destes depósitos, formando litocapas extensas a partir da interação de fluidos ácidos com rochas vulcânicas, porém com grande influência de fluidos meteóricos. Normalmente esta alteração se superpõe às alterações potássica, propílica e argílica intermediária. Os minerais de alteração são representados por quartzo, alunita, pirofilita, diásporo, dickta e caolinita, além de barita e enxofre nativo em estágios finais (veios) (BONGIOLO, 2006).

3.3.1.2 Depósitos tipo epitermal

Os depósitos epitermais podem ser classificados como depósitos de alta sulfetação e baixa sulfetação, ao passo que o primeiro se encontra logo abaixo da intrusão parental (fonte de calor) e o segundo distante da mesma. Outro fator característico deste tipo de depósito é a sua localização próxima da superfície (entre 1 e 2 km de profundidade) e temperaturas relativamente baixas (< 300°C) se comparados às intrusões geradoras dos depósitos tipo pórfiro (HEDENQUIST; LOWENSTERN, 1994 apud ARAUJO, 2016).

Os depósitos de alta sulfetação são formados por fluidos ácidos e oxidantes típicos de nascentes quentes ácidas próximas a vulcões e possuem associações de metais como Au-Cu e Ag-Pb (HEDENQUIST; LOWENSTERN, 1994). Os depósitos de baixa sulfetação são formados por fluidos com pH próximo ao neutro com redutores como aqueles encontrados em sistemas geotérmicos (priorizada a mineralização de metais como Au e subordinadamente Ag, Pb-Zn) e salmouras efêmeras (WHITE; HEDENQUIST, 1995 apud ARAUJO, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa visa o processamento de dados gamaespectrométricos aéreos afim de mapear zonas com possíveis alterações hidrotermais, e em seguida, aplicação de métodos geoeletricos nos setores anômalos identificados para caracterização geológica – geofísica dos mesmos.

4.1 Método Gamaespectrométrico

Os levantamentos radiométricos são úteis no mapeamento geológico, pois diferentes tipos de rocha podem ser reconhecidos por sua distinta assinatura radioativa (MOXHAM, 1963; PIRES; HARTHILL, 1989 apud KEAREY, 2009). A aerogamaespectrometria fornece informações sobre a abundância relativa ou a concentração de K, eU eTh em rochas e materiais intemperizados, através da detecção da radiação gama emitida pelo decaimento natural deste elementos (WILFORD et al., 1997 apud FERREIRA, 2002).

A aerogamaespectrometria é uma técnica que requer considerações de muitas variáveis, desde o contraste das propriedades físicas e geométricas das fontes radioativas até os efeitos do meio-ambiente, como umidade do solo, vegetação e regime de chuvas (MINTY, 1997).

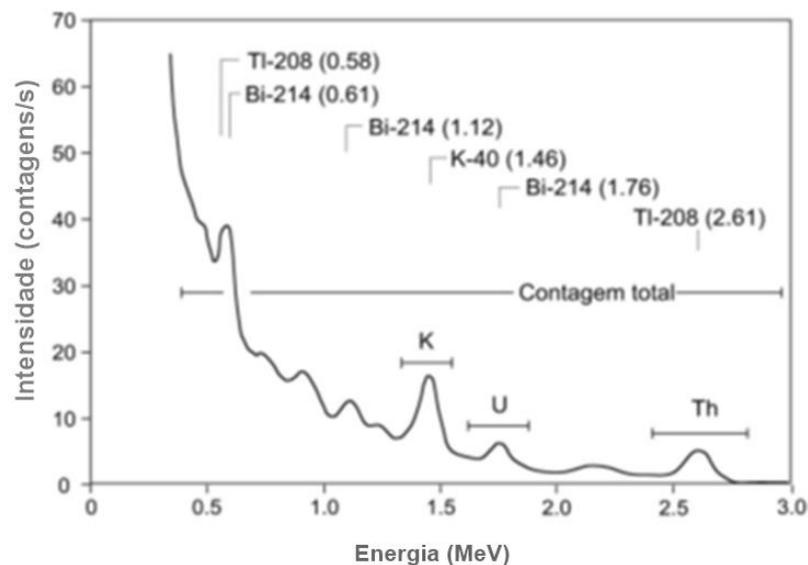
4.1.1 Radioatividade

As radiações de substâncias radioativas naturais são classificadas em três diferentes tipos, dependendo de suas energias penetrativas (FERREIRA, 2002). Segundo Arya (1974), o primeiro tipo, as partículas alfa (α), é caracterizado por uma energia muito pouco penetrativa, sendo barrada por uma fina lâmina de papel, causando ionização no ar. O segundo tipo, as partículas beta (β), apresenta energia penetrativa maior e ioniza o ar por alguns centímetros, podendo facilmente atravessar uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura. O terceiro tipo, os raios gama (γ), pode ionizar o ar até 300 metros (GRASTY, 1979) e por isso é registrado em levantamentos aerogamaespectrométricos, além de atravessar lâminas de muitos centímetros de espessura, de diferentes materiais.

4.1.2 Elementos radioativos

Os elementos de ocorrência natural nos quais os radioisótopos produzem raios gama de suficiente energia e intensidade para serem medidos em levantamentos aerogamaespectrométricos são potássio, urânio e tório (Figura 7) (FERREIRA, 2002).

Figura 7 – Janelas padrão dos radioelementos.



Fonte: adaptado de Foote (1968).

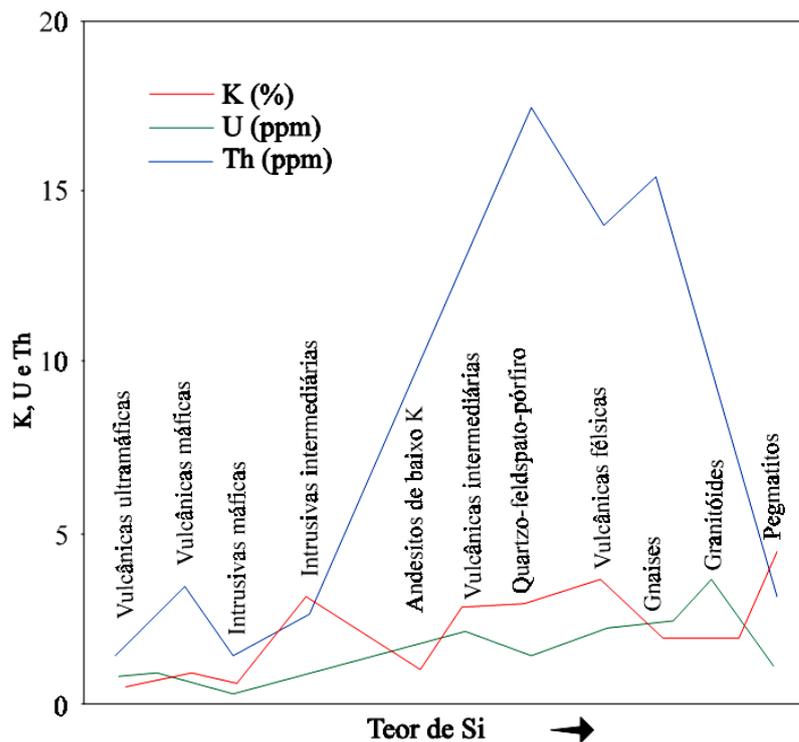
- Potássio (K): O elemento ^{40}K é o único isótopo radioativo de K, com ocorrência de 0,012 % do K natural, o qual pode 89 % decair em ^{40}Ca por emissão de partículas e os outros 11 % decair em ^{40}Ar por captura do elétron. Esse processo é seguido da emissão de um fóton de energia de 1,46 MeV. Sua abundância média na crosta terrestre é de 2% (MINTY, 1997). Pode ser relativamente alta a sua presença em rochas félsicas como granitos, mas baixa em basaltos máficos e muito baixa em dunitos e peridotitos. Na fase de intemperização a maior parte de K vai ser removida (TELFORD, 1990).

- Urânio (U): O radioisótopo ^{238}U não emite radiação, sendo sua concentração estimada por intermédio de seu filho radioativo ^{214}Bi . O valor para este elemento é estimado para condições de equilíbrio das séries radioativas. Dessa forma, o elemento é descrito como equivalente de urânio (eU). O urânio é detectado pela energia de 1,76 MeV, correspondente a absorção do ^{214}Bi da série do ^{238}U , utilizada para identificar e quantificar o urânio natural. A abundância média crustal para este elemento é de 2,7 ppm. (MINTY, 1997).

- Tório (Th): O radioisótopo ^{232}Th não emite radiação, sendo suas concentrações estimadas por intermédio de seu filho radioativo ^{208}Tl . O decaimento do Th é identificado pelo pico do ^{208}Tl , correspondente a uma energia de absorção de 2,62 MeV. O valor para este elemento é estimado para condições de equilíbrio das séries radioativas. Dessa forma, o elemento é descrito como e equivalente de tório (eTh). A sua abundância na crosta terrestre é de 8-12 ppm (MINTY, 1997).

Geralmente, como resultado de mapeamento aerogamaespectrométrico, são gerados mapas de contagem total, que é a presença total dos equivalentes dos três radioelementos U, K e Th, mapas de contagem individual de cada radioelemento, mapa ternário e mapa de Fator F. Este último mostra a distribuição do Potássio em relação aos equivalentes do Urânio e Tório. A Figura 8 mostra em quais tipos de rocha costumam ter maior concentração dos radioelementos.

Figura 8 – Representação gráfica do teor de Si e concentração dos radioelementos nas rochas.



Fonte: modificado de Minty (1997).

4.1.3 Interação da radiação gama com a matéria

Segundo Ferreira et al. (2002), existem três processos principais pelos quais a radiação gama interage com a matéria: 1) Efeito Fotoelétrico; 2) Espalhamento Compton; 3) Produção

de par elétron-pósitron. No efeito fotoelétrico o raio gama é completamente absorvido por um elétron periférico, o qual é expelido de um átomo. É um processo de absorção que se processa, predominantemente, em condições de baixos níveis de energia.

O Espalhamento Compton é um processo pelo qual um fóton incidente perde parte de sua energia para um elétron e é espalhado segundo um ângulo relacionado a sua direção original. A perda de energia do raio gama é transferida por energia cinética, para um elétron. É um processo onde predominam níveis moderados de energia (FERREIRA, 2002).

Na produção de par o fóton incidente é completamente absorvido, resultando na criação de um par de elétron-pósitron no campo eletrostático de um núcleo, com uma energia total equivalente àquela do fóton original. Podem ocorrer em níveis energéticos maiores do que 1,02 MeV e predomina em energias muito altas, particularmente em materiais de elevado número atômico (maior do que 30) (FERREIRA, 2002).

4.1.4 Correções para dados aerogamaespectrométricos

Segundo Ferreira (2002), uma série de correções é necessária para que se possa gerar os produtos finais de um levantamento aerogamaespectrométrico. As principais são: redução da radiação de fundo atmosférico (*background*), correção do efeito Compton, correção altimétrica, correção do tempo morto e conversão dos dados corrigidos em concentrações (% e ppm). Deve-se, entretanto, na interpretação de dados aerogamaespectrométricos, levar-se em consideração os efeitos ambientais que podem influenciar o espectro de raios gama.

De acordo com Minty (1997), qualquer radiação não originária do terreno é considerada como *background*, desde que não tenha nenhum significado geológico e precisa ser removida dos dados gamaespectrométricos observados. Existem quatro tipos de fontes de radiação do *background*: fluxo atmosférico do radônio, *background* cósmico, *background* da aeronave e produtos oriundos de explosões atômicas e acidentes nucleares.

O efeito da interação cósmica com as rochas é pequeno, de acordo com Minty (1997), e variações no *background* cósmico no dia-dia devido a mudanças na pressão atmosférica são mínimas, (MINTY, 1997). O *background* da aeronave refere-se à radiação devida a quantidades traços de K, U e Th na aeronave e equipamentos, bem como do próprio detector. Esta componente de *background* é constante (MINTY, 1997).

Em virtude do espalhamento Compton na superfície e no ar, de 2,62 MeV do ^{208}Tl , pode haver interferência nas janelas de baixa energia do U e do K a partir de uma fonte pura de Th (GRASTY, 1979). O mesmo ocorre com fontes de U que interferem no espectro de baixa

energia do K, assim como na janela de alta energia do Th, em resposta à radiação do ^{214}Bi na série do decaimento do U. Devido ao pequeno poder de resolução dos detetores de NaI, as contagens decorrentes de uma fonte pura de K podem ser registradas no canal do U (FERREIRA, 2002).

Correção altimétrica é uma correção efetuada através de sobrevoos, em regiões preferencialmente planas e a diversas alturas (FERREIRA, 2002). Segundo Minty (1997), os espectrômetros requerem um tempo finito para processar cada pulso do detetor. Qualquer pulso que chega enquanto outro esteja sendo processado, é automaticamente rejeitado. Um tempo morto típico é da ordem de 5-15 μs /pulso. A correção do tempo morto é geralmente muito pequena, mas pode ser significativa em áreas de alta radioatividade ou durante alguns procedimentos de calibração. O tempo morto pode ser experimentalmente medido pela conexão do espectrômetro a dois detetores idênticos (MINTY, 1997).

4.1.5 Produtos do processamento de dados aerogamaespectrométricos

Após a correção dos dados aerogamaespectrométricos podem ser gerados os mapas de distribuição radiométrica dos elementos (K, eTh e eU); distribuição da Contagem Total (CT); mapas de razões entre os radioelementos; mapa de Fator F, mapa de potássio anômalo (Kd) e mapa de urânio anômalo (Ud).

A partir dos mapas de distribuição radiométrica dos elementos (K, eTh e eU) é possível identificar e caracterizar litologias, pois, estudos desenvolvidos por Dickson e Scott (1997) sobre o teor médio dos radioelementos nas rochas ígneas mostrou que há uma tendência de aumento da quantidade destes em função do teor de sílica, ou seja, rochas félsicas possuem um teor mais elevado de radioelementos do que rochas máficas ou ultrabásicas.

As razões entre os canais (K, eTh e eU) realçam o enriquecimento ou empobrecimento de um canal em relação a outros, onde os fatores ambientais como umidade do solo, presença de vegetação e variação topográfica não ficam evidentes. Normalmente apresentam uma correlação elevada com unidades litológicas, podendo resultar em variações sutis referentes a mudança de litologia não visível nas grades originais (IAEA, 2003).

O Fator F (Equação 1) consiste em um parâmetro determinado que abrange duas características importantes como a abundância do potássio em relação a razão eU/eTh e a abundância do urânio em relação à razão K/Th (RAMOS, 2010). Segundo Gnojek e Prichystal (1985), o Fator F permite ressaltar o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório, podendo indicar áreas com alteração hidrotermal associadas a mineralizações.

$$F = K \left(\frac{eU}{eTh} \right) \quad (1)$$

Segundo Saunders et al., (1987), o tório, que apresenta menor mobilidade geoquímica, pode ser usado como controle litológico para definir valores ideais de potássio e urânio de cada amostra, para posteriormente suprimir tais efeitos. Assim, propuseram uma normalização do potássio e do urânio pelo tório, aplicado à prospecção de petróleo, calculada a partir das Equações 2 e 3 respectivamente.

$$K_i = \left(\frac{\text{média de } K_s}{\text{média de } Th_s} \right) Th; K_d = \frac{K_s - K_i}{K_i} \quad (2)$$

$$U_i = \left(\frac{\text{média de } U_s}{\text{média de } Th_s} \right) Th; U_d = \frac{U_s - U_i}{U_i} \quad (3)$$

Onde:

K_i e U_i são os valores ideais definidos a partir do tório;

K_d e U_d são os desvios dos valores ideais;

K_s e U_s são os dados originais.

Pires (1995) empregou pela primeira vez este método na prospecção mineral, identificando com sucesso zonas de alteração hidrotermal em Crixás-Guarinos no estado de Goiás, através do potássio anômalo (K_d). Após esta experiência, novas aplicações desta técnica, em conjunto com o Fator F, foram relatadas por Ferreira et al. (1998), Blum (1999), Carvalho (1999), Quadros (2000), dentre outros (NETO; FERREIRA, 2003).

4.2 Método Geométrico

Os métodos geométricos de prospecção geofísica utilizam parâmetros elétricos de solos e rochas para caracterizar a geologia em subsuperfície. A prospecção elétrica envolve o estudo dos efeitos produzidos pela injeção de uma corrente elétrica no solo ou o estudo da variação de parâmetros elétricos do mesmo sem a necessidade desta injeção (ORELLANA, 1972).

Os métodos geométricos compreendem o método da Eletroresistividade, o método da Polarização Induzida (*IP*, do inglês *Induced Polarization*), e o método do Potencial Espontâneo (*SP*, do inglês *Self Potencial*) (KEAREY et al., 2009).

Os métodos geofísicos tradicionalmente empregados na pesquisa mineral de metais básicos são o Método da Eletroresistividade e o Método da Polarização Induzida (*IP*) (MOON et al., 2006 apud MOREIRA, 2014).

4.2.1 Método da Eletrorresistividade

O Método da Eletrorresistividade consiste na injeção de corrente artificial no solo, que é conduzida por meio de eletrodos em subsolo. Este procedimento consiste em medir diferenças de potenciais em outros eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente. A partir disto é possível determinar a resistividade elétrica aparente (ρ_a) em subsuperfície (TELFORD, 1990). Os desvios do padrão de diferenças de potenciais esperados em solos homogêneos fornecem informações sobre a forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades de subsuperfície (KEAREY et al., 2009).

4.2.1.1 Resistividade

A resistividade elétrica (ρ) é a propriedade física que rege o Método da Eletrorresistividade, a mesma define o quanto um material se opõe a passagem de corrente elétrica, de modo que quanto maior for a resistividade elétrica do material, mais difícil será a passagem de corrente no mesmo.

A Lei de Ohm estabelece uma relação entre resistividade elétrica (ρ) e a resistência elétrica (R) de um condutor homogêneo e de forma cilíndrica conforme a Equação 4:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

Onde:

R é a resistência elétrica do condutor;

ρ é a resistividade elétrica do condutor;

A é a área da seção transversal do condutor;

L é o comprimento do condutor.

A resistividade elétrica (Equação 5) é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo, o mesmo pode ser obtido a partir da Equação 4 da seguinte forma:

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

4.2.1.2 Resistividade elétrica aparente

Na prática o subsolo não pode ser considerado homogêneo, sendo assim, a resistividade medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície relativamente grande (Figura 9). Portanto, ao efetuar as medições, obtém-se uma resistividade elétrica aparente (ρ_a), sendo esta uma variável que expressa os resultados das medições de alguns métodos geoeletricos, e é a que se toma como base para interpretação final (BRAGA, 2006). A resistividade elétrica aparente é determinada pela Equação 6 a seguir:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

Onde:

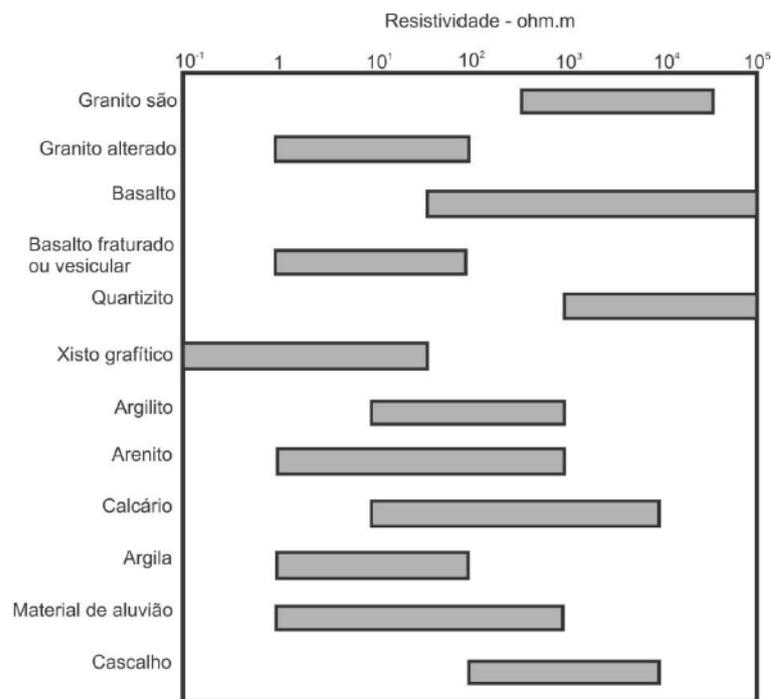
ρ_a é a resistividade elétrica aparente;

K é o fator geométrico do arranjo utilizado;

ΔV é a diferença de potencial;

I é a corrente elétrica.

Figura 9 – Valores de resistividade em rochas e solos.



Fonte: adaptado de Ward (1990).

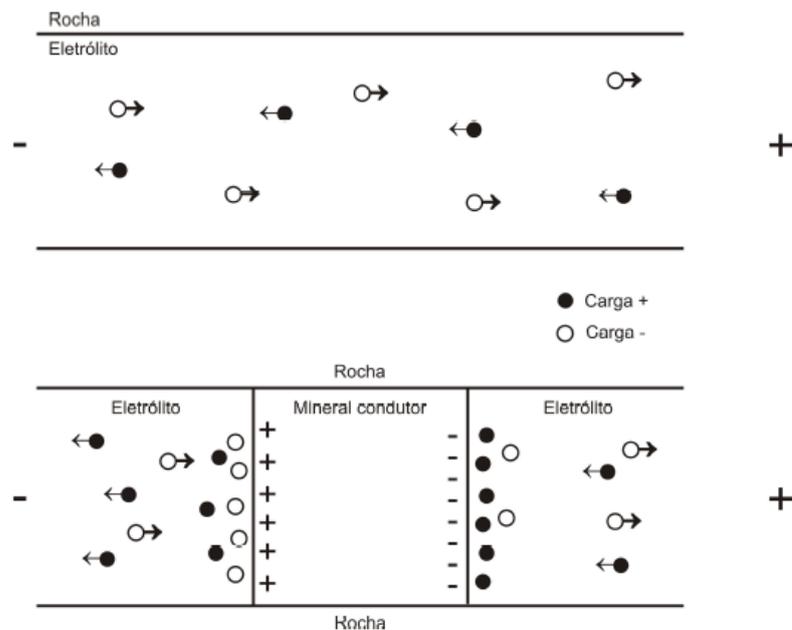
4.2.2 Método da Polarização Induzida

A Polarização Induzida (IP) foi observada por C. Schlumberger em 1920, quando ele percebeu que corpos atravessados por uma corrente elétrica, uma vez que fosse cortado esse campo elétrico, a corrente não desaparece e ela passa a decair lentamente (ORELLANA, 1972). Um fenômeno semelhante é observado quando a corrente é ligada. Após um repentino aumento inicial da voltagem, a corrente aumenta gradualmente durante um intervalo de tempo até um valor estável. O solo, então, age como um capacitor e armazena carga elétrica, isto é, torna-se eletricamente polarizado (KEAREY, 2009).

Os responsáveis por esse efeito de IP tem origem eletroquímica e podem ser divididos em dois tipos:

Polarização de eletrodo: ocorre principalmente com a presença de minerais metálicos, onde uma rede de cargas de sinais opostos é formada em cada face do mineral, resultando o acúmulo de íons em sua face. Com o cessar da corrente responsável por esse efeito, as cargas do mineral e os íons se rearranjam, dando o efeito de queda gradual do sinal elétrico (Figura 10) (VINEGAR; WAXMAN, 1984).

Figura 10 – Ilustração de como ocorre a polarização de eletrodo.

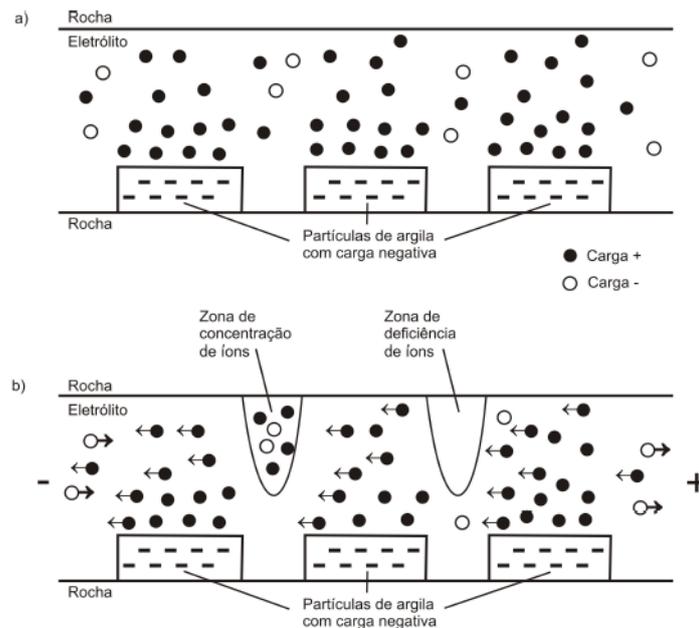


Fonte: Ustra (2008).

Polarização de membrana: ocorre geralmente em material poroso e com pouca presença de minerais metálicos. Aqui o meio gera zonas de acúmulos de cargas, resultando em gradientes

de densidade de carga, quando a corrente é interrompida, essas cargas voltam a sua posição de equilíbrio, produzindo o efeito de queda gradual do sinal elétrico (Figura 11) (VINEGAR; WAXMAN, 1984).

Figura 11 – Ilustração de como ocorre a polarização de membrana.



Fonte: Ustra (2008).

A resposta da polarização induzida é uma quantidade, com dimensões, muito reduzida, sendo na prática medida tal como uma variação de voltagem em função do tempo ou frequência, denominados de IP – Domínio do Tempo e IP – Domínio da Frequência, respectivamente (BRAGA, 2007). A medição de um decaimento de voltagem sobre um certo intervalo de tempo é conhecida como levantamento IP no domínio do tempo, enquanto as medições de resistividade aparente em duas ou mais baixas frequências é conhecida como levantamento IP no domínio da frequência (KEAREY, 2009).

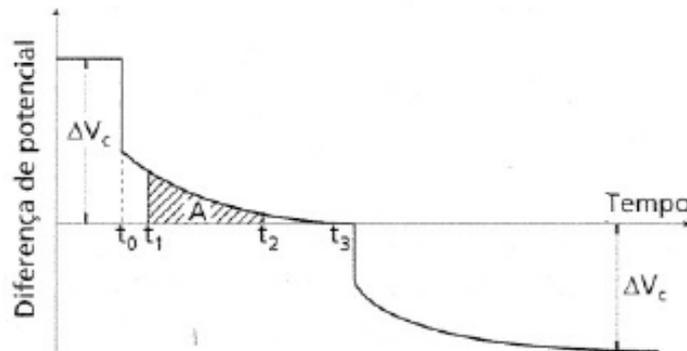
4.2.2.1 Cargabilidade

As medições IP no domínio do tempo, envolvem o monitoramento do decaimento da voltagem após a corrente ser desligada. O parâmetro mais comumente medido é a cargabilidade M (Equação 7), definida como a área A sob a curva de decaimento durante um certo intervalo de tempo t_1 - t_2 normalizado pela diferença de potencial no estado estacionário ΔV_c (KEAREY, 2009).

$$M = \frac{A}{\Delta V_C} = \frac{1}{\Delta V_C} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (7)$$

A cargabilidade é medida durante um determinado intervalo de tempo, logo após a corrente polarizada ser desligada (Figura 12). A área A é fornecida pelo aparato de medição, onde é obtida por integração analógica (KEAREY, 2009).

Figura 12 – O fenômeno de Polarização Induzida no domínio do tempo.



Fonte: Kearey (2009).

4.2.3 Técnicas de investigação

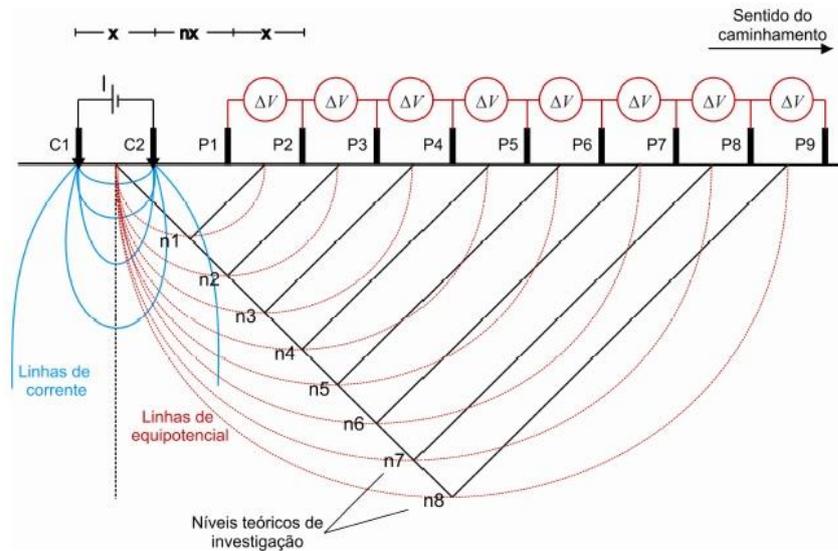
As principais técnicas de investigação são: Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical.

4.2.3.1 Caminhamento Elétrico

A técnica do Caminhamento Elétrico (CE) é aplicada em situações em que visam determinar discontinuidades laterais nos materiais geológicos, tais como diques e soleiras, contatos geológicos, fraturamentos e/ou falhamentos, corpos mineralizados, mapeamento de plumas de contaminação no subsolo, etc. (ORELLANA, 1972). Esta técnica possui dois tipos de arranjos mais conhecidos, o Dipolo-Dipolo e o Polo-Dipolo.

Com o arranjo Dipolo-Dipolo, os eletrodos de corrente (C1 e C2) e de potencial (P1 e P2) são dispostos num mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos $X = \overline{C_1C_2} = \overline{P_1P_2}$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação ($n = 1, 2, 3, \dots$), atribuídas à intersecção das linhas que partem do centro de cada par de eletrodos, com ângulos de 45° , conforme a Figura 13 (USTRA, 2008).

Figura 13 – Arranjo Dipolo – Dipolo.



Fonte: modificado de Elis (1998).

No método da Eletrorresistividade, a ρ_a é determinada a partir da Equação 6, onde o coeficiente geométrico K, nesse caso, é dado conforme a Equação 8 a seguir:

$$K = 2\pi Gx, \text{ com } G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (8)$$

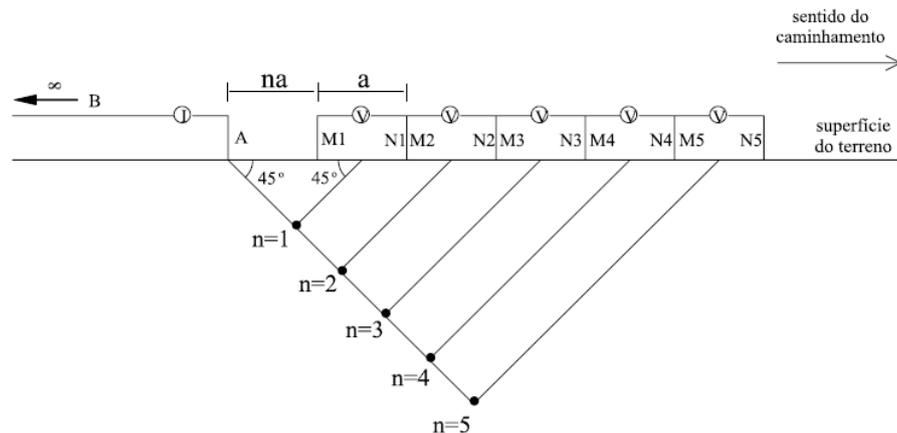
Onde:

x é o espaçamento entre os eletrodos $\overline{C1C2}$ e $\overline{P1P2}$.

n é o nível de investigação.

O arranjo Polo-Dipolo (Figura 14) consiste em três eletrodos móveis ao longo do perfil de caminhada, um de corrente (A) e dois de potencial (MN) cujo espaçamento ($a = MN$) permanece constante. O outro eletrodo de corrente que fecha o circuito (B) é mantido a uma distância suficientemente grande, denominada de “infinito” e que corresponde de dez a vinte vezes a maior abertura entre os eletrodos extremos do arranjo que permanecem na linha do levantamento (KELLER; FRISCHKNECHT, 1966; TELFORD et al., 1990; ROBAIN et al., 1999, apud GANDOLFO; GALLAS, 2007).

Figura 14 – Arranjo Polo – Dipolo.



Fonte: Gandolfo; Gallas, (2007).

O cálculo da resistividade aparente se dá da mesma maneira que aquela utilizada para o arranjo Dipolo – Dipolo e o fator G é expresso por (Equação 9):

$$G = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{1+n} \right) \quad (9)$$

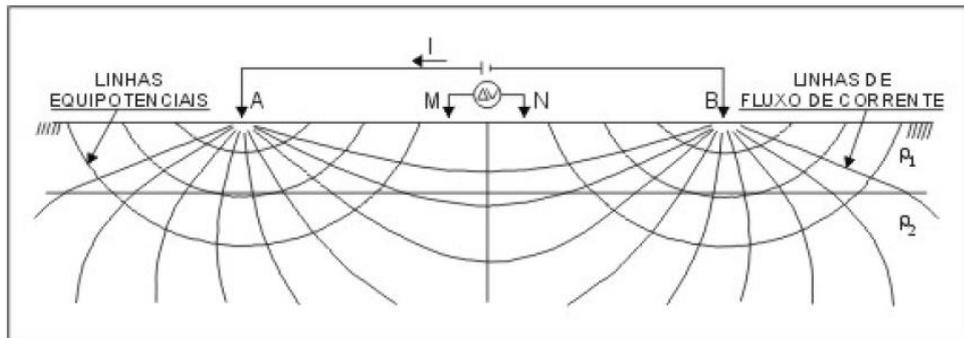
4.2.3.2 Sondagem Elétrica Vertical

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) deve ser realizada, preferencialmente, em terrenos compostos por camadas lateralmente homogêneas em relação ao parâmetro físico estudado e limitadas por planos paralelos à superfície do terreno (BRAGA, 2007).

A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição espacial dos estratos com diferentes resistividades em subsolo, partindo dos dados de resistividade aparente medidos em superfície. Por fim, é feita uma correlação dos estratos geoeletricos com a geologia local (ELIS, et al., 2008). A técnica de SEV possui dois arranjos mais conhecidos, o Wenner e o Schlumberger.

O arranjo Schlumberger (Figura 15), além de ser mais prático no campo, sendo necessário o deslocamento de apenas dois eletrodos, as leituras nos equipamentos são menos sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis. Enquanto os eletrodos de corrente A e B apresentam uma separação crescente, em relação ao centro do arranjo, os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos durante a aquisição (PINTO, et al., 2013).

Figura 15 – Arranjo Schlumberger.



Fonte: adaptado de Telford et al. (1990).

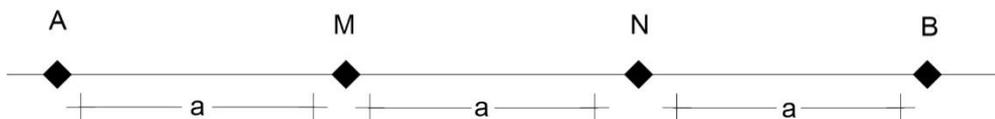
O cálculo para resistividade aparente utilizando o arranjo Schlumberger se dá a partir da Equação 6, onde o fator geométrico K corresponde a Equação 10 a seguir:

$$K = \pi \frac{(\overline{AM} \overline{AN})}{\overline{MN}} \quad (10)$$

Apesar do arranjo Wenner (Figura 16) ser menos prático em campo e ser mais susceptível a ruídos é o que possui melhor resultado para aplicação do Método da Eletrorresistividade e o Método da Polarização Induzida ao mesmo tempo. Neste arranjo os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são dispostos de forma uniforme numa linha e a resistividade aparente pode ser calculada a partir da Equação 6 (TELFORD, et al., 1990), onde o fator geométrico é determinado pela Equação 11.

$$K = 2\pi a \quad (11)$$

Figura 16 – Arranjo Wenner.



Fonte: modificado de Orellana (1972).

5 TRABALHOS ANTERIORES NA ÁREA DE ESTUDO

5.1 Trabalhos geológicos

Bongiolo (2006) realizou uma síntese sobre o histórico e mineralizações na região de Lavras do Sul. Foi no fim do século XVIII que a garimpagem ao longo dos aluviões nos arroios da região se tornou rotineira. Na década de 40, trabalhos mais detalhados de reconhecimento foram executados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 1942).

Um grande levantamento e amostragem de todas as ocorrências foi realizado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) na década de 70 (KAUL; REINHEIMER, 1974). Entre as décadas de 1970-80 a Companhia Brasileira de Cobre (CBC) realizou trabalhos e prospecção em solo, rocha e sedimento de corrente principalmente nas Minas Cerrito e Bloco Butiá. Já nas décadas de 1980-90, a Companhia Riograndense de Mineração (CRM) implantou um programa de exploração na Mina Volta Grande, mas com baixa produtividade.

Segundo Rojas (2007), as mineralizações da Mina Cerro Rico estão associadas aos filões de quartzo, que estruturalmente se comportam semelhante às famílias de fraturas NW/EW, nos quais os teores de Au são mais elevados.

5.2 Trabalhos geofísicos

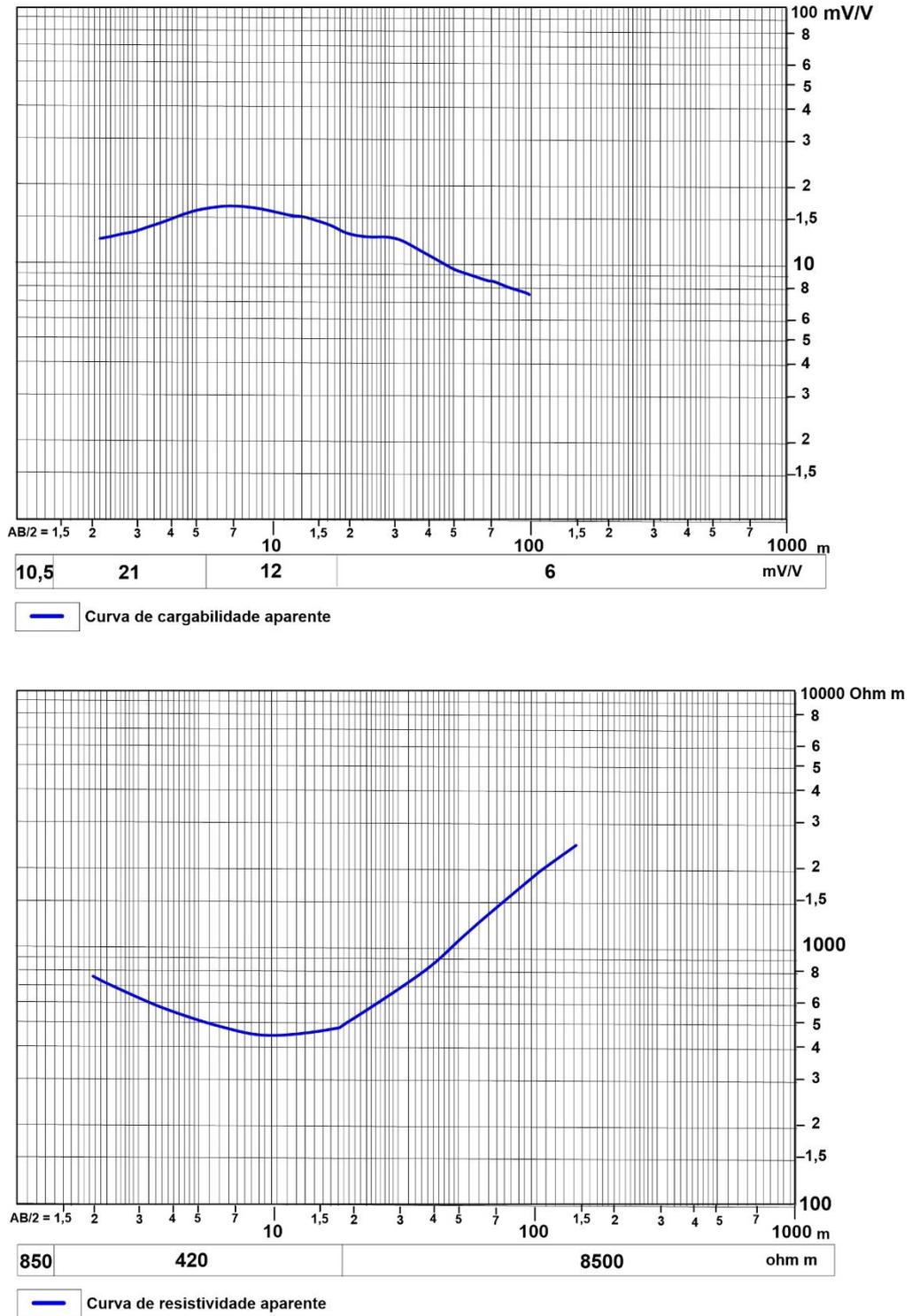
A área de pesquisa consta com informações geofísicas aerogamaespectrométricas e geolétricas que serão descritas nos sub-tópicos a seguir.

5.2.1 Levantamento geolétrico na área de estudo

Rigoti e Blanco (1985) realizaram um estudo geolétrico no CILS utilizando os métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida (IP). A partir das pseudo-seções geradas a partir de 23 linhas de Caminhamento Elétrico, Rigoti e Blanco constataram a ocorrência de intervalos anômalos de cargabilidade normalmente associados a baixas resistividades aparentes ($\rho_a < 1500$ Ohm m). Num *background* inferior a 8 mV/V as anomalias IP aparecem com valores maiores 12 mV/V. A Figura 17 exhibe o modelo de curvas para resistividade e cargabilidade geradas por Rigoti e Blanco.

Com base nas respostas de ocorrências conhecidas na área pode-se correlacionar as zonas anômalas à presença dos granitos hidrotermalizados, mineralizados em ouro, em que a pirita associada seria a responsável pela anomalia IP e a maior alteração da rocha seria responsável pela baixa resistividade (RIGOTI; BLANCO, 1985).

Figura 17 - Curvas de cargabilidade e resistividade aparente da região do CILS.



Fonte: adaptado de Rigoti e Blanco (1985).

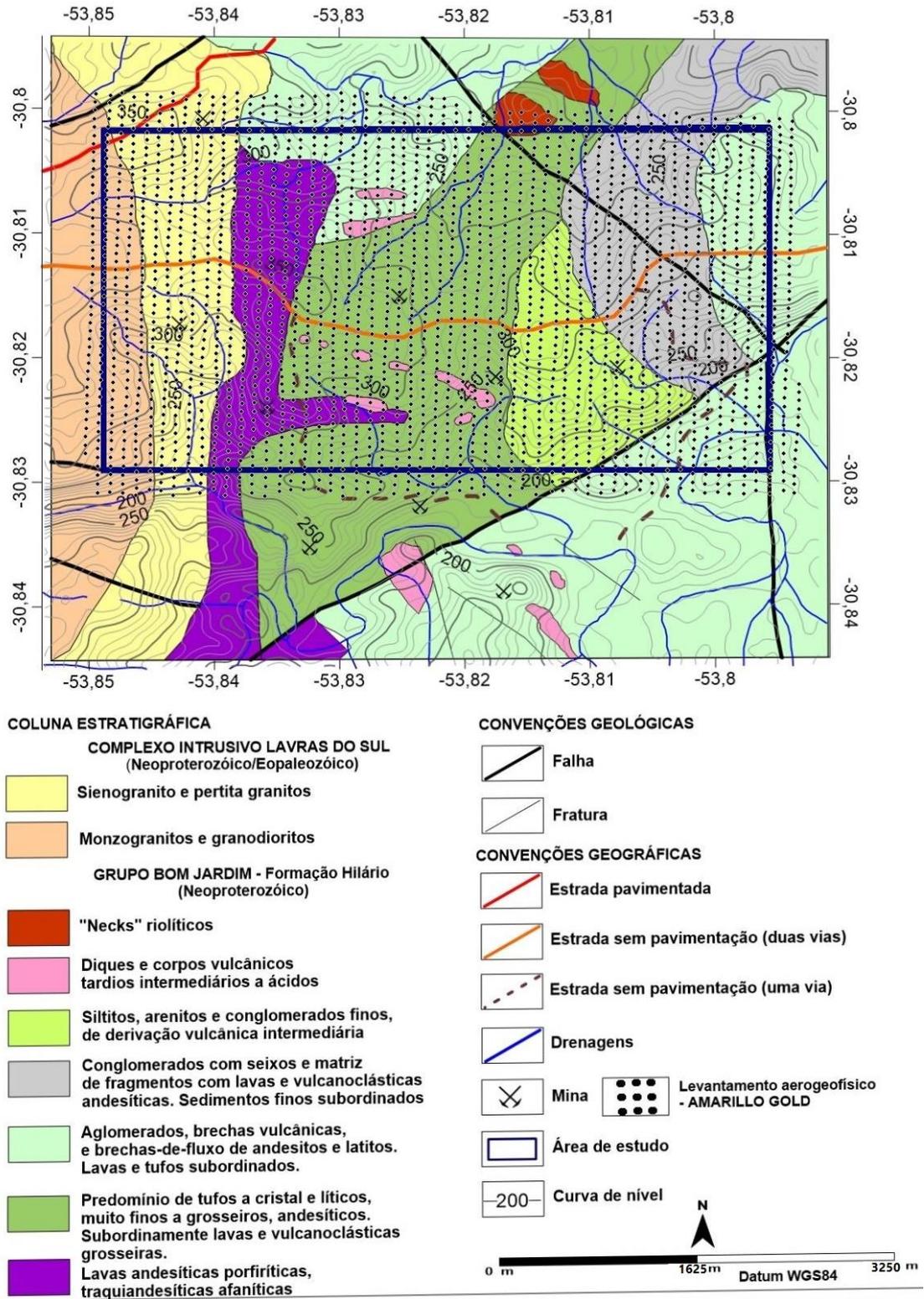
5.2.2 Levantamento aerogeofísico na área de pesquisa

Os dados aerogeofísicos utilizados foram gentilmente cedidos pela Empresa *Amarillo Gold Corporation*. O levantamento aerogeofísico gamaespectrométrico (Projeto Lavras do Sul – Rio Grande do Sul), foi realizado no ano de 2007 pela empresa contratada *Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda*, onde se utilizou uma aeronave de asa fixa sobre um bloco pré-definido localizado no estado do Rio Grande do Sul.

O bloco possui uma área total de 226,64 km² e foi recoberto com linhas de voo e controle espaçadas a 100 m e 1000 m respectivamente, orientadas nas direções NS e EW e com altura de voo fixada em 100 metros sobre o terreno. As linhas de voo que contemplam a área de pesquisa, que possui 15,758 km², podem ser verificadas na Figura 18.

Os dados radiométricos foram corrigidos e processados seguindo os métodos descritos pela agência internacional de energia atômica (IAEA, 2003). As correções feitas foram de tempo morto, background cósmico, background atmosférico, efeito Compton e atenuação de altura.

Figura 18 – Geologia local com linhas de vôo do aerolevanteamento (2007).



Fonte: modificado de Minerar (1998).

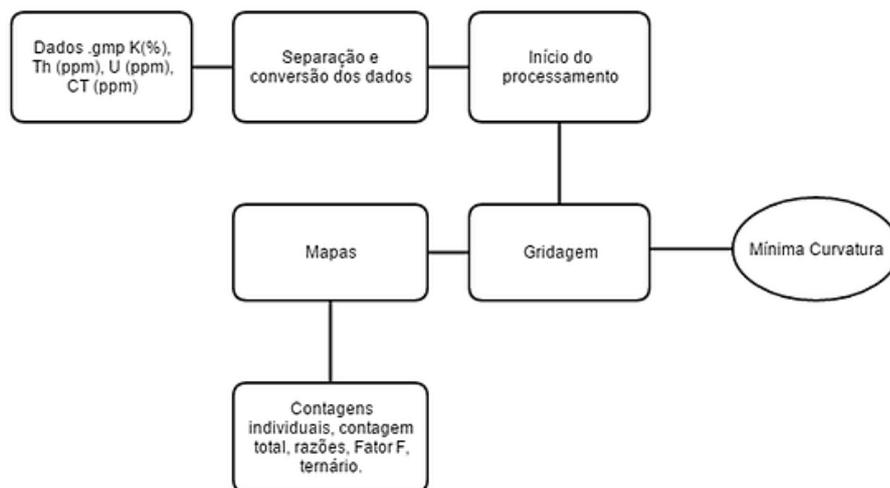
7 RESULTADOS

Neste tópicó serão apresentados os resultados gráfcicos dos processamentos de dados realizados para os dados aerogamaespectrométricos e geolétricos.

7.1 Resultados, processamento e interpretação dos dados aerogamaespectrométricos

Ao processar os dados aerogamaespectrométricos a interpolação utilizada para gerar os mapas foi de Mínima Curvatura, pelo fato da malha de aquisição ser regular, e o espaçamento utilizado na interpolação foi de $\frac{1}{4}$ do espaçamento entre as linhas de aquisição, pois, segundo Vasconcelos et al. (1990) este espaçamento evita perda de informação ou falseamento dos dados. O fluxograma da Figura 19 ilustra de forma mais detalhada como se deu o processamento dos dados aéreos.

Figura 19 – Fluxograma de processamento dos dados aerogamaespectrométricos.



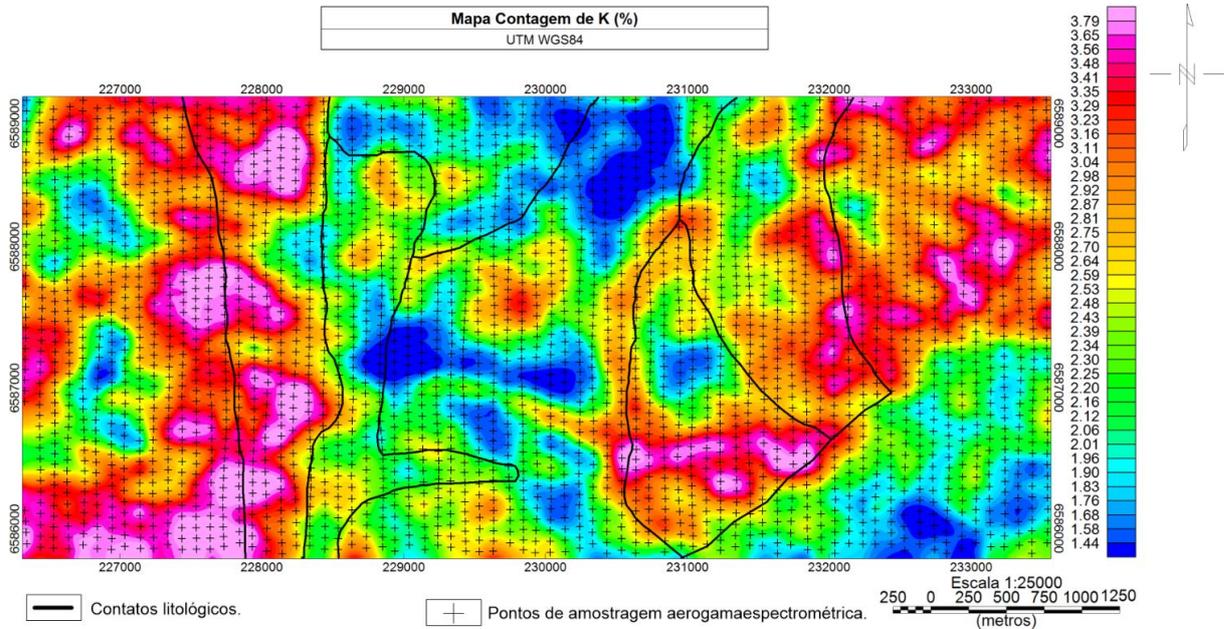
Fonte: autor (2016).

Com o processamento dos dados fornecidos pela *Amarillo Gold Corporation* foi possível gerar as seguintes saídas gráfcicas: Mapas de contagens individuais, K, eTh e eU (Figuras 20, 21 e 22), mapa de contagem total (Figura 23), mapa de razões (Figura 24), mapa ternário e mapa do Fator F (Figura 25).

Na porção W dos mapas (Figura 20, 21, 22), onde está localizada a maior cota topográfica, é possível notar um alto dos três elementos. Além deste alto ser devido à presença de monzogranitos, granodioritos e lavas andesíticas presentes na litologia, ele pode estar

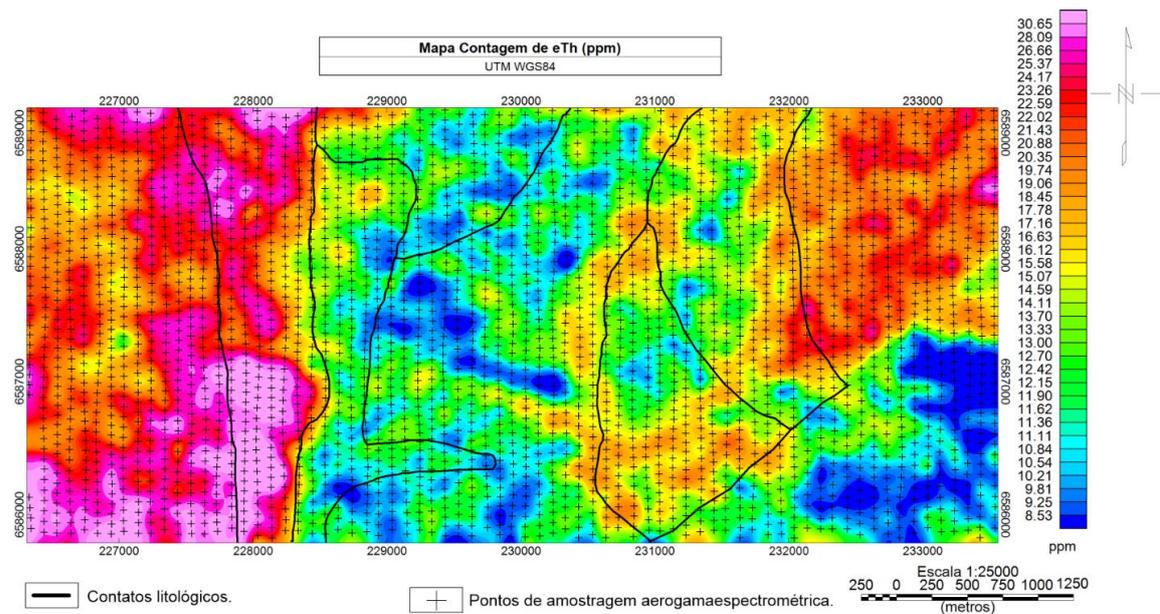
associado a um possível afloramento dessas rochas. Na porção E (Figura 20, 21, 22), observa-se que apenas o K possui valores elevados mesmo com a baixa topografia. Isto ocorre pois o potássio é um elemento móvel e provavelmente se descolocou até esta região.

Figura 20 – Mapa de contagem individual de K (%).



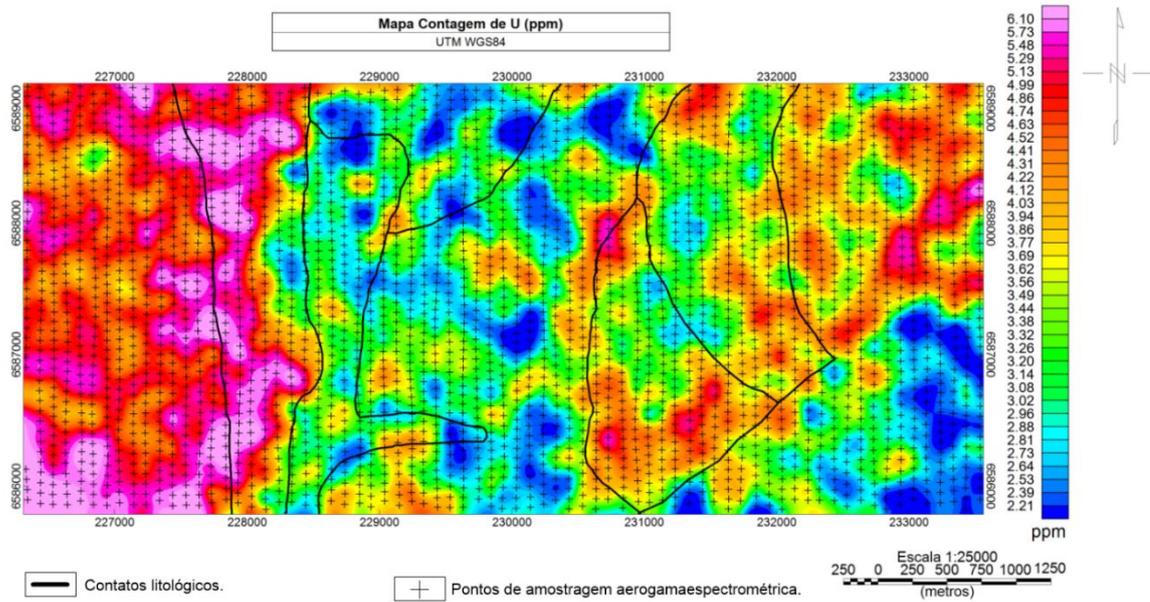
Fonte: autor (2016).

Figura 21 – Mapa de contagem individual eTh (ppm).



Fonte: autor (2016).

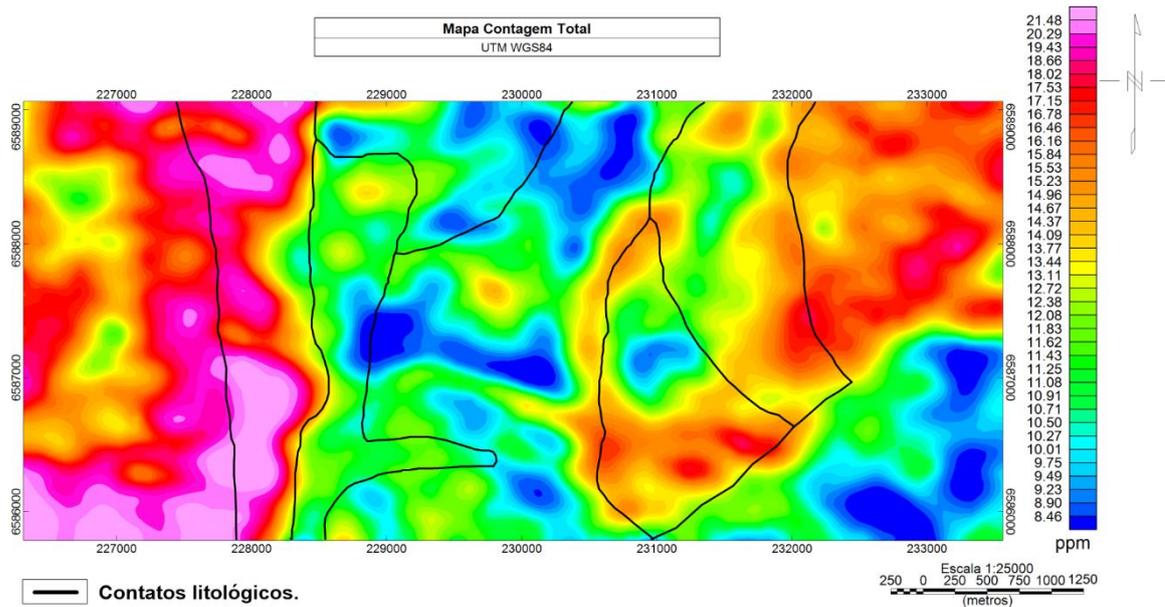
Figura 22 – Mapa de contagem individual eU.



Fonte: autor (2016).

A Figura 23 corresponde ao mapa de Contagem Total, onde é possível identificar a distribuição dos três radioelementos de forma conjunta, visto que este mapa é gerado considerando um intervalo de energia de 0,41 – 2,81 MeV, que engloba os picos de energia de cada radioelemento.

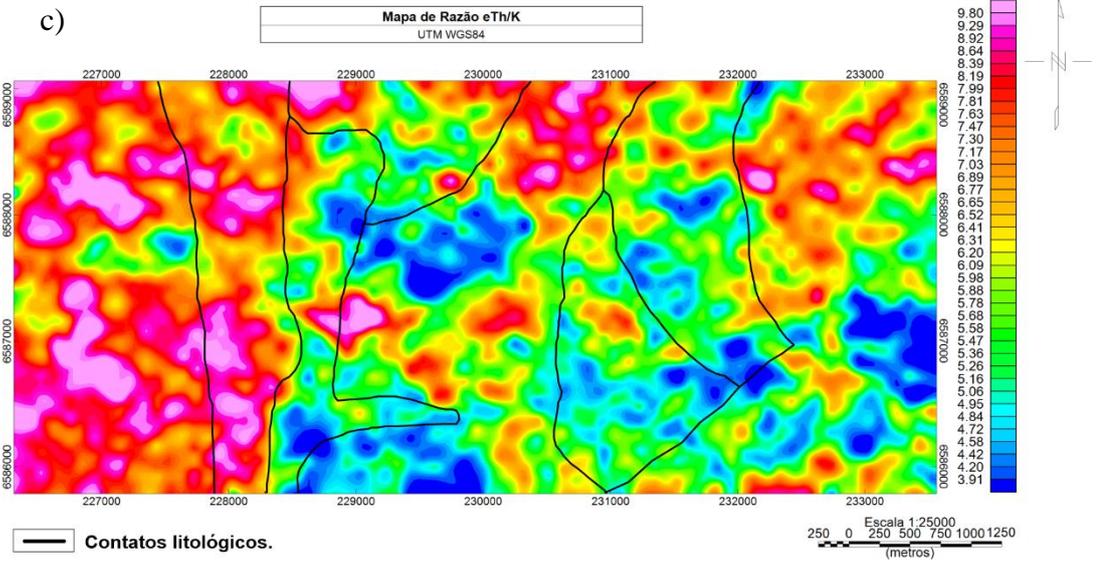
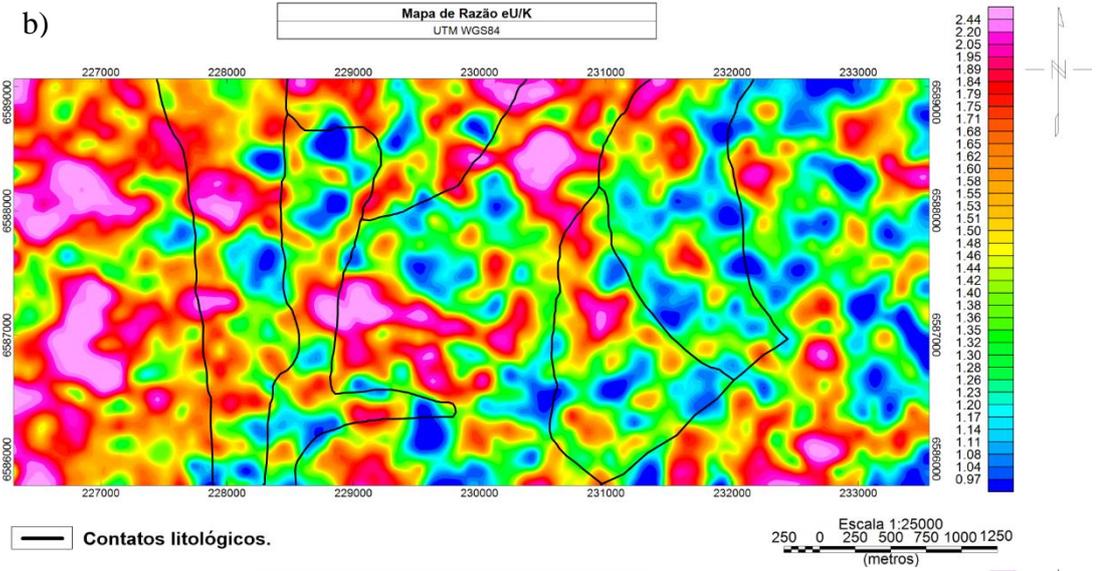
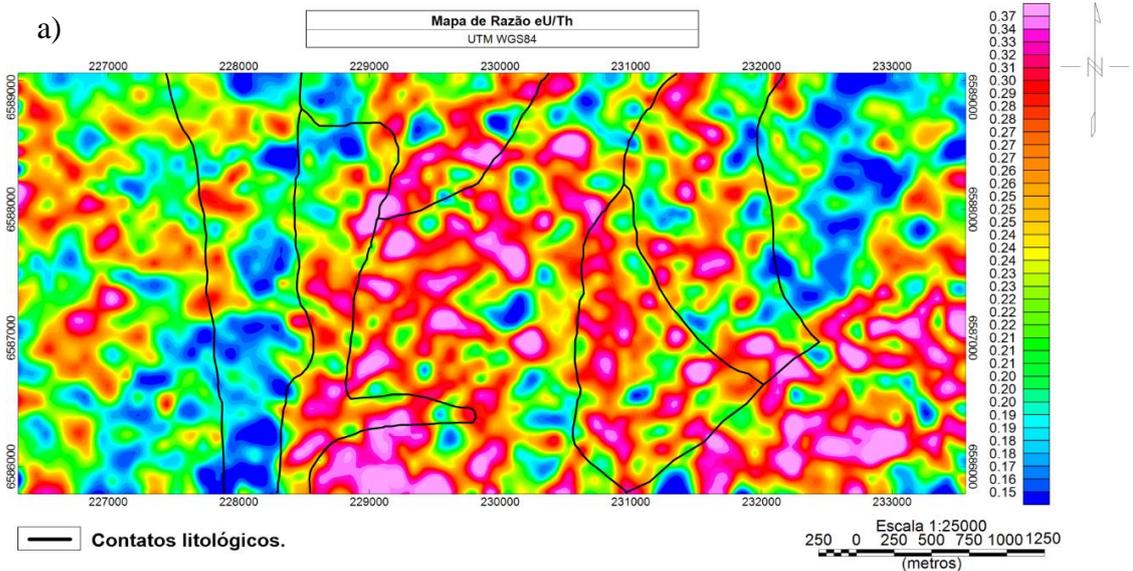
Figura 23 – Mapa de Contagem Total.



Fonte: autor (2016).

A partir dos canais de K, eTh, eU fez-se as razões entre eles, que consiste em uma técnica utilizada para realçar o enriquecimento ou empobrecimento de um canal em relação à outro (Figura 24). Na Figura 24a, observa-se um enriquecimento do eU em relação ao eTh na porção central e sudeste do mapa, devido a menor concentração de eTh nessa região. Na Figura 24b, observa-se um enriquecimento do eU em relação ao K na porção noroeste, devido a menor concentração de K nessas regiões. Na Figura 24c, observa-se um enriquecimento de eTh em relação ao K na porção oeste devido a menor concentração de K.

Figura 24 – Mapa de razão eU/eTh (a), mapa de razão eU/K (b), mapa de razão eTh/K (c).



Fonte: autor (2016).

A Figura 25a corresponde ao mapa de Fator F, onde é possível observar a distribuição do K em relação a razão de eU/eTh . Valores elevados de Fator F podem indicar alteração hidrotermal. Nesta figura observa-se valores altos para o Fator F em quase todo o mapa, entretanto, o foco de estudo a partir de agora será na região central (Figura 26), que além de possuir três setores anômalos, é onde se localiza a Mina Cerro Rico. A Figura 25b corresponde ao mapa ternário, onde observa-se a concentração dos três radioelementos. Na porção oeste do mapa verifica-se um alto dos três radioelementos, referente às litologias com maior teor de Si do arco São Gabriel, enquanto que na porção central observa-se um baixo dos três radioelementos e apenas um pico de K no local onde está a Mina Cerro Rico, esta região refere-se ao Membro Hilário, que possui rochas com menores teores de Si.

O mapa ternário representa a distribuição dos radioelementos em uma imagem composta de cores geradas pela modulação das cores vermelho, verde e azul do dispositivo de exibição RGB, de acordo com a proporção dos valores de concentração dos radioelementos K, eTh, e eU respectivamente. O uso de vermelho, verde e azul para K, eTh e eU, respectivamente, é padrão para a exibição de dados de espectrometria de raios gama. Para locais com concentração alta dos três elementos tem-se cores brancas devido à combinação das três cores, e ausência de cor (preto) para regiões com baixos valores dos três elementos (IAEA, 2003).

Figura 25 – Mapa de Fator F (a) e Ternário (b).

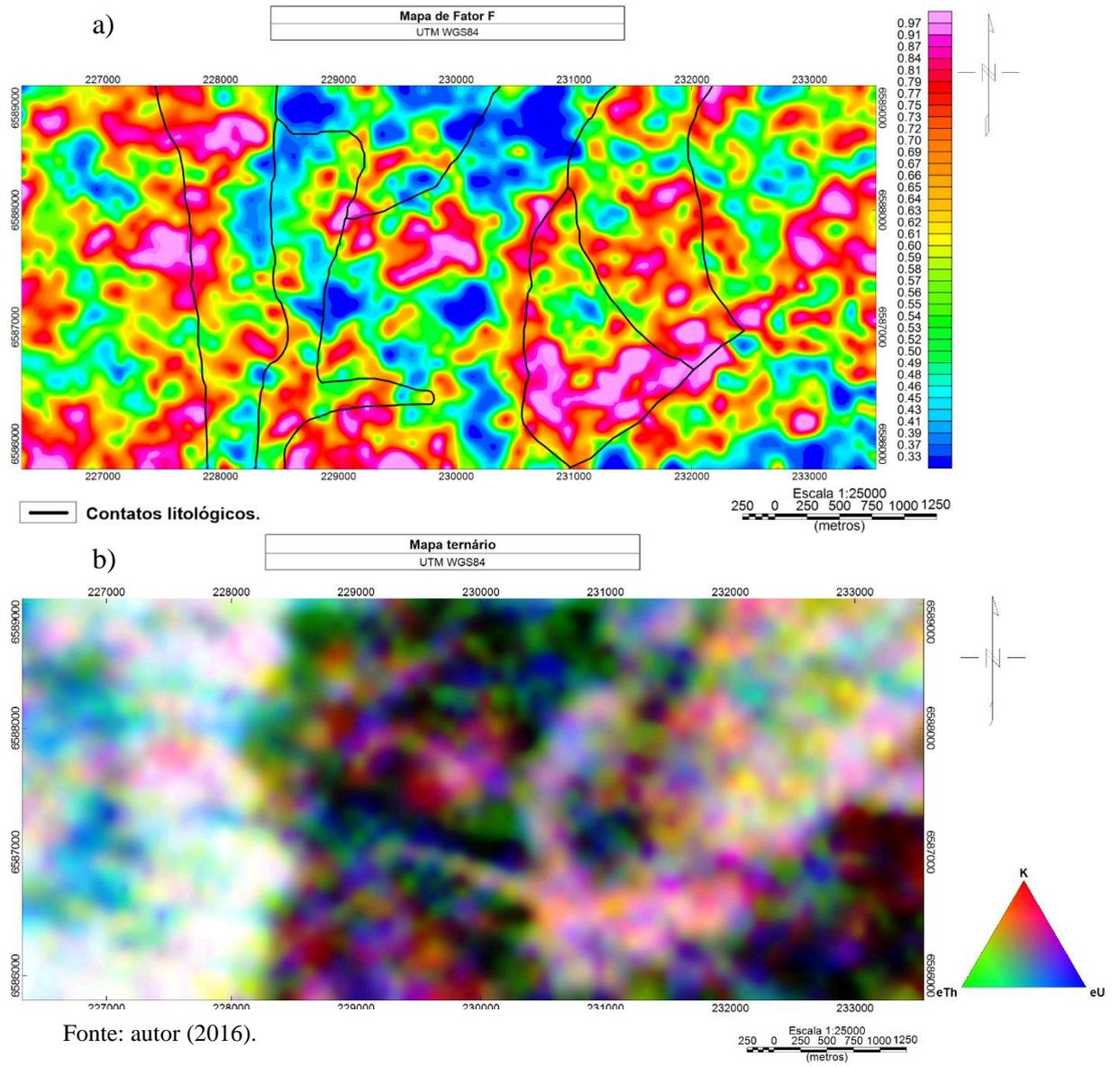
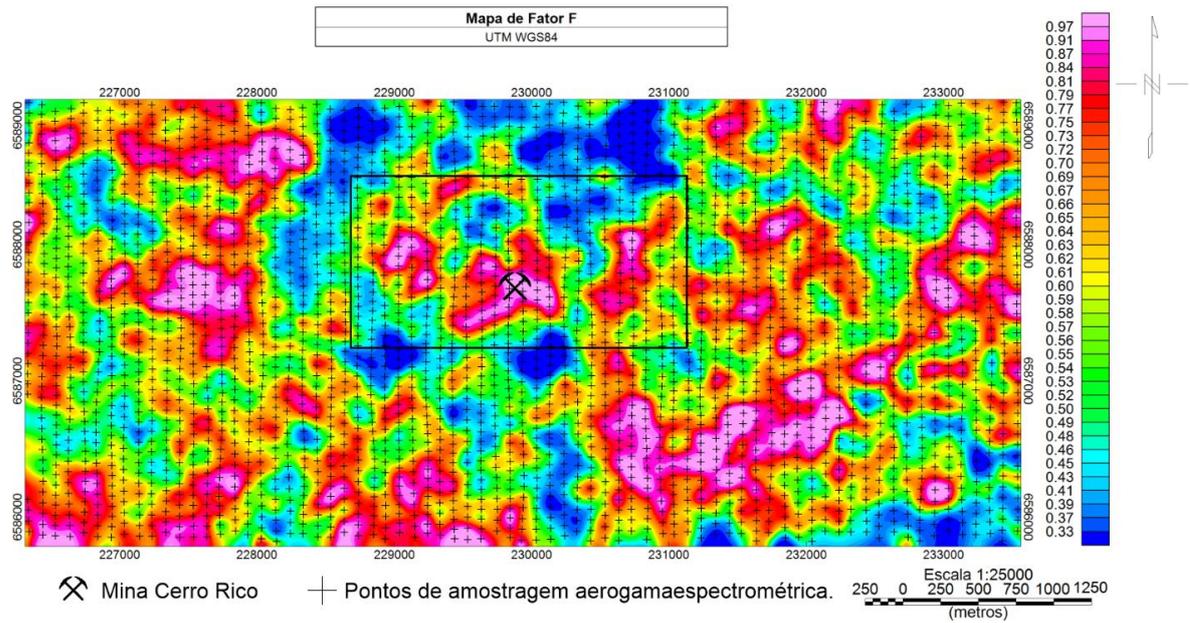


Figura 26 – Setores anômalos de Fator F.

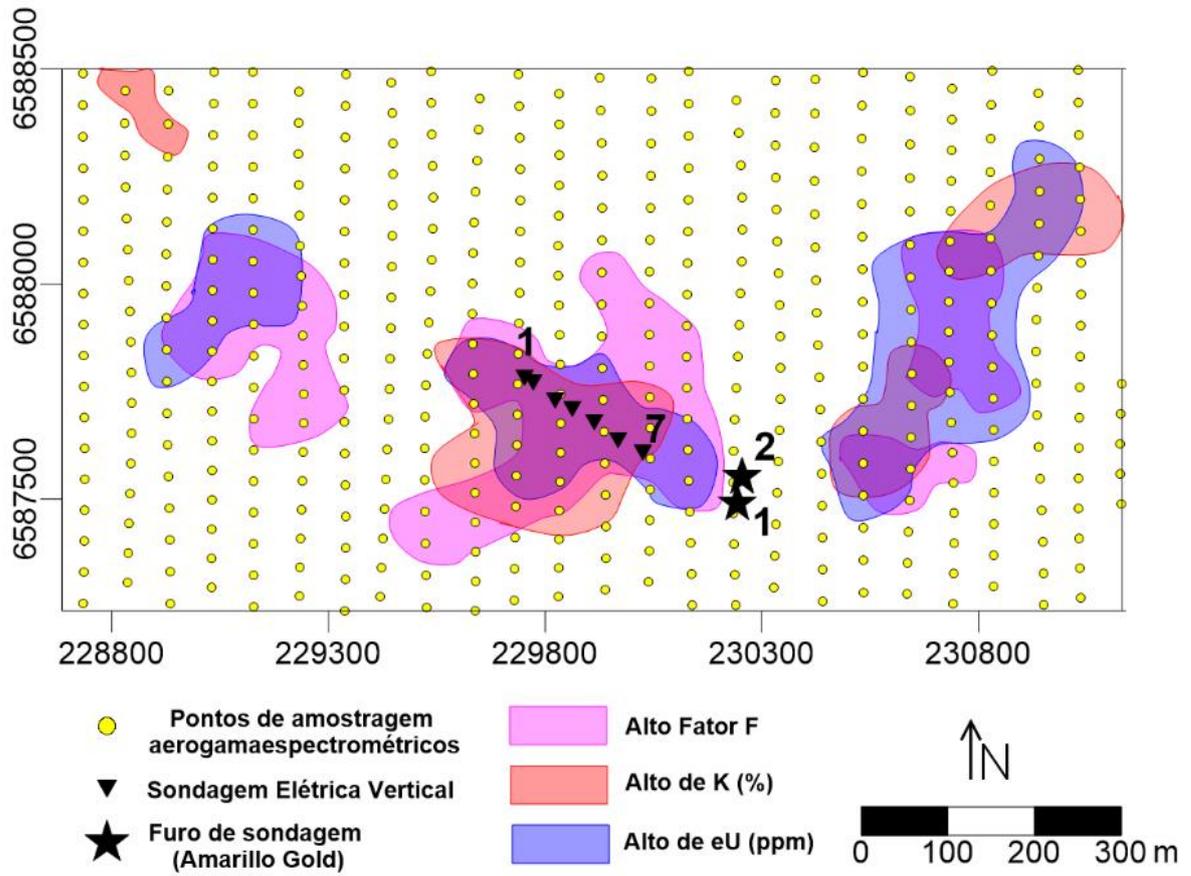


Fonte: autor (2016).

7.2 Resultados, processamento e interpretação dos dados geolétricos

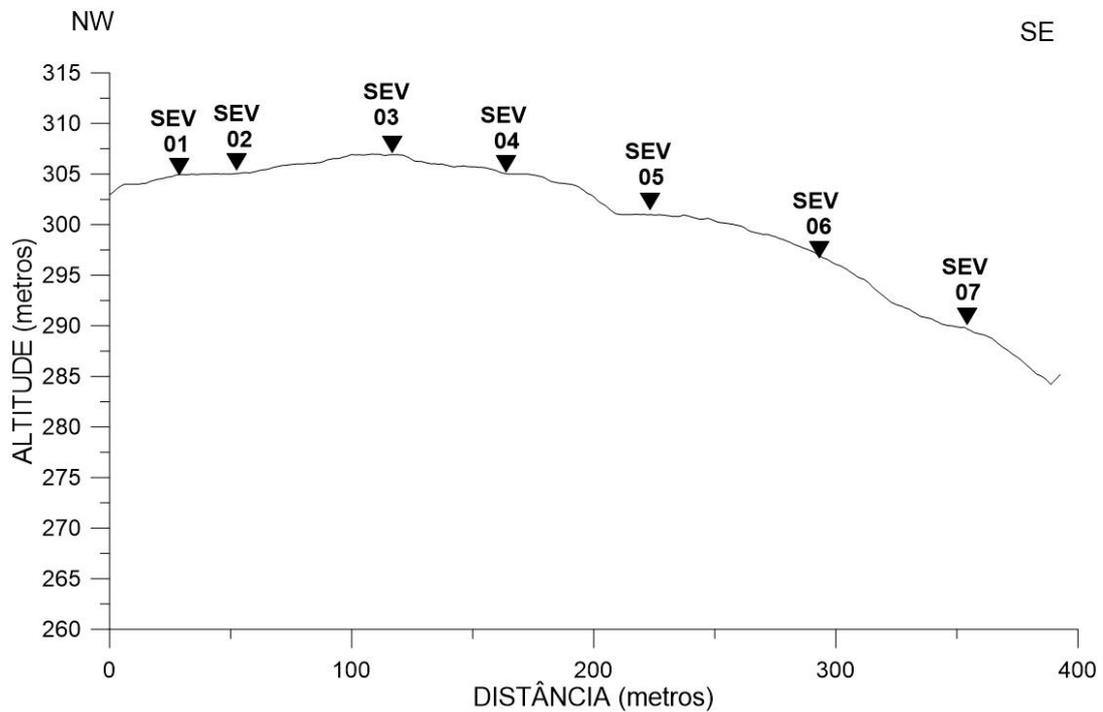
Na aquisição geolétrica foi empregada a técnica de SEV utilizando o arranjo Wenner com o espaçamento máximo $\overline{AB} = 93$ metros, por meio do qual foram realizadas leituras de resistividade elétrica e cargabilidade. Foram realizadas sete SEV (Figura 27), dispostas acima do setor anômalo central do mapa de anomalia de Fator F, verificado na Figura 26. As SEVs estão localizadas numa linha que contempla o perfil topográfico da Figura 28.

Figura 27 – Contornos anômalos aerogamaespectrométricos e levantamentos de eletrorresistividade.



Fonte: autor (2016).

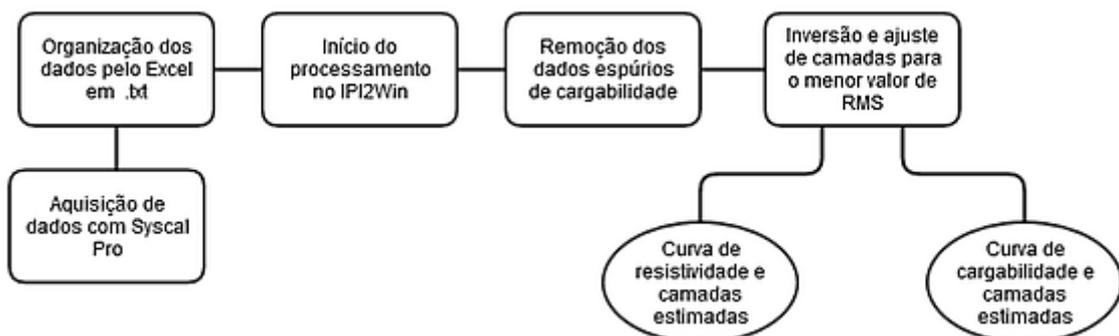
Figura 28 – Localização das SEV's no perfil topográfico.



Fonte: adaptado de Amarillo Gold Corporation (2016).

O equipamento utilizado na aquisição dos dados foi o *Syscal Pro*, fabricado pela *Iris Instruments* – França, o mesmo foi programado com as seguintes configurações: 400 V de tensão transmitida e tempo de leitura 2000 ms. Os dados de SEV foram tabelados no Excel e posteriormente processados no programa IPI2win versão 3.1.2 desenvolvido pela *Moscow State University*. O fluxograma da Figura 29 ilustra de forma mais detalhada como se deu o processamento dos dados geoeletricos.

Figura 29 – Fluxograma de processamento dos dados geoeletricos.



Fonte: autor (2016).

7.2.1 SEV 01

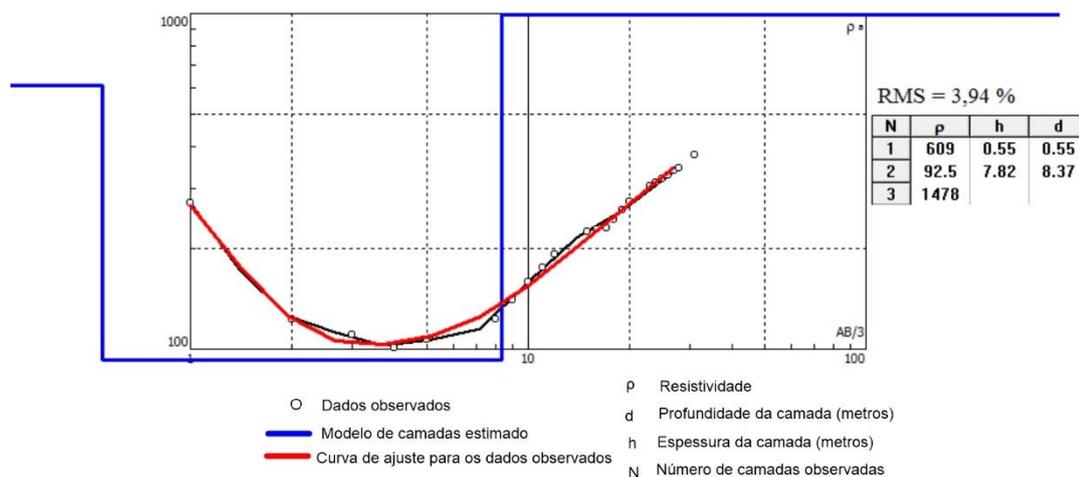
A Tabela 1 demonstra a localização e características da SEV 01. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 30) verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 8 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 31) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 21,1 metros.

Tabela 1 - Localização e especificações da SEV 01.

Coordenadas (UTM)	229752 m E, 6587781 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	93 metros

Fonte: autor (2016).

Figura 30 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 01.

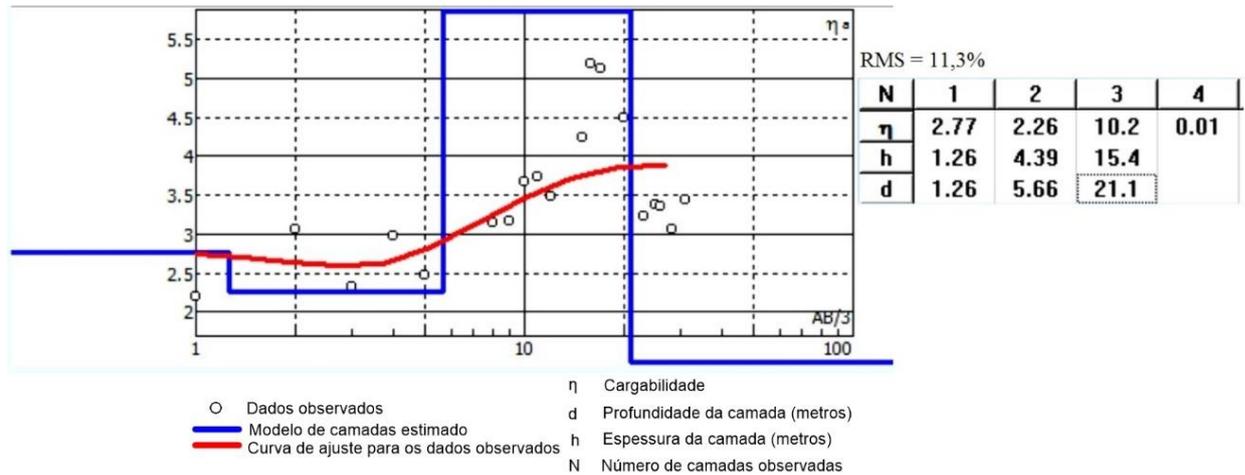


Fonte: autor (2016).

A curva de resistividade elétrica desta SEV pode ser classificada como H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), segundo Orellana (1972). A ρ da SEV 01 determinou três camadas com resistividades variando de 609 a 1478 ohm m. A primeira camada, com resistividade elétrica de 609 ohm m corresponde ao solo seco observado em campo e possui uma espessura de 0,55 m. A segunda camada, menos resistiva, corresponde a solo úmido, com uma espessura de 7,82 m. A terceira camada, com

resistividade elétrica de 1478 ohm m e início a 8,37 m corresponde provavelmente ao topo da rocha menos alterada.

Figura 31 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 01.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 01 apresenta quatro camadas com a η variando entre 0,01 e 10,2 mV/V. A primeira camada possui η igual a 2,77 mV/V e espessura de 1,26 metros; a segunda camada tem η igual a 2,26 mV/V, espessura de 4,39 metros e inicia-se a 5,66 metros de profundidade; a terceira camada tem η igual 10,2 mV/V e segundo Rigoti e Blanco (1985) pode-se considerar este valor como anômalo se associado a um baixo resistivo na mesma profundidade, o que é observado e provavelmente essa camada está associada a presença de pirita juntamente com mineralização aurífera ou não; e por fim, a quarta camada com cargabilidade aparente de 0,01 mV/V e início a 21,1 metros de profundidade.

7.2.2 SEV 02

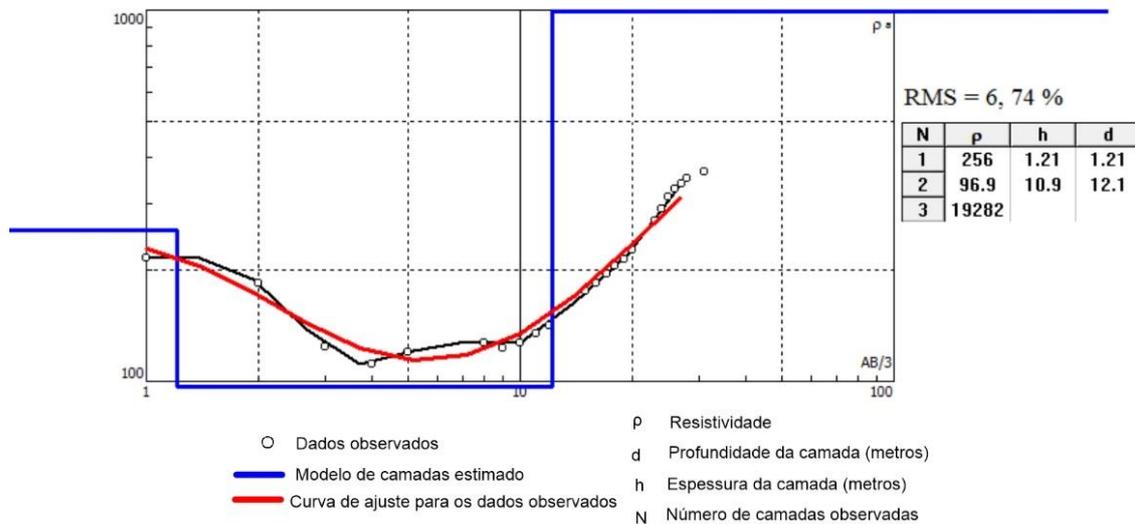
A Tabela 2 demonstra a localização e características da SEV 02. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 32) verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 12 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 33) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 19 metros.

Tabela 2 – Localização e especificações da SEV 02.

Coordenadas (UTM)	229772 m E, 6587770 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	93 metros

Fonte: autor (2016).

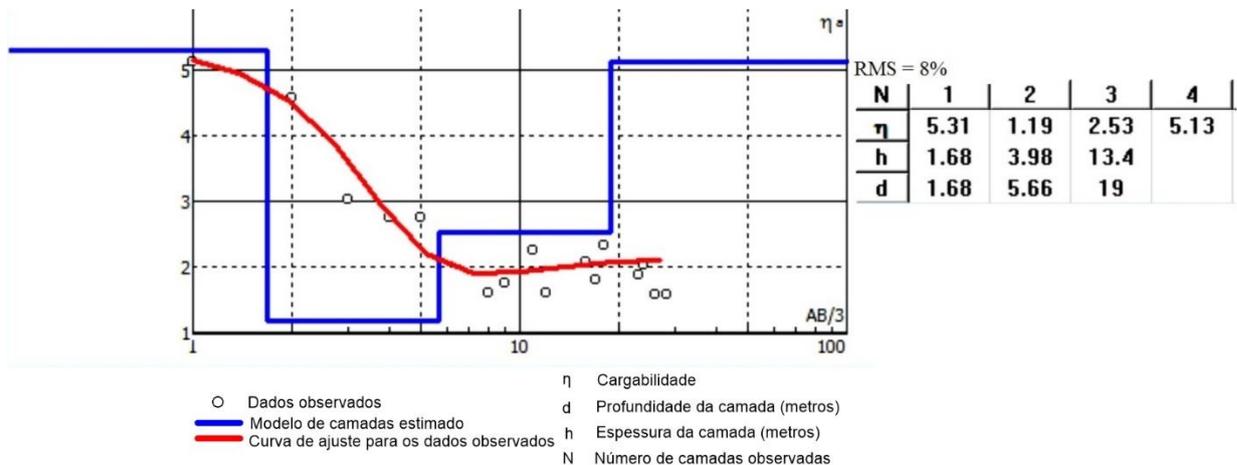
Figura 32 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 02.



Fonte: autor (2016).

A curva desta SEV pode ser classificada como H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), segundo Orellana (1972). A SEV 02 determinou três camadas com resistividades elétricas variando de 96,9 a 19.282 ohm m. A primeira camada, com resistividade elétrica de 256 ohm m corresponde a solo seco e possui uma espessura de 1,21 m, a segunda camada, menos resistiva, corresponde a solo úmido com uma espessura de 10,9 m e a terceira camada, com resistividade de 19.282 ohm m, atingida aos 12,1 m corresponde, provavelmente, ao embasamento rochoso não alterado.

Figura 33 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 02.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 02 apresenta quatro camadas com a η variando entre 1,19 e 5,31 mV/V. A primeira camada possui η igual a 5,31 mV/V e espessura de 1,68 metros; a segunda camada tem η igual a 1,19 mV/V, espessura de 3,98 metros e termina a 5,66 metros de profundidade; a terceira camada tem η_a igual 2,53 mV/V e possui uma espessura de 13,4 metros; por fim, a quarta camada com cargabilidade de 5,13 mV/V e início a 19 metros de profundidade.

7.2.3 SEV 03

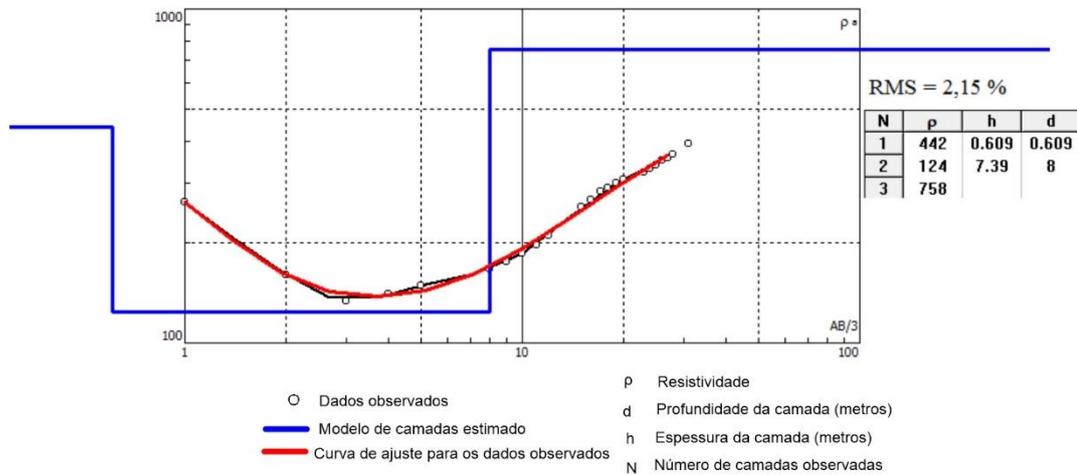
A Tabela 03 demonstra a localização e características da SEV 03. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 34) verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 8 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 35) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 9,2 metros.

Tabela 3 – Localização e especificações da SEV 03.

Coordenadas (UTM)	229823 m E, 6587729 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	93 metros

Fonte: autor (2016).

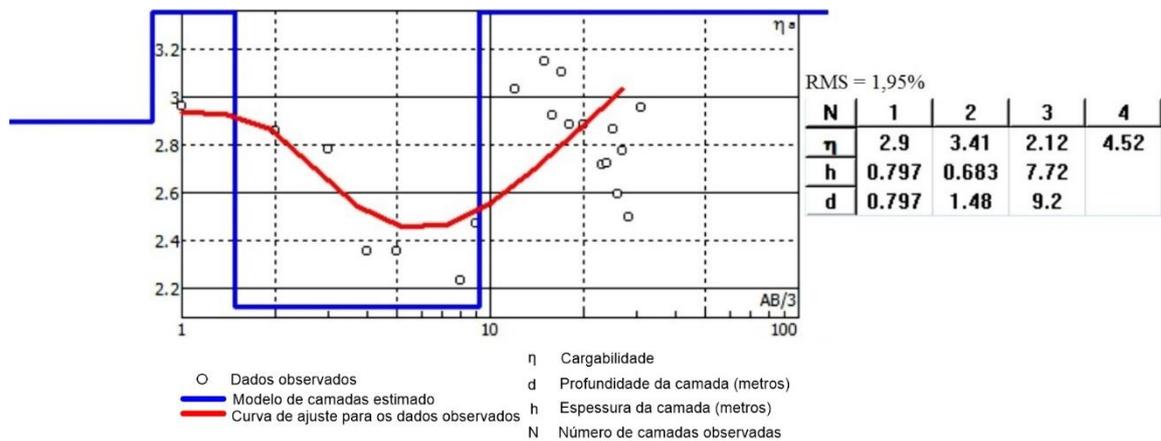
Figura 34 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 03.



Fonte: autor (2016).

A curva de resistividade elétrica desta SEV pode ser classificada como H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), segundo Orellana (1972). A SEV 03 determinou três camadas com resistividades elétricas variando de 124 a 758 ohm m, o que indica a presença de solo seco na primeira camada, solo úmido na segunda camada e rocha bem alterada na terceira camada.

Figura 35 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 03.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 03 apresenta quatro camadas com η variando entre 2,12 e 4,52 mV/V. A primeira camada possui η igual a 2,9 mV/V e espessura de aproximadamente 0,8 metros; a segunda camada tem η igual a 3,41 mV/V, espessura de 0,7 metros aproximadamente e termina a 1,48 metros de profundidade; a terceira camada tem η igual 2,12 mV/V e possui uma espessura de 7,72 metros; por fim, a quarta camada com cargabilidade de 4,52 mV/V e início a 9 metros de profundidade.

7.2.4 SEV 04

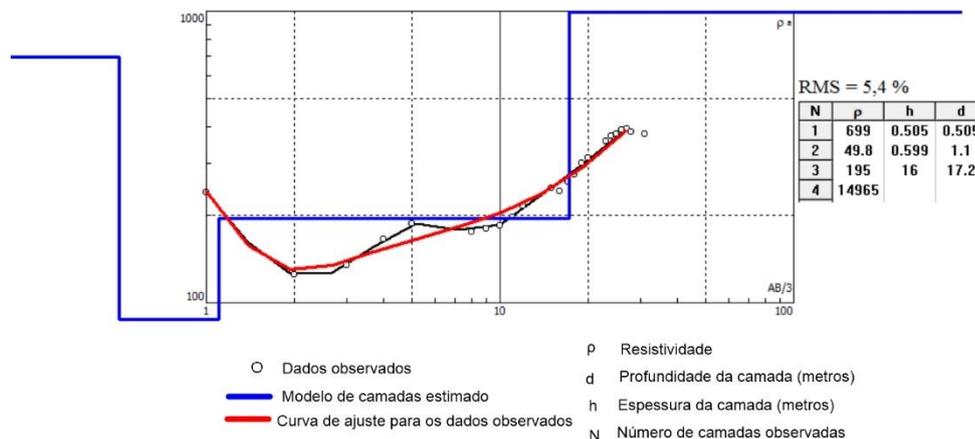
A Tabela 04 demonstra a localização e características da SEV 04. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 36), verificou-se a presença de quatro camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 17,2 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 37) verificou-se a presença de três camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 17,1 metros.

Tabela 4 – Localização e especificações da SEV 04.

Coordenadas (UTM)	229863 m E, 6587710 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	93 metros

Fonte: autor (2016).

Figura 36 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 04.

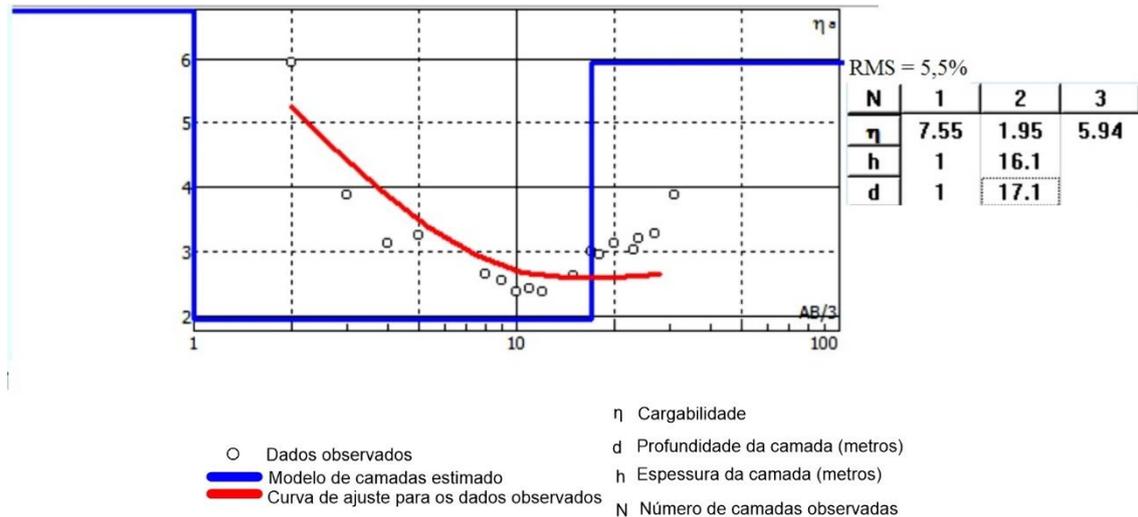


Fonte: autor (2016).

Esta curva pode ser classificada como HA ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$), segundo Orellana (1972). A primeira camada identificada possui uma resistividade de 699 ohm m, indicando, possivelmente, a presença de solo seco com uma espessura de 0,505 m. A segunda camada é a menos resistiva, possui resistividade elétrica de 49,8 ohm m e indica uma possível presença de solo saturado com espessura de 0,599 m. A terceira camada, por possuir uma resistividade baixa

também, possivelmente indica a continuação do solo saturado da camada dois. A quarta camada é a que possui maior valor de resistividade, 14.965 ohm m, e isso pode indicar que esta camada seja o embasamento rochoso.

Figura 37 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 04.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 04 apresenta três camadas com a η variando entre 1,95 e 7,55 mV/V. A primeira camada possui η igual a 7,55 mV/V e espessura de 1 metro; a segunda camada tem η igual a 1,95 mV/V, espessura de 16,1 metros e inicia a 1 metro de profundidade; a terceira camada tem η igual a 5,94 mV/V e se inicia a 17,1 metros de profundidade.

7.2.5 SEV 05

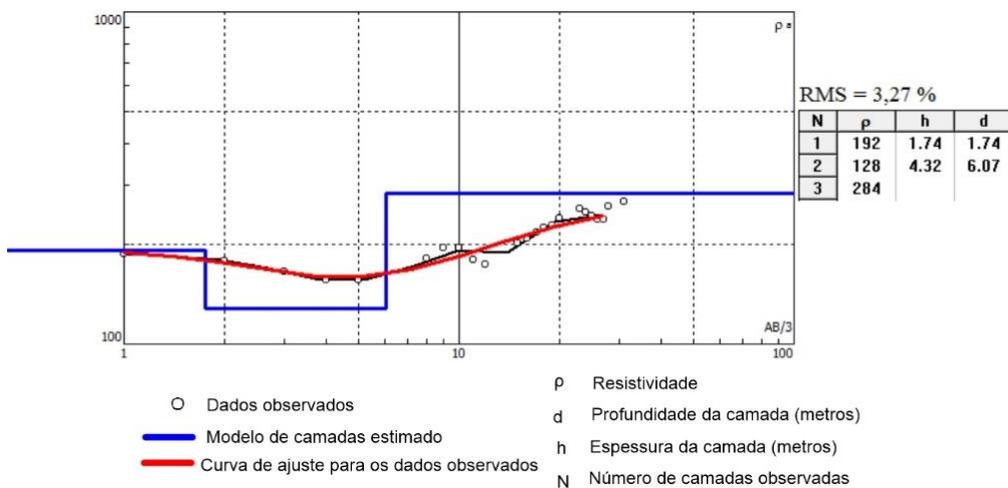
A Tabela 5 demonstra a localização e características da SEV 05. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 38), verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 6 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 39) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 21,1 metros.

Tabela 5 – Localização e especificações da SEV 05.

Coordenadas (UTM)	229913 m E, 6587678 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	93 metros

Fonte: autor (2016).

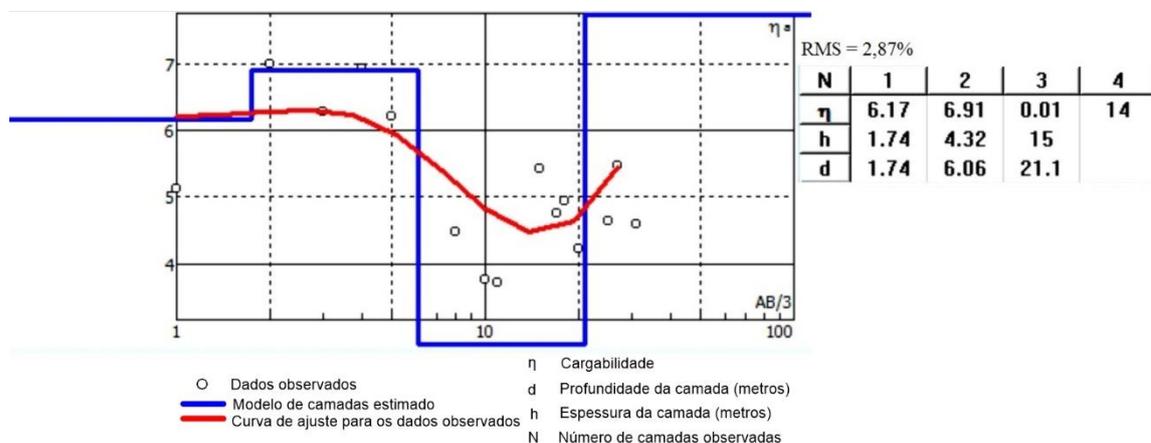
Figura 38 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 05.



Fonte: autor (2016).

A curva desta SEV pode ser classificada como H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), segundo Orellana (1972). A SEV 05 atingiu uma profundidade pequena e as três camadas com resistividades elétricas baixas indicam possivelmente uma diferença causada apenas pelo nível de umidade do solo.

Figura 39 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 05.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 05 apresenta quatro camadas com a η variando entre 0,01 e 14 mV/V. A primeira camada possui η igual a 6,17 mV/V e espessura de 1,74 metros; a segunda camada tem η igual a 6,91 mV/V, espessura de 4,32 metros e termina a 6 metros de profundidade; a terceira camada tem η igual 0,01 mV/V e possui uma espessura de 15 metros; por fim, a quarta camada com cargabilidade de 14 mV/V e início a 19 metros de profundidade.

7.2.6 SEV 06

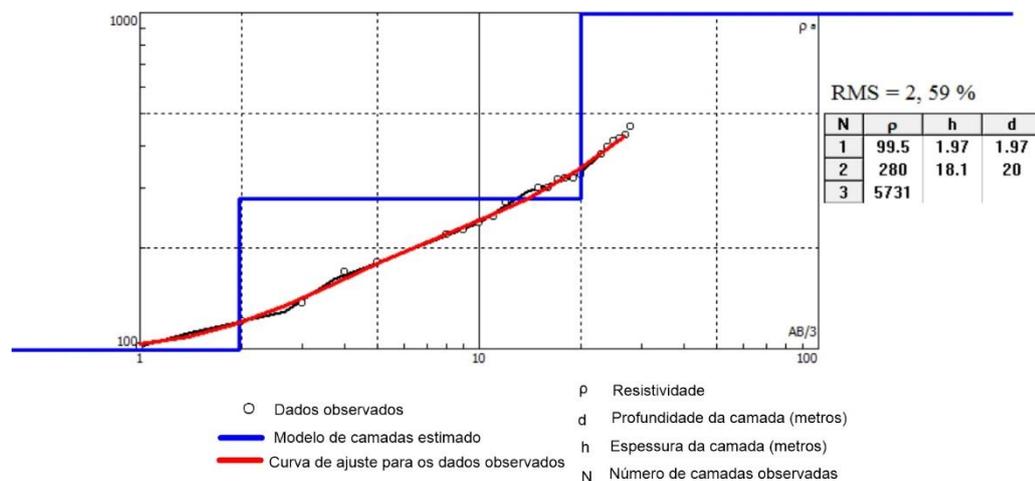
A Tabela 6 demonstra a localização e características da SEV 06. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 40) verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 20 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 41) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 19,9 metros.

Tabela 6 – Localização e especificações da SEV 06.

Coordenadas (UTM)	229969 m E, 6587637 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	84 metros

Fonte: autor (2016).

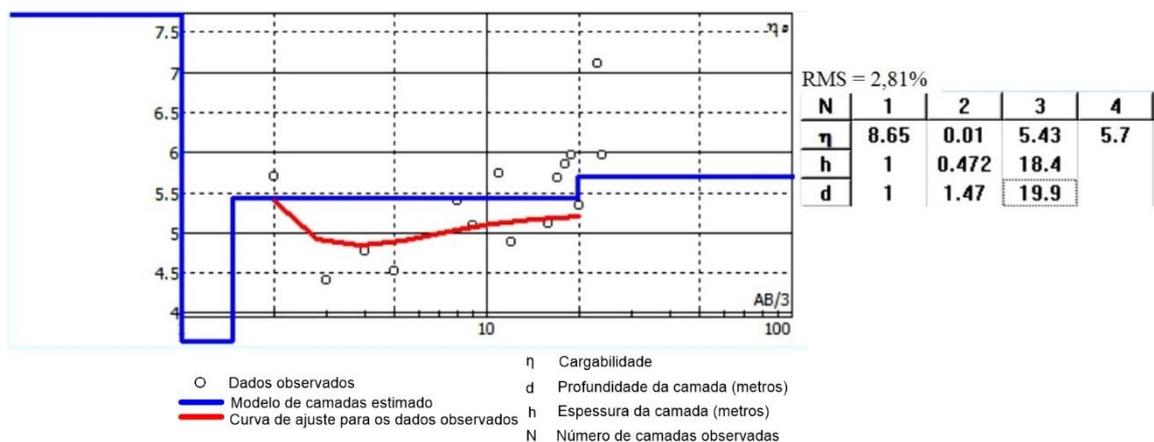
Figura 40 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 06.



Fonte: autor (2016).

A curva desta SEV pode ser classificada como A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), segundo Orellana (1972). A SEV 06 determinou três camadas com resistividades elétricas variando entre 99,5 e 5.731 ohm m. A primeira camada, com resistividade elétrica de 99,5 ohm m, indica possivelmente uma camada de solo úmido e com espessura de 1,97 m. A segunda camada, com resistividade elétrica de 280 ohm m possui uma espessura de 18 m e a terceira camada, com início a 20 m de profundidade, indica possivelmente o começo da rocha sã.

Figura 41 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 06.



Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 06 apresenta quatro camadas com a η variando entre 0,01 e 8,65 mV/V. A primeira camada possui η igual a 8,65 mV/V e espessura de 1 metro; a segunda camada tem η igual a 0,01 mV/V, espessura de 0,43 metros e termina a 1,47 metros de profundidade; a terceira camada tem η igual 5,43 mV/V e possui uma espessura de 18,4 metros; por fim, a quarta camada com cargabilidade de 5,7 mV/V e início a 19,9 metros de profundidade.

7.2.7 SEV 07

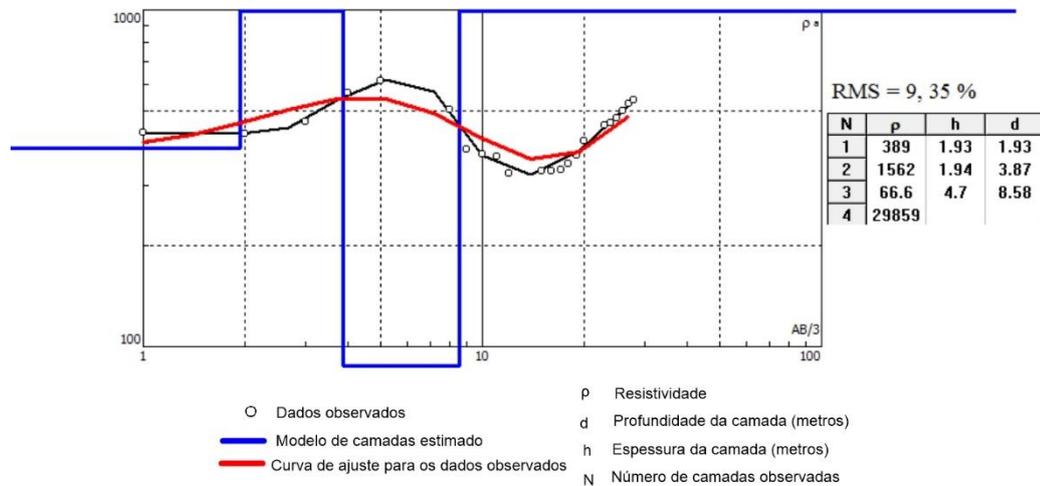
A Tabela 7 demonstra a localização e características da SEV 07. Conforme o modelo estimado para a curva de resistividade elétrica (Figura 42) verificou-se a presença de três camadas e foi atingida uma profundidade máxima de 8 metros, e conforme o modelo de cargabilidade obtido (Figura 43) verificou-se a presença de quatro camadas e atingiu-se uma profundidade máxima de 7,72 metros.

Tabela 7 – Localização e especificações da SEV 07.

Coordenadas (UTM)	230025 m E, 6587609 m N
Zona / Datum	22 J / WGS 84
Arranjo	Wenner
Espaçamento máximo \overline{AB}	87 metros

Fonte: autor (2016).

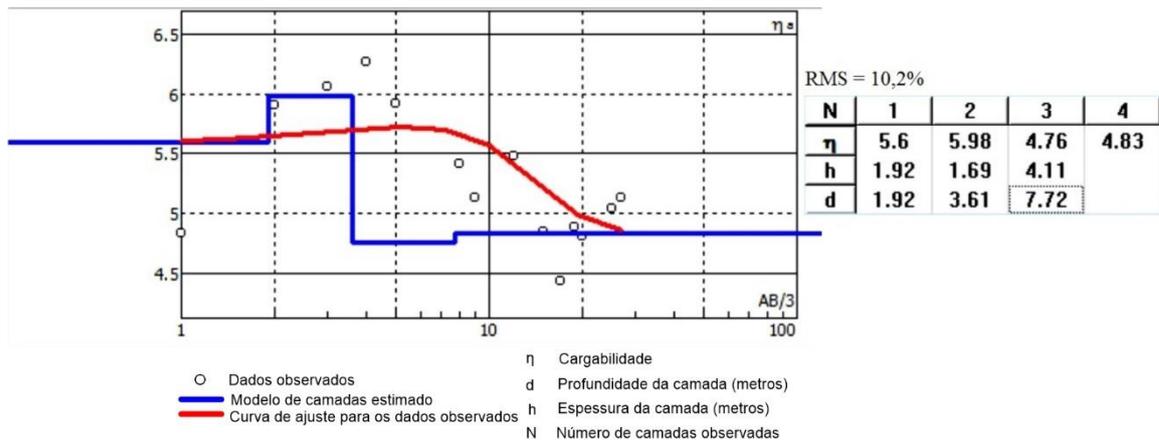
Figura 42 – Modelo estimado para curva de resistividade elétrica da SEV 07.



Fonte: autor (2016).

A curva desta SEV pode ser classificada como KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), segundo Orellana (1972). A primeira camada da SEV 07 é caracterizada por uma resistividade de 389 ohm m devido ao solo seco e uma espessura de 1,93 m. A camada dois caracteriza-se por uma resistividade elétrica elevada de 1562 ohm m, indicando possivelmente a presença de rocha de composição andesítica aflorante, com espessura de 1,94 m. A camada três possui baixa resistividade de 66,6 ohm m e espessura de 4,7 m, indicando possivelmente a presença de água em fraturas. A quarta camada possui uma resistividade de 28.859 ohm m e provavelmente indica o início do embasamento rochoso a uma profundidade de 8,58 m.

Figura 43 – Modelo estimado para curva de cargabilidade da SEV 07.



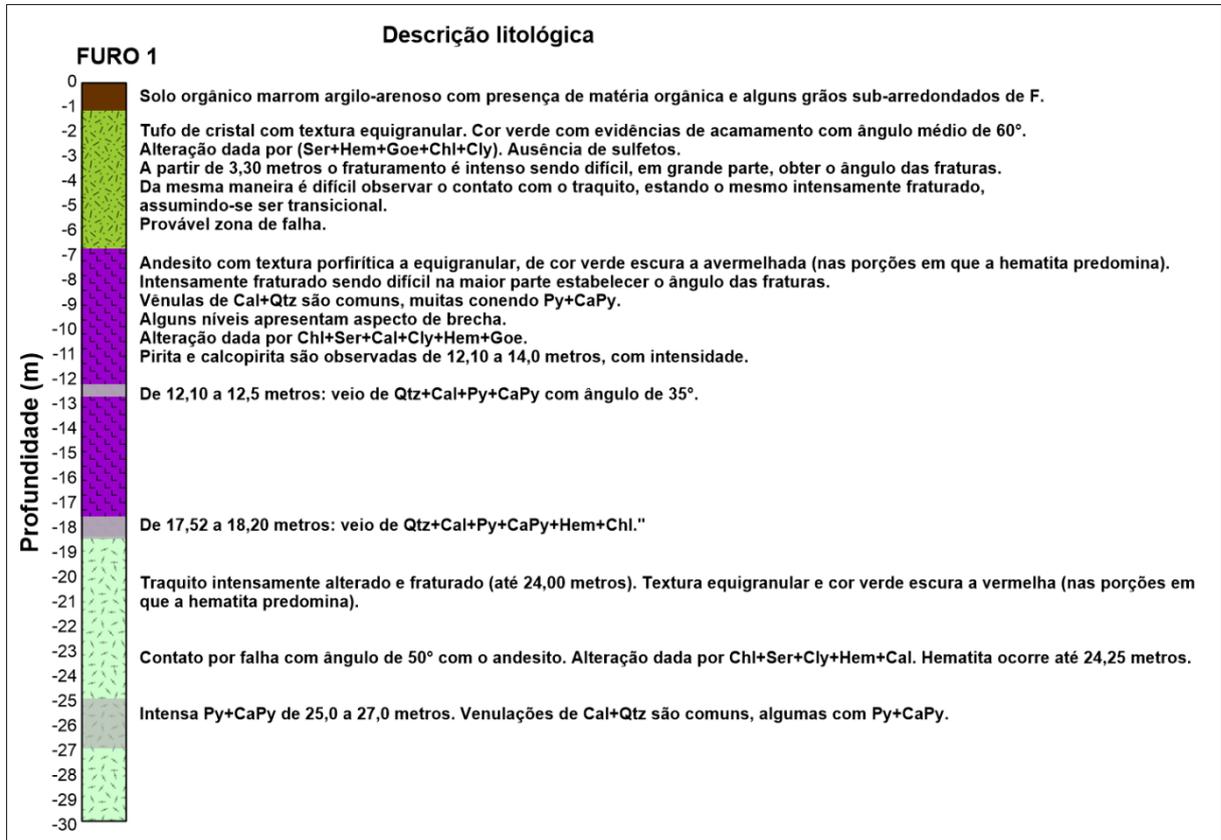
Fonte: autor (2016).

A curva de cargabilidade (η) da SEV 07 apresenta quatro camadas com a η variando entre 4,76 e 5,98 mV/V. A primeira camada possui η igual a 5,6 mV/V e espessura de 1,92 metros; a segunda camada tem η igual a 5,98 mV/V, espessura de 1,69 metros e termina a 3,61 metros de profundidade; a terceira camada tem η igual 4,76 mV/V e possui uma espessura de 4,11 metros; por fim, a quarta camada com cargabilidade de 4,83 mV/V e início a 7,72 metros de profundidade.

7.3 Integração dos dados aerogamaespectrométricos e geolétricos

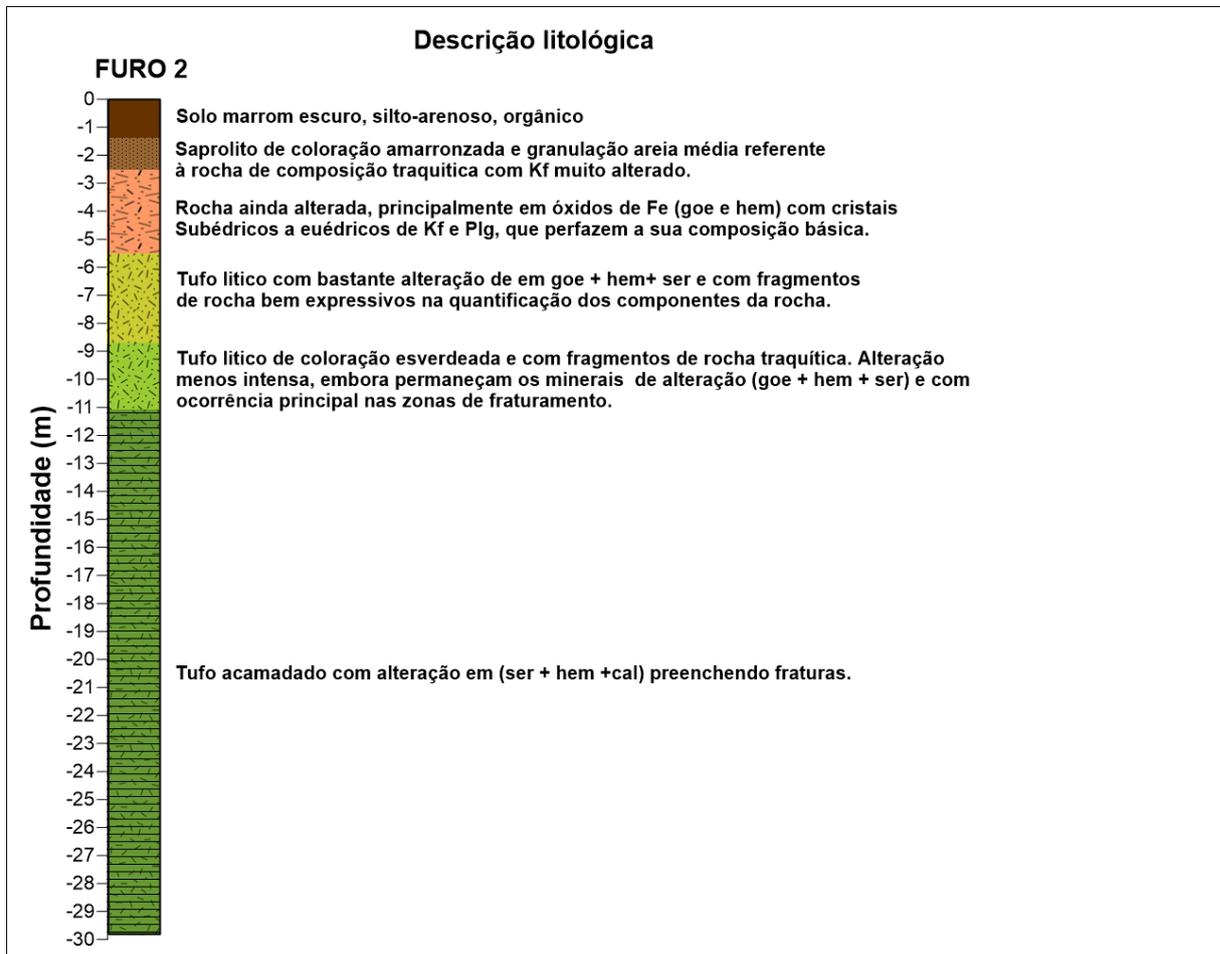
A partir dos mapas aerogamaespectrométricos, das curvas de resistividade e cargabilidade gerados e da interpretação dos furos de sondagem fornecidos pela Amarillo Gold Corporation (Figura 44 e Figura 45), foi possível integrar todos os dados para uma interpretação final (Figuras 46 e 47).

Figura 44 – Descrição litológica do furo 1 realizado pela Amarillo Gold Corporation localizado no mapa da Figura 27.



Fonte: adaptado de Amarillo Gold Corporation (2007).

Figura 45 - Descrição litológica do furo 1 realizado pela Amarillo Gold Corporation localizado no mapa da Figura 27.



Fonte: adaptado de Amarillo Gold Corporation (2007).

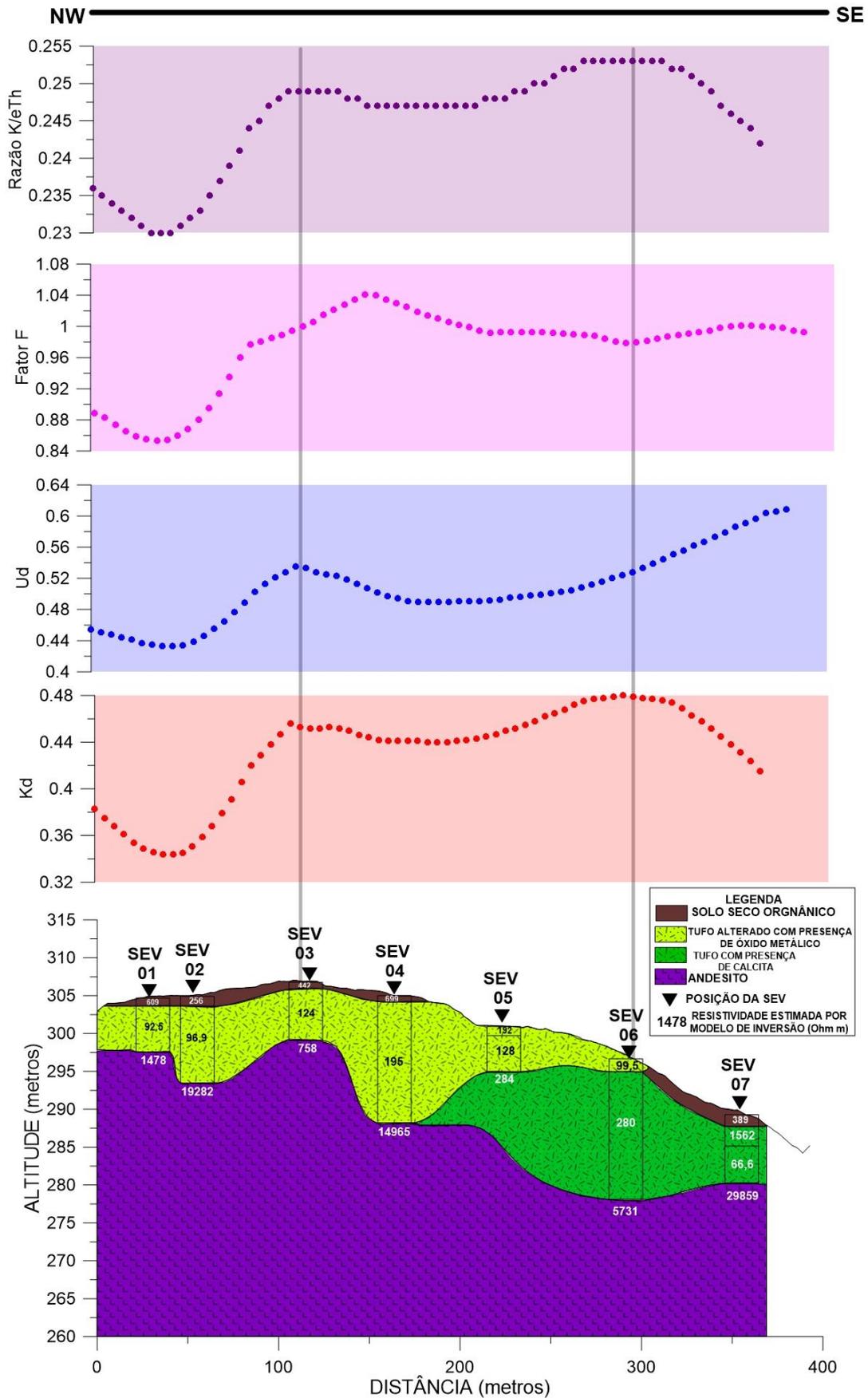
A partir dos mapas aerogeofísicos gerados foi possível gerar os perfis de Kd, Ud, Fator F e razão K/eTh que contemplaram o perfil onde foram realizadas as sete SEV's. Na Figura 46 é possível observar a seção geológica gerada, a mesma foi idealizada a partir da integração de dados de Eletrorresistividade com os furos de sondagem da Amarillo Gold Corporation que se localizam após a SEV 07, conforme a Figura 27.

Nesta integração de dados pode-se observar um pico nos perfis de Kd, Ud, Fator F e razão K/eTh que coincidem com os baixos resistivos localizados na SEV 03, causados provavelmente pela presença de óxidos metálicos no tufo alterado.

Nota-se um segundo pico nos perfis de Kd, Ud, Fator F e razão K/eTh coincidindo com os baixos resistivos localizados na SEV 06, que provavelmente também foram causados pela presença de óxidos metálicos no tufo alterado.

Valores elevados para K_d , U_d , Fator F e K/eTh também podem ser observados entre a SEV 03 e SEV 04, associado a baixas resistividades, que constituem a resposta de uma provável zona fraturada com soerguimento do embasamento.

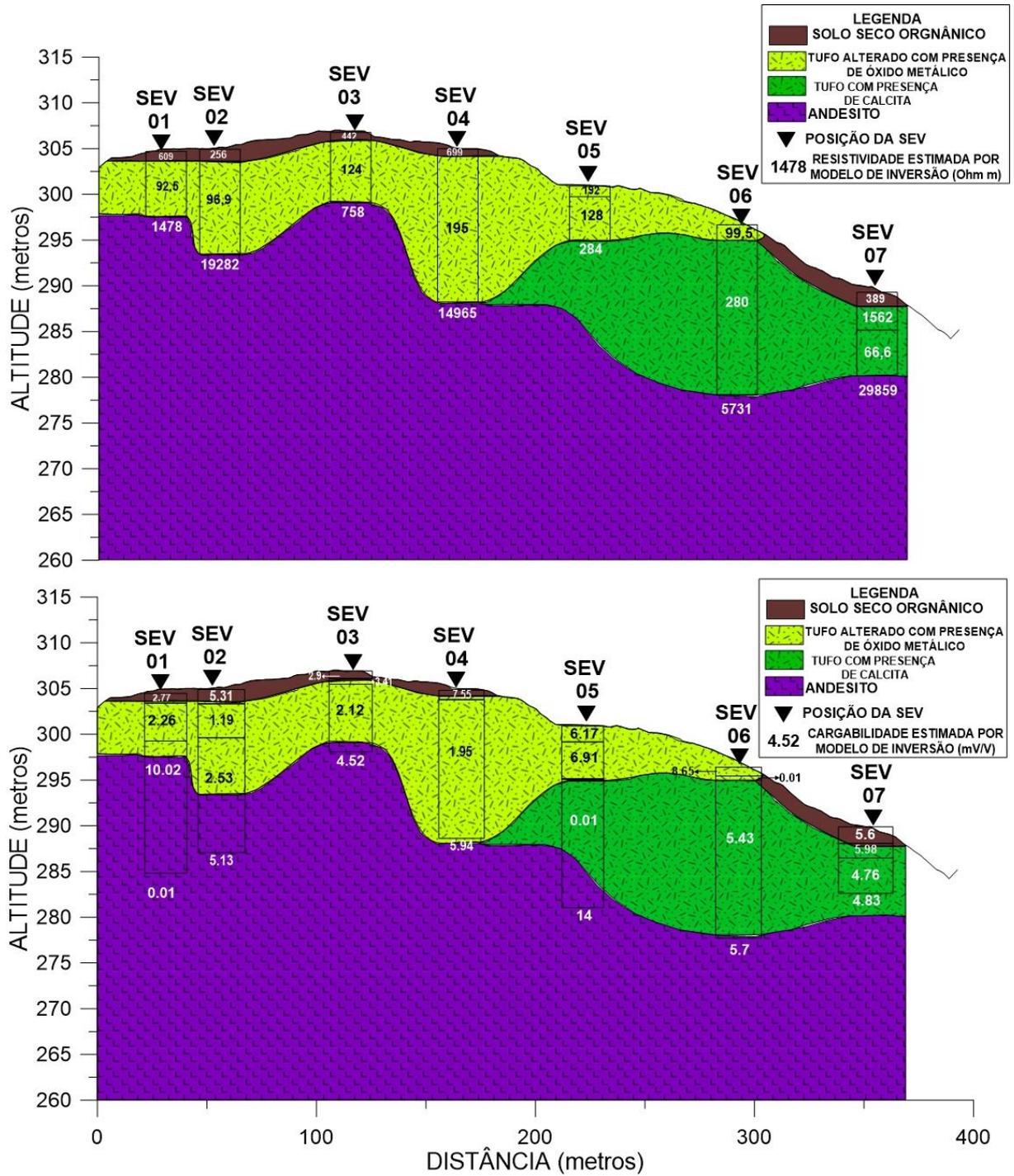
Figura 46 - Integração de dados aerogamaespectrométricos e geolétricos.



Fonte: autor (2016).

Segundo Rigoti e Blanco (1985), valores de cargabilidade considerados anômalos devem ser três vezes o valor de *background* da aquisição. Tendo em vista que os valores de *background* da área estudada são de 1,5 a 2 mV/V, então, os valores de cargabilidade considerados anômalos variam de 4,5 a 6 mV/V. Ainda segundo Rigoti e Blanco (1985), na região de Lavras do Sul, quando há valores anômalos de cargabilidade coincidindo com baixos resistivos é, provavelmente, um indício de presença de pirita com associação aurífera. A partir disso, é possível identificar valores anômalos de cargabilidade e baixo resistivo nas SEV 04, 05 e 06 (Figura 47).

Figura 47 – Integração de dados geoléticos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida.



Fonte: autor (2016).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso apresenta os resultados obtidos através do processamento de dados aerogamaespectrométricos, fornecidos pela Empresa Amarillo Gold Corporation e dados geoeletricos de resistividade e cargabilidade adquiridos em campo.

O objetivo principal do processamento e interpretação dos dados aerogamaespectrométricos de mapear zonas com possíveis alterações hidrotermais, a partir do mapa de Fator F, foi cumprido, e o valor de 1,04 foi a ordem de grandeza do valor anômalo para a área estudada. A partir da interpretação de todos os mapas aerogeofísicos gerados, foi possível também identificar o contraste entre as litologias da área de estudo.

Levantamentos de Eletroresistividade e Polarização Induzida com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical foram realizados em um dos setores anômalos identificados no mapa de Fator F e as curvas de resistividade obtiveram a mesma configuração das curvas geradas por Rigoti e Blanco (1985) com uma ordem de grandeza de resistividade elétrica entre 49 e 28.859 ohm m e de cargabilidade entre 0,01 e 14 mV/V. Onde os baixos resistivos que coincidem com valores anômalos de cargabilidade nas SEV 04, 05 e 06, indicam possivelmente a presença de mineralizações de pirita associadas a ouro.

Por fim, foi elaborado a integração de dados a partir da seção geológica estimada com auxílio dos valores de resistividade e do furo de sondagem da Amarillo Gold Corporation e dos perfis de Kd, Ud, Fator F e K/eTh onde há indícios de possíveis mineralizações nas SEV 03 e 06. Além da identificação de uma provável zona fraturada com soerguimento do embasamento entre as SEV 03 e SEV 04.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, C.A.S. 2016. **Alteração hidrotermal e paragênese mineral da Mina Cerro Rico – Lavras do Sul, RS – Novos dados e interpretações.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul.
- ARYA, A. P. 1974. **Fundamentals of Nuclear Physics.** Boston: Allyn and Bacon Inc.
- BERGER, G.; VELDE, B. 1992. **Chemical parameters controlling the propylitic and argillic alteration process.** European Journal Mineralogy, 4.
- BICCA, M. M. 2013. **Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã – RS.** Tese de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BLUM, M.L.B. 1999. **Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral.** Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.
- BONGIOLO, E.M., 2006. **Integração de dados mineralógicos, isótopos estáveis (O, H) e porosidade de rochas (¹⁴C-PMMA) no reconhecimento da evolução da alteração no sistema hidrotermal de Lavras do Sul/RS, Brasil.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BORBA, A.W.; MISSUZAKI A.M.P.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N.J.; ONOE, A.T.; HARTMANN, L.A. 2008. **U-Pb zircon and ⁴⁰Ar-³⁹Ar K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of Southern Brazil.**
- 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.** Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.
- CHEMALE, F JR. 2000. Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (eds). **Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS, p.3-44.
- DICKSON B.L., SCOTT K.M. 1997. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors.** AGSO J. Australia Geology & Geophysics.
- ELIS, V.R. 1998. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- ELIS, V.R.; MENDONÇA, C. A.; PORSANI, J. L.; STROBINO, E.F. 2008. **O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos.** Revista Brasileira de Geofísica.

FERREIRA, F.J.F.; FRANKE, N.D.; SILVA, F.V.; FORLIN, M. 1998. **Identificação gamaespectrométrica de áreas de alteração hidrotermal na região Peixoto de Azevedo – MT.** In: SBG, Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte, Brasil.

FERREIRA, F. J. F; SOUZA, J. L. 2002. **Gamaespectrometria – Fundamentos, Geoquímica e Distribuição dos Radioelementos em Rochas e Solos.**

FOOTE, R.S. 1968. **Improvement in airborne gamma radiation data analyses for anomalous radiation changes.**

GANDOLFO, O.C.B.; GALLAS, J.D.F. 2007. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade.** Revista Brasileira de Geofísica.

GASTAL, M.C. 1998. **Suite Intrusiva Saibro, RS: Avaliação de um Modelo Petrológico.** Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GASTAL, M. C.; FERREIRA, F. J. F.; CUNHA, J. U.; ESMERIS, C.; KOESTER, E.; RAPOSO, M. I. B.; ROSSETTI, M. M. M. 2015. **Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

GASTAL, M.C.P.; LAFON, J.M. 1998. **Gênese e Evolução dos Granitóides Metaluminosos de Afinidade Alcalina da Porção Oeste do Escudo Sul-RioGrandense: Geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb.** Revista Brasileira de Geociências.

GASTAL, M.C.P.; LAFON, J.M.; FONSECA, F.J; MAGRO, F.U.S; REMUS, M.V.D; SOMMER, C.A. 2006. **Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS. De acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 1: Geologia, Geofísica e Geocronologia ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$).** Revista Brasileira de Geologia.

GNOJEK, I.; PRICHYSTAL, A. 1985. **A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia).**

GRASTY, R. L. 1979. Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration - theory and operational procedures. **Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores.** Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report.

GRASTY, R. L; KOSANKET, K. L.; FOOTES, R. S. 1979. **Fields of view of airborne gamma-ray detectors.** Geophysics, v. 44, n. 8, p. 1447-1457.

HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C. da; REMUS, M.V.D.; LEITE, J.; PHILLIP, R. 1998. **Evolução geotectônica do sul do Brasil e Uruguai entre 3.3Ga e 470 Ma.** In: Congresso Uruguaio de Geologia.

HARTMANN, L.A.; CHEMALE F.Jr.; PHILIPP, R.P., 2007. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano.** In: Iannuzzi, R & Frantz, J.C. (Eds). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 99-123.

HEDENQUIST, J.W.; LOWESTERN, J.B. 1994. **The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits.**

HENRICHES, I.A. 2013. **Caracterização de idade das intrusivas do sistema pórfiro Yrimalito, magmatismo Combia, Colombia.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

IAEA, 2003. **International Energy Agency. Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data.** Viena.

KAUL, P.F.T.; RHEINHEIMER, D. 1974. **Projeto Ouro no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Relatório Final em convênio com CPRM-DNPM, 290 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. **Geofísica de exploração.** São Paulo.

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

LIMA, E.F. 1995. **Petrologia das rochas vulcânicas e hipoabissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS.** Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 338p.

LIMA, E.F.; NARDI, L.V.S. 1998. **The Lavras do Sul shoshonitic association: implications for origin and evolution eoproterozoic shoshonitic magmatism in shouthermost Brazil.** Journal of South American Earth Science.

LOBATO, L. M. 2001. **Processos de Mineralização e Alteração Hidrotermal.** Apostila de estudo, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

LOWELL, J.D.; GUILBERT, J.M. 1970. **Lateral and vertical alteration and mineralization zoning in porphyry ore deposits.** Economic Geology.

McMILLAN, W.J.; PANTELEYEV, A. 1988. **Porphyry copper deposits.** In: Roberts, R.G. e Sheahan, P.A. (eds.). Ore deposit models. Geoscience Canada Reprint Series 3.

MEXIAS, A.S. 1990. **O sistema Hidrotermal Fóssil de Volta Grande, Lavras do Sul/RS.** Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEXIAS, A.S.; BONGIOLO, E.M.; GOMES, M.E.B.; FORMOSO, M.L.L; FRANTZ, J.C. 2007. **Alterações hidrotermais e mineralizações nas rochas da Associação Plutono-Vulcano-Sedimentar da região de Lavras do Sul – RS.** In: 50 anos de Geologia. Instituto de Geologia, Porto Alegre.

MEYER, C.; HEMLEY, J.J. 1967. **Wall rock alteration.** In: Bames, H.L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York.

MINERAR, 1998. **Mapa Geológico da Mina Cerro Rico.** Projeto de Diagnóstico do Potencial Mineral do Município de Lavras do Sul.

- MINTY, B. R. S. 1997. **Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry**. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics.
- MIRANDA, R. R. Prospectors Aerolevantamentos e Sitemas Ltda. 2007. **Levantamento aerogeofísico gradimétrico e gamaespectrométrico**. Projeto Lavras do Sul, Rio Grande do Sul.
- MOON, C.J.; WHATELEY, M.E.G.; EVANS, A.M. 2006. **Introduction to Mineral Exploration Blackwell**, Malden, USA.
- MOREIRA, C.A.; PEREIRA, A.M.; CAVALHEIRO, M.L.D. 2014. **Caracterização geolétrica do gabro Santa Catarina, São Sepé (RS)**, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- MOXHAM, R.M. 1963. **Natural radioactivity in Washington County**, Maryland.
- NETO, L.F; FERREIRA, F.J.F. 2003. **Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na folha Botuverá, SC**. Rev. Bras. Geociências.
- ORELLANA, E. 1972. **Prospeccion Geoelectrica em corriente continua**, Madrid.
- PAIM, P.S.G., CHEMALE, F.Jr.; LOPES, R.C., 2000. **A Bacia do Camaquã**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS.
- PAIM, P.S.G., LOPES, R.C., 2000. **Geologia da Região das Minas do Camaquã**. In: Ronchi, L.H., & Lobato, A.O.C.(Eds.), *Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar*. São Leopoldo, Unisinos.
- PHILIPP, R.P.; MACHADO, R., 2005. **The Late Neoproterozoic Granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, Southern Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences* 19, 461-478.
- PINTO, L.G.R.; OLIVEIRA, C.E.S.; FARIA, B.M.; ANDRADE, J.B.F. 2013. **Estudos Geolétricos (Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico) em Sedimentos Aluvionares do Rio Madeira – Município de Porto Velho-RO**, CPRM, Porto Velho.
- PIRAJNO, F. 1992. **Hydrothermal mineral deposits, principles and fundamental concepts for the exploration geologist**. Springer Verlag.
- PIRES, A.C.B.; HARTHILL, N. 1989. **Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area**. Goiás, Brazil.
- PIRES, A.C.B. 1995. **Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás**. *Revista Brasileira de Geociências*.
- QUADROS, T.F.P. 2000. **Integração de dados em ambiente SIG para mapeamento de favorabilidade mineral de ouro na Ilha Cristalina de Riviera (Uruguai)**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Tese de Doutorado.

- RAMOS, A. R. N. L. 2010. **Dados Gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de Fazenda Nova, porção leste do Arco Magmático de Arenópolis-GO.** Universidade de Brasília.
- REICHEL, J.L. 1998. **Diagnóstico das Potencialidades Minerais do Município de Lavras do Sul.** Relatório Mineropar.
- RIBEIRO, M. 1983. **Informes Sobre a Formação Maricá.** Iheringia. Série Geológica.
- RIGOTI, A.; BLANCO, R.G. 1985. **Levantamento de Polarização Induzida aplicado à prospecção de ouro associado à pirita nos granitos de Lavras do Sul – RS.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- ROBAIN, H.; ALBOUY, Y.; DABAS, M.; DESCLOITRES M.; CAMERLYNCK C.; MECHLER, P.; TABBAGH, A. 1999. **The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys: consequences for 2D imaging.** Journal of Applied Geophysics.
- ROEDDER, E. 1984. **Fluid inclusions.** Mineral Society of America, Washington DC.
- ROJAS, J.N.L 2007. **Caracterização Geológica e Mineral da Mina Cerro Rico – Leste de Lavras do Sul – RS.** Monografia de conclusão de curso, UNISINOS.
- SAUNDERS, D.F.; TERRY, S.A.; THOMPSON, C.K. 1987. **Test of National Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance.**
- TELFORD, W. D.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E., 1990. **Applied Geophysics,** Second Edition. Cambridge University Press.
- UFRGS. 2004. **Mapa Geológico de Parte da Fola de Lavras do Sul – SH-22-Y-A-IV-3.** Trabalho de mapeamento, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- USTRA, A.T. 2008. **Utilização dos Métodos Eletrorresistividade e Polarização Induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru – SP.** Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- VASCONCELOS, R.M.; METELO, M.S.; MOTA, A.C.; GOMES, R.D. 1990. **Geofísica em levantamento geológico.** Rio de Janeiro, DIGEOF-CPRM.
- VINEGAR, H. J.; WAXMANN, M.H. 1984. **Induced polarization of shaly sands Geophysics.**
- WARD, SH. 1990. **Resistivity and Induced Polarization Methods.** In: Ward SH (Ed.). Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. 1997. Application of gamma-rayspectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics,** v. 17, n.2.