

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

NATASSJA CAROLINE COSTA JACUNIAK

**CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIA DE MINÉRIO DE FERRO BANDADO
POR MEIO DE INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA NO COMPLEXO METAMÓRFICO
ARROIO MARMELEIRO – MUNICÍPIO DE BAGÉ-RS.**

**Caçapava do Sul-RS
2015**

NATASSJA CAROLINE COSTA JACUNIAK

**CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIA DE MINÉRIO DE FERRO BANDADO POR
MEIO DE INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA NO COMPLEXO METAMÓRFICO ARROIO
MARMELEIRO – MUNICÍPIO DE BAGÉ-RS.**

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

Orientador: Marco Antonio Fontoura Hansen

Coorientador: José Pedro Rebés Lima

**Caçapava do Sul-RS
2015**

NATASSJA CAROLINE COSTA JACUNIAK

**CARACTERIZAÇÃO DE OCORRÊNCIA DE MINÉRIO DE FERRO BANDADO
POR MEIO DE INTEGRAÇÃO GEOFÍSICA NO COMPLEXO METAMÓRFICO
ARROIO MARMELEIRO – MUNICÍPIO DE BAGÉ-RS.**

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

Trabalho de Conclusão de Curso II defendido em: 01/12/2015
Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof^a. Dr^a. Cristiane Heredia Gomes
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho à Sueli Costa, exemplo de ser humano e por sorte, minha mãe!

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho de conclusão à pessoa mais importante da minha vida, minha mãe Sueli, por todo amor, carinho e entrega durante toda vida e por nunca desistir dos meus sonhos.

A meus avós Jairo e Magdalena por sempre esperarem por mim com o mais gostoso abraço e afeto; a meu tio Elias pelo desprendimento em sempre me ajudar e cuidar; a minha tia Marli pelos puxões de orelha e cuidados; a meu querido primo Gabriel por me fazer sentir tão perto de casa e a meus irmãos Rafael e Alexandre que mesmo distantes estão sempre em meu coração.

De modo geral agradeço a toda minha família pelo apoio ao longo destes cinco anos que mesmo longe, se fizeram tão próximos a mim.

Ao meu orientador Marco Antonio Fontoura Hansen e meu co-orientador José Pedro Rebés Lima pelos auxílios e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

A minha família gaúcha, Angela Beatriz, João Batista, Alice e Kassio Oliveira.

A minha querida amiga Anna Maria pela companhia sincera ao longo desses cinco anos de graduação e pelas noites viradas tentando acabar o trabalho de conclusão. Em especial também a minha amiga Roberta, um exemplo de mãe e menina guerreira.

Ao técnico em Geologia Lenon Ilha sem o qual este trabalho de conclusão não teria caminhado.

Agradeço também de modo especial ao acadêmico de geologia Lucas Martini e seu pai Mauro pela autorização de trabalho na área, pelos auxílios e pelas companhias em campo. A Marta pela maravilhosa recepção e acomodação durante a realização dos campos.

Ao amigo Victor Hugo pelas ajudas, pelos mates e tererês ao longo destes cinco anos, e o amigo Sergio pela companhia nos programas de índio em busca de horas de graduação.

Por fim, agradeço também a todos os meus colegas de graduação, professores e técnicos da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul.

RESUMO

Métodos geofísicos são amplamente empregados na pesquisa dos mais diversos tipos de depósitos minerais, inclusive de minério de ferro. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação e integração dos métodos da eletrorresistividade, magnetometria e susceptibilidade magnética. A integração dos dados visa reconhecer a distribuição e a geometria do corpo mineral pertencente ao Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM), localizado no município de Bagé, RS. O CMAM ocorre como um corpo alongado paralelo ao lineamento de Ibaré, composto por sequências litológicas epimetamórficas de fácies xisto verde a anfibolito dentre as quais constam metapelitos, metapelitos carbonosos e talco xistos associados a rochas carbonáticas, anfibolíticas e metavulcanoclásticas. A compreensão da litologia da região no CMAM foi realizada partindo-se de enfoques geológicos de caracterização petrográfica e estrutural, e geofísicos buscando a delimitação do corpo mineralizado. Foram empregadas análises geofísicas de investigação de subsuperfície, pelo método geoeletrico da eletrorresistividade e pelo método magnetométrico, e também investigações de superfície em solo e rocha pela técnica da susceptibilidade magnética. Os mapas magnetométricos e de susceptibilidade magnética são perfeitamente correlacionáveis, comprovando que a região de estudo apresenta características anômalas que são interpretadas como depósito mineral de minério de ferro bandado. Baixos valores de Susceptibilidade Magnética (0.08 a 5×10^{-3}) foram interpretados como produtos de alteração e solos desenvolvidos e os valores elevados ($>5 \times 10^{-3}$) como sendo representativos de solos com fragmentos ou rochas de interesse. O perfil eletrorresistivo gerado pela técnica do caminhamento elétrico foi empregado com o uso do arranjo Wenner-Schlumberger, buscando a interpretação da espessura média, que foi de aproximadamente 50 metros. O estudo foi realizado em escala de detalhe e, a partir das informações adquiridas, se comprovou a existência desta litologia de interesse ao longo de praticamente toda a área analisada através de integração de dados geofísicos que revelaram as anomalias características. Como produtos finais, foram geradas informações que revelam a vergência estrutural e a petrografia do depósito de ferro em estudo, bem como sua distribuição e geometria ao longo da área de estudo.

Palavras Chave: Formação de Ferro Bandado; Método Elétrico, Método Magnético, Susceptibilidade Magnética.

ABSTRACT

Geophysical methods are widely used in the research of all kinds of mineral deposits, including iron ore. This paper presents the results of the application and integration of methods of resistivity, magnetometry and magnetic susceptibility. Data integration aims to recognize the distribution and geometry of the orebody belonging to Metamorphic Complex Arroio Marmeleiro (CMAM), located in the municipality of Bagé RS. The CMAM occurs as an elongated body parallel to the lineament of Ibaré and consists of metamorphic lithologic sequences of greenschist facies to amphibolite among which included metapelites, carbonaceous metapelites and talc schists associated with carbonate rocks, amphibolitic and metavolcaniclastic. Understanding the lithology of the region in CMAM was performed starting with geological approaches to petrographic and structural, and geophysical seeking the delimitation of the mineralized body. Geophysical analyzes were employed in the subsurface, the geoelectrical method and the magnetometric resistivity method, and also portions outcropping soil and the method of magnetic susceptibility. The magnetometric and magnetic susceptibility maps are perfectly correlated, proving that the region studied is rather anomalous features that are interpreted as mineral deposit ore banded iron. Low magnetic susceptibility values (0.08 to 5×10^{-3}) were interpreted as alteration products and developed soils and high values ($> 5 \times 10^{-3}$) as representative of soil or rocks with fragments of interest. The electrical resistivity profile generated by resistivity technique was employed using the Wenner-Schlumberger array, seeking the interpretation of the average thickness, which was approximately 50 meters. The study was conducted in detail and scale, from the information acquired, proved the existence of the lithology of interest along substantially the whole area analyzed by integrating the geophysical data that showed characteristic faults. As end products, information was generated that reveal the structural control and petrography iron deposit under study, as well as its distribution and geometry along the study area.

Keywords: Banded Iron Formation; Electrical Method, Magnetic Method, Magnetic Susceptibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimentos empregados em campo buscando a caracterização geológico-geofísica da área de estudo.....	8
Figura 2 - Litologias aflorantes na área de estudo. (A) e (B) amostras de Formação Ferrífera Bandada . (C) Quartzo leitoso (de veio).	8
Figura 3 – Configuração dos Eletrodos de Corrente (A) e (B) e dos eletrodos de Potencial (M) e (N) para o arranjo combinado tipo Wenner-Schlumberger.....	11
Figura 4 - Preparação para a aquisição dos dados de eletrorresistividade por caminhamento elétrico em região acidentada (A). Em (B) preparação dos comandos para início da aquisição dos dados pelo arranjo Wenner-Schlumberger.	12
Figura 5- (a) Magnetômetros utilizados na aquisição dos dados magnetométricos. (b) magnetômetro base. (c) e (d) magnetômetro viajante ou Rover.....	15
Figura 6 – Aquisição dos valores de susceptibilidade magnética com uso do susceptímetro KT-10 (a) e (b). Em (c) detalhe do equipamento após leitura, expondo o valor da susceptibilidade aparente em SI ($\times 10^{-3}$).	19
Figura 7 - Mapa de localização das estações de medidas do método magnetométrico e da técnica de Susceptibilidade Magnética. Posicionamento da linha de eletrorresistividade.	20
Figura 8 - Localização da área de estudo no município de Bagé na região centro sul do Rio Grande do Sul.....	21
Figura 9- Mapa Geológico regional da compartimentação tectônica do ESRG com localização da área de estudo.	24
Figura 10 – Mapa geológico da região de interesse localizado no Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro. Linha contínua grossa para os principais lineamentos, linha contínua fina para contatos geológicos.	26
Figura 13 - Amostra de mão da litologia de interesse, apresentando intercalação de bandamento entre camadas ricas em sílica e camadas ricas em minerais de ferro, caracterizando formação ferrífera do tipo bandada. Em detalhe: (A) Bandamentos claros, ricos em minerais visíveis a olho nu de quartzo, dispostos de modo irregular, não contínuo ao longo de toda amostra, (B) Intercalação de bandamentos claros e escuros e (C) evidências de processos de oxidação.	28
Figura 14 – Litologia da área de estudo . (A) e (B) Presença de veios cortando o bandamento principal. Ocorrem em campo, geralmente de modo alterado/oxidado, devido às condições de exposição intempérica que podem ser visualizadas nas fotografias (c) e (D). Presença de goethita e limonita.....	29
Figura 15 –(A) Presença de fraturas preenchidas cortando o bandamento principal da rocha. (B) Detalhe de fratura preenchida, evidenciando processos hidrotermais posteriores.	30
Figura 16 – Estereograma das medidas de Fratura e Foliação.....	31
Figura 17 – Diagrama de rosetas para as medidas de fraturas (A) e Foliação (B).....	31
Figura 18- Perfil Eletrorresistivo por caminhamento elétrico e arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação Geométrica.	32
Figura 20- Histograma de Frequência dos Valores de Susceptibilidade Magnética Aparente (K_{ap}) expondo a grande variação entre o litotipo, seus estados de alteração e o solo local, variando de 0.08 a 223×10^{-3} (SI).	34
Figura 21 – Mapa de distribuição dos valores de Susceptibilidade Magnética ($\times 10^{-3}$ SI).....	36
Figura 23- Mapa Magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico, empregado com a finalidade de facilitar a interpretação geológica com base nos valores de campo magnético. 40	
Figura 24 - Correlação dos métodos geofísicos da susceptibilidade magnética (A) e do método magnetométrico para a amplitude do sinal analítico (B). Os retângulos servem para facilitar a correlação.	42

Figura 25 – Correlação dos resultados de susceptibilidade magnética e dos resultados do método magnetométrico para o campo residual. Os retângulos servem para facilitar a correlação.....	43
Figura 26 – Interpretação do provável corpo mineral de interesse para o método geofísico da Susceptibilidade Magnética.....	44
Figura 27 - Interpretação do provável corpo mineral de interesse para o método geofísico magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico.....	45
Figura 28 – Interpretação para as regiões com potencialidade para depósito de minério de ferro com base em dados geológicos e geofísicos de susceptibilidade magnética e magnetométrico.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASA – Amplitude do Sinal Analítico
A – Eletrodo de injeção de corrente A
B – Eletrodo de injeção de corrente B
BIF – Banded Iron Formation
BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento Nacional
C – Carbono
Ca – Cálcio
CE – Caminhamento Elétrico
CI - Complexo Imbicuí
CMAM – Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro
CMUCM - Complexos Máfico-Ultramáfico Cerro Mantiqueira
D - Declinação magnética
DRX- Difração de raios X
ESRG - Escudo Sul-rio-grandense
Fe – Ferro
FFB - Formações Ferríferas Bandadas
Ga - Giga Anos
H – Hidrogênio
I – Inclinação
i – Intensidade de corrente
IGRF – International Geomagnetic Reference Field
Kap – Susceptibilidade magnética aparente
k - Fator geométrico
K - Susceptibilidade Magnética
M – Eletrodo de medida potencial M
M – Intensidade de magnetização
Ma - Milhões de Anos
Mr - magnetização remanescente
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
N – Eletrodo de medida potencial N
NE – Nordeste
O – Oxigênio

P - Fósforo

S – Enxofre

SEV - Sondagem Elétrica Vertical

Si – Sílica

SW – Sudoeste

Ti – Titânio

USi – Unidade de medida de Susceptibilidade magnética (Siemens)

X – Coordenada de Latitude

Y – Coordenada de Longitude

ZCI - Zona de Cisalhamento de Ibaré

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos

$\Omega.m$ – Ohm. Metro

ρ = resistividade elétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM)	2
2.2	Formações Ferríferas	3
2.3	Susceptibilidade Magnética	4
3.	OBJETIVOS DO TRABALHO	6
3.1	Objetivos Gerais	6
3.2	Objetivos Específicos	6
4.	JUSTIFICATIVA	7
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	7
5.1	Caracterização Geológica	8
5.2	Caracterização Geofísica	9
5.2.1	Método da Eletrorresistividade	9
5.2.1.1	Caminhamento Elétrico	10
5.2.2	Método Magnetométrico	13
5.2.2.1	Campo Magnético Terrestre	13
5.2.2.2	IGRF	13
5.2.2.3	Correções aos dados magnetométricos	14
5.2.2.4	Correção da variação Diurna	14
5.2.2.5	Remoção do IGRF local	15
5.2.3	Técnica da Susceptibilidade Magnética	16
6	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
7	CONTEXTO GEOTECTÔNICO	22
8	GEOLOGIA LOCAL	25
9	RESULTADOS	28
9.2	Petrografia Mesoscópica	28
9.3	Geologia Estrutural	30
9.4	Eletrorresistividade	32
9.5	Susceptibilidade Magnética	34
9.6	Método Magnetométrico	37
9.6.1	Remoção dos valores de IGRF	37
9.6.2	Transformação do Campo Total – Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	39

12. INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS.....	44
13. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	50

1. INTRODUÇÃO

O atual contexto do cenário mundial em relação aos recursos metalogenéticos vem impulsionando a procura por novos jazimentos e ocorrências que viabilizem exploração imediata ou possam constar como reservas futuras. As ferramentas disponíveis para a prospecção mineral incluem métodos diretos, como furo de sondagem, amostragem solo-rocha e análises químicas, e métodos indiretos, que compreendem análise de sensores remotos e os métodos geofísicos. A análise combinada de dados diretos e indiretos auxilia na compreensão e interpretação dos mais variados tipos de depósitos sendo, hoje, indispensável que se busque a integração destes na melhor caracterização dos prováveis depósitos minerais.

O trabalho busca realizar caracterização geológica e geofísica em área sobre o Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) buscando a delimitação das mineralizações de ferro bandado por meio dos métodos geofísicos da eletrorresistividade, da susceptibilidade magnética e da magnetometria. A integração dos dados geológicos e geofísicos foi realizada de modo a melhor caracterizar não só a distribuição do corpo, mas sua espessura média e viabilidade de extração.

A nomenclatura hierárquica litoestratigráfica utilizada da região de interesse acompanhará Camozzato & Lopes (2013), sendo designado por Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM), caracterizado predominantemente por metapelitos e metarenitos, sendo os estratos formados em zonas de elevada profundidade em bacia de margem passiva. Deformações e metamorfismos posteriores ocorrem em condições de baixo a muito baixo grau em decorrência de evento metamórfico orogênico regional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM)

Um dos trabalhos de relevância que caracteriza o Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) foi proposto por (RENNER *et al.*, 2002), que realizou mapeamento geológico visando distinguir os litotipos da sequência supracrustal, por meio de dados de susceptibilidade magnética aparente (K_{ap}). Aflorante no Escudo Sul-rio-grandense, a sequência é composta por micaxistos, anfibolitos, milonitos, filitos carbonosos, quartzitos, mármore e rochas vulcanoclásticas. Os valores de susceptibilidade magnética aparente foram corrigidos em função da rugosidade e das dimensões da superfície analisada e, para cada estação de amostragem foram medidos três valores de K_{ap} . Valores elevados de susceptibilidade magnética aparente, entre 3 e 14 uSI, foram atribuídos a rochas básicas do complexo, devido à presença de minerais ferromagnéticos. Do mesmo modo, valores baixos de K_{ap} ($< 0,5$ uSI), são atribuídos aos veios quartzosos contendo pouca ou nenhuma quantidade de conteúdo ferromagnético. Para os metassedimentos do complexo Marmeleiro foram encontrados valores intermediários de susceptibilidade magnética aparente; expondo que o emprego do método geofísico pode servir como indicativo de contrastes magnéticos bem como distinguir unidades estratigráficas.

A demanda por minério grafitoso, um mineral industrial, tem aumentado significativamente em regiões de maior desenvolvimento seja na forma bruta ou beneficiada. O destaque da grafita se deve à suas propriedades físico-químicas que, caracterizam a mesma como um importante componente em motores e condutores de calor, lubrificantes sólidos, tintas, entre outros. O estudo realizado por Oliveira *et al.*, (2003) busca o conhecimento do potencial metalogenético da região sul em relação ao conteúdo de mineral grafitoso nos filitos carbonosos pertencentes ao Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM), baseando-se no auxílio dos dados isotópicos de Carbono. Processos metamórficos são conhecidos por transformar a matéria rica em carbono em grafita, metano e dióxido de carbono, por meio de degradação térmica, que promove a remoção de C^{12} , resultando em material carbonoso dito residual enriquecido em C^{13} . No total, foram analisadas 13 amostras carbonosas, quanto a seu conteúdo de carbono total e $\delta^{13}C$, coletadas em malha de 350 x 500 metros ao longo de três perfis dispostos transversalmente à estruturação das camadas. O conteúdo carbonoso foi calcinado em atmosfera oxidante e o CO_2 , produto da combustão da amostra, foi analisado para isótopos de carbono por meio da espectrometria de massa, assim como a cristalinidade

deste material, que foi investigada por difração de raios X (DRX) pelo método do pó não orientado. Averiguou-se que os teores de carbono das rochas estudadas, variaram de 0,25 a 6,16% em rocha total e, comparando estes resultados com valores referenciais obteve-se a conclusão de que os litotipos estudados pertencentes ao Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) são relativamente enriquecidas em carbono, sendo seus teores comparáveis a regiões já exploradas de minério grafitoso no hemisfério norte e em algumas ocorrências brasileiras.

2.2 Formações Ferríferas

As formações ferríferas atualmente conhecidas, geralmente denominadas de formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formation – BIF*), são únicas quanto as suas potencialidades minerais e, geralmente datam do Arqueano e do Paleoproterozóico. São exceções os depósitos ferríferos do final do Neoproterozóico, associado às sucessões sedimentares com alguma influencia glacial, como ocorre no noroeste canadense no Grupo Rapitan, o Supergrupo Damara na Namíbia e o Grupo Jacadigo no Maciço de Urucum, Brasil (SATO, 2011).

Segundo Dymek e Klein (1988) mais antigas formações ferríferas conhecidas encontram-se na Groelândia e datam de aproximadamente 3.8 Ga relacionadas a centros cratônicos arqueanos. Também datam do Arqueano depósitos ferríferos associados a sequencias greenstone belts, entre as quais se inserem o Grupo Nova Lima (DOOR e VAN, 1969) e o grupo Lavapés (FERNANDES, CARVALHO e FERNANDES, 2004) em Minas Gerais.

Em sua tese de mestrado, Giacomeli (2011) caracteriza de modo detalhado e completo todas as peculiaridades das formações ferríferas bandadas de Piumhi, pertencentes ao Grupo Lavapés em Minas Gerais, onde afloram interdigitadas em sucessão de metaconglomerados oligomíticos, metagrauvacas finas e quartzo-muscovita xistos. Como o objetivo do trabalho de Giacomeli (2011) consistia na caracterização petrográfica, visando a interpretação do ambiente formador, e as viabilidades econômicas após testes de beneficiamento do depósito, foram apresentadas inúmeras descrições petrográficas caracterizando as mesmas, e, com os dados obtidos, foi possível caracterizar o ambiente formador; sendo este um meio sedimentar de alta energia, do tipo continental a transicional grandando a bacias marinhas restritas, dentro das quais pulsos de sedimentação progradante e retrogradante se sucediam. Nas análises de lâminas realizadas, os minerais opacos pertencentes a todas as lâminas, correspondem ao

mineral hematita do tipo granular e especular, magnetita e martita, ambas ocorrendo em bandas de espessura submilimétrica a centimétrica intercaladas a bandas de quartzo recristalizado e muscovita. Interpretando as lâminas, o autor conseguiu caracterizar o evento metamórfico ao qual a litologia bandada foi exposta, de baixo grau, em fácies xisto verde, sendo que em maioria das amostras observou processos de martitização, em estágios avançados de transformação mineralógica revelando a influência de fluidos metamórficos tardios de natureza oxidante. Foram realizados também pelo autor, testes de beneficiamento para o minério da localidade, onde se observaram se seria viável a separação minério de ferro do estéril, a sílica, sendo obtido resultado significativo uma vez que os minérios de mais alto teor encontrados na forma de bandas maciças compensam a pouca sílica que não foi possível separar por processos de beneficiamento em laboratório.

2.3 Susceptibilidade Magnética

Trabalhos que empregam a técnica da susceptibilidade magnética na caracterização de anomalias magnéticas são comumente utilizados, pela fácil aquisição dos dados e pela boa resposta obtida. Quando se tratam de litotipos que concentram quantidades de minerais ferromagnéticos o uso da técnica da susceptibilidade magnética é indispensável.

Lima *et al.* (2000) empregaram a técnica na detecção de regiões com anomalias magnéticas presentes no batólito granítico de Teixeira, na província Borborema, nordeste do país. O estudo da susceptibilidade no plúton revelou que, de modo geral, apresenta-se um comportamento paramagnético, ou seja, controlado por minerais máficos, biotita e anfibólio. Por se tratar de um batólito, ocorrem regiões afetadas por falhas e fraturas, decorrentes da ascensão do mesmo e, é nestas regiões estruturais em que o autor observou fortes anomalias de suscetibilidade, chegando a atingir 10^{-2} SI. Por meio de curvas termomagnéticas e de histerese, foi possível verificar que o mineral responsável por este relativo aumento da suscetibilidade é a magnetita. Análises ao microscópio eletrônico de varredura apontou que a magnetita responsável pela anomalia encontra-se associada a outros minerais característicos de anomalias, a hematita e a barita. Foram investigadas 138 estações por todo batólito e, as medidas realizadas em rocha sã, não alterada e sem presença de vênulas, fraturas ou zonas de alteração hidrotermal, buscando uma maior qualidade dos dados. O objetivo do trabalho consiste em investigar a origem das anomalias e lineamentos magnéticos do batólito por meio da suscetibilidade magnética que, só foi possível devido à homogeneidade litológica e textural, que possibilitou o controle das variações mineralógicas que determinam a

distribuição regional da suscetibilidade magnética e, por sua vez, a origem da variação e amplitude das anomalias. Em suas conclusões, os autores reforçam que a magnetita presente no batólito tem sua origem relacionada a processos hidrotermais tardios gerados já em regimes crustais, mais rasos, devido à relação das anomalias com as falhas e fraturas de soerguimento. Foi verificado por análises químicas que os processos metassomáticos propiciaram a fuga dos álcalis e o enriquecimento de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$, CaO , TiO_2 e P_2O_5 , como já sugeriam outros autores. Mais especificamente, o trabalho apontou a reação de formação da magnetita a partir da desestabilização de biotitas ricas em ferro (Anita) em condições oxidantes, dos fluidos mineralizantes, gerando feldspatos alcalinos e magnetita.

Fernandes *et al.*, (2001) utilizaram o método da suscetibilidade magnética na Mina Elias Zeca, no município de Vila Palma, no Rio Grande do Sul, com o objetivo de discriminar às litologias baseado apenas em suas características magnéticas. Foram realizadas medidas de suscetibilidade aparente utilizando-se do aparelho Kappameter KT3, a cada 15 metros ao longo das bancadas da mina, sendo realizadas três medidas de Kap, e posterior coleta de amostras para os estudos de petrografia. Os resultados de Kap, quando lançados em histogramas revelaram grande variação de litotipos, com valores entre 0,1 a 215×10^{-3} uSI, mais especificamente descrevendo dois conjuntos de rochas, mármore e xistos contendo veios de carbonatos com suscetibilidade aparente variando entre 0,1 e $1,7 \times 10^{-3}$ uSI e xistos sulfetados com valores de Kap entre 0,5 e 215×10^{-3} uSI, valor um tanto baixo, que segundo os autores poderia estar associado à pirita e calcopirita, minerais não magnéticos. Os valores de suscetibilidade aparente altos, encontrados nos mármore e xistos podem estar vinculados à presença de Pirrotita e, mais provavelmente a magnetita (ferrimagnética). Estudos de suscetibilidade magnética em função do conteúdo mineral, em empreendimentos mineiros e, futuros empreendimentos faz se extremamente útil e com boa resposta. Em litotipos marcados pela presença de minerais magnéticos, como o da área de estudo é de primordial importância.

2.4 Método Magnetométrico

O método magnetométrico vem sendo amplamente utilizado na delimitação de feições anômalas que correspondam a corpos minerais. Para os depósitos de ferro, a magnetometria é vista como de essencial aplicação.

Trabalhos como o realizado por Assis (2013) retratam bem esta realidade. Foram utilizadas as técnicas geofísicas da aeromagnetometria e aerogravimetria. O uso do método gravimétrico foi empregado na província mineral de Carajás na diferenciação de corpos com

elevada diferença de densidade, como se espera para corpos ricos em ferro. A escolha pelo método magnetométrico, mesmo que para dados aéreos, permitiu a identificação de feições anômalas magnéticas e estruturas interessantes sob o ponto de vista prospectivo do minério de ferro, como propõe o presente trabalho. Partindo-se das interpretações realizadas para os dados, o autor descreve que os corpos mineralizados com alto teor de ferro não apresentaram condições de serem mapeados a partir da amplitude do sinal analítico, por serem ricos em hematita e pobres em magnetita. O autor, através de técnicas de processamento e realces aplicados usuais ao meio prospectivo do setor mineral, conseguiu definir critérios suficientes para uma avaliação preliminar do depósito de minério de ferro e delinear a envoltória da formação baseada nas informações geofísicas, como o presente trabalho também propõe.

Outro importante trabalho baseado em interpretações do método magnetométrico para formações ferríferas foi realizado por Davino (2015) que buscou compreender os valores magnéticos anômalos das formações ferríferas da região mineira. Foram identificados três padrões bem distintos de anomalias e estes foram vinculadas a respectivos depósitos minerais locais. Foram encontrados depósitos ricos em ferro itabiríticos, maguemíticos e de canga com base em análises geoquímicas. As interpretações das anomalias magnetométricas em função destas análises possibilitaram concluir que o tipo mineral rico em ferro é determinante na resposta magnética da litologia.

3. OBJETIVOS DO TRABALHO

3.1 Objetivos Gerais

- Caracterizar e delinear a ocorrência de ferro em escala local utilizando mapeamento geológico e os métodos geofísicos de eletrorresistividade, magnetometria e a técnica de susceptibilidade magnética.

3.2 Objetivos Específicos

- Reconhecer o corpo mineralizado com minério de ferro em superfície pela coleta de amostras e dados estruturais;

- Identificar e delinear as anomalias associadas às rochas mineralizadas em superfície e subsuperfície para cada um dos métodos geofísicos empregados;
- Caracterizar a mineralização através da integração dos dados geológicos-geofísicos.

4. JUSTIFICATIVA

Justifica-se a escolha da área, dos métodos e da técnica utilizada pela escassa aplicação de métodos geofísicos no Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) na região de estudo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

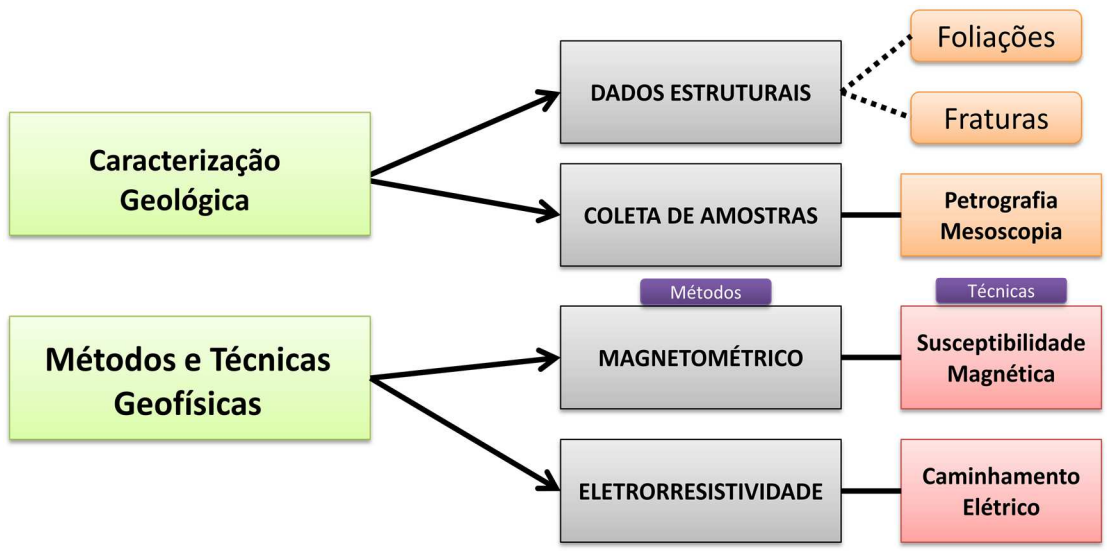
O estudo de um depósito mineral com potencialidade econômica envolve uma ampla estratégia metodológica que objetiva suportar todo o processo. O emprego das mais variadas técnicas de atuação diante do depósito alvo, onde se objetiva reconhecer alguma viabilidade econômica ou simplesmente a caracterização do corpo mineralizado, são de fundamental importância na qualidade dos dados finais. A determinação do potencial de um possível depósito mineral geralmente está amparada por uma gama de procedimentos que buscam qualificação e quantificação do mesmo.

O reconhecimento geológico de detalhe é fundamental na qualidade do resultado final sobre as viabilidades de um depósito; é em campo que os dados petrográficos, estruturais, pedológicos, e geofísicos são coletados e, são a partir destes dados que, todas as futuras interpretações se realizam, visando à delimitação de alvos.

Após a realização de todos os procedimentos de reconhecimento da área e de todas as análises geológicas e geofísicas é esperado que se delimite uma área alvo onde se verifiquem características especiais de interesse.

O trabalho busca a partir da integração de dados geofísicos e geológicos a caracterização e delimitação de provável depósito e/ou mineralização de ferro (Figura 1). Dentre os métodos geofísicos que serão utilizados na campanha de detalhamento do local estão o método da eletrorresistividade, da magnetometria e da susceptibilidade magnética.

Figura 1 – Procedimentos empregados em campo buscando a caracterização geológico-geofísica da área de estudo.



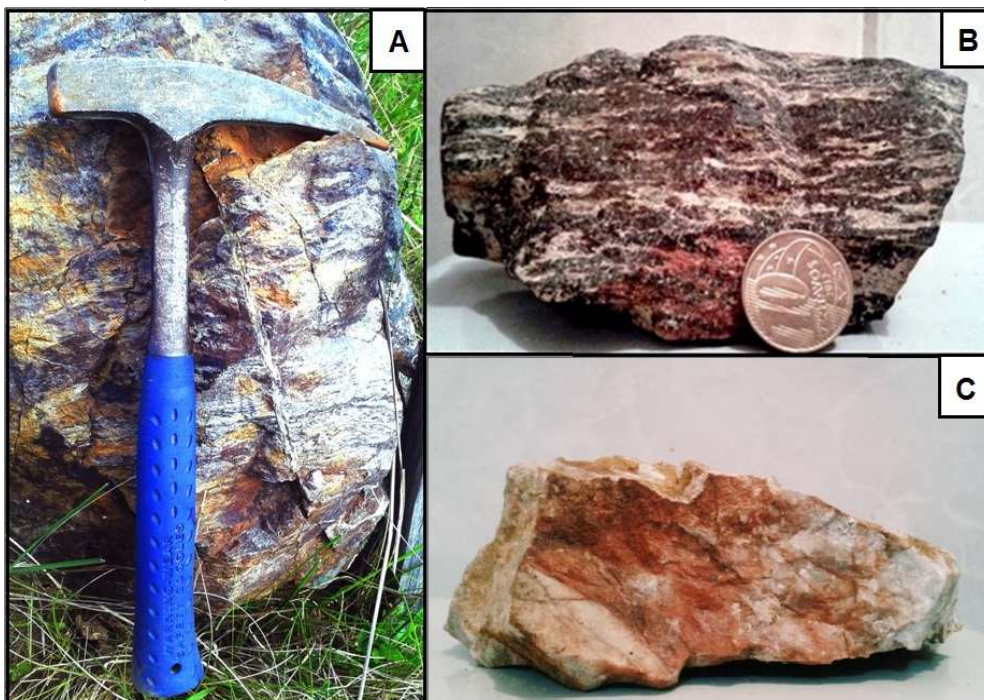
(Microsoft Word)

5.1 Caracterização Geológica

5.1.1 Coleta de Amostra

Foram coletadas amostras ao longo de toda a área de estudo onde ocorriam afloramentos para estudos petrográficos. As duas litologias que ocorrem na área de estudo são as formações ferríferas bandadas e quartzos de veio (Figura 2).

Figura 2 - Litologias aflorantes na área de estudo. (A) e (B) amostras de Formação Ferrífera Bandada . (C) Quartzos leitosos (de veio).



5.1.2 Geologia Estrutural

Foram coletados em campo, dados estruturais medidos com o uso da bússola Tipo Brunton para foliações e fraturas objetivando averiguar o controle estrutural da a região de estudo. A bússola tipo Brunton foi fornecida pela Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, RS.

5.2 Caracterização Geofísica

5.2.1 Método da Eletrorresistividade

Segundo KEAREY, BROOKS e HILL (2002), o método da resistividade elétrica baseia-se no estudo da capacidade que os materiais têm de resistir ao fluxo de corrente elétrica, propriedade física designada por resistividade e medida em Ohm.metro ($\Omega.m$).

Um dos métodos ditos geométricos, a eletrorresistividade emprega correntes elétricas artificiais no terreno de investigação através de dois eletrodos (A e B) buscando medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo o calculo da resistividade real ou aparente em subsuperfície (KEAREY, BROOKS e HILL, 2002).

A resistividade elétrica dos terrenos é uma característica intimamente ligada ao tipo, natureza e estado de alteração das formações geológicas, assim como à presença de água subterrânea, elementos químicos naturais e contaminantes estranhos ao meio.

Para um dispositivo de quatro eletrodos, a resistividade é assumida como constante e é realizado seu cálculo através da expressão:

$$\rho = \frac{k \cdot \Delta V}{i} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

ρ = resistividade elétrica (ohm. m).

k = fator geométrico (m)

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N (mV)

i = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA)

O fator geométrico (K) utilizado na equação 1 (um) depende essencialmente da geometria dos arranjos utilizados e pode ser calculado através da formula geral (Equação 2):

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} \quad (\text{Equação 2})$$

Em campo, duas são as principais técnicas que empregam o método da eletrorresistividade, denominadas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE). A principal diferença entre as duas técnicas está no centro do arranjo ABMN, que corresponde ao centro de investigação.

Enquanto na Sondagem Elétrica vertical (SEV) o centro do arranjo de eletrodos permanece fixo e o propósito da investigação é uma interpretação vertical em subsuperfície, a técnica do Caminhamento Elétrico (CE) objetiva investigações de variação lateral a uma ou mais profundidades, e tem o centro do arranjo AMNB móvel. Na realização deste trabalho foi empregada apenas a técnica do caminhamento elétrico.

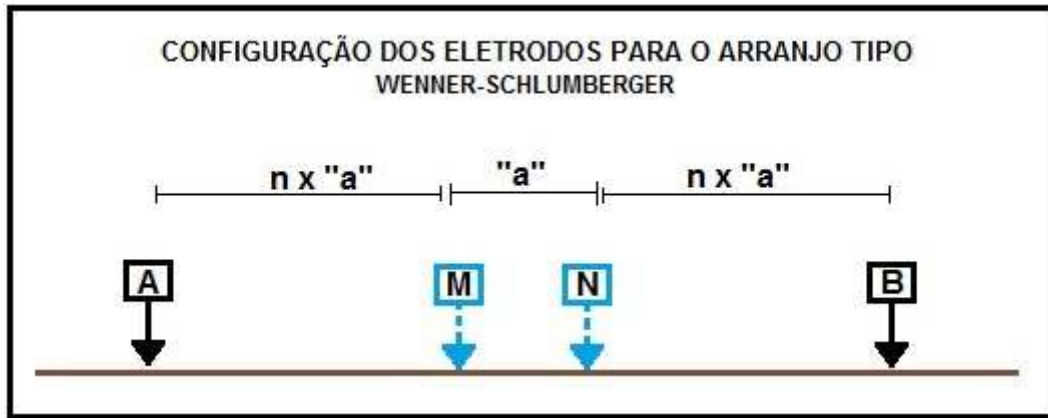
5.2.1.1 Caminhamento Elétrico

A técnica do Caminhamento Elétrico baseia-se na análise e interpretação da resistividade elétrica, obtida a partir de medidas em superfície, investigando variações horizontais a uma ou mais profundidades determinadas (BRAGA, 1997). Desloca-se ao longo da superfície do terreno, o centro dos arranjos de eletrodos AMNB, buscando a interpretação de variações laterais. Nesta técnica a profundidade alcançada é determinada em função do espaçamento dos eletrodos e, também da resistividade do material que constitui o terreno investigado.

Nas técnicas de aquisição de dados elétricos como para o caminhamento elétrico (CE), vários são as configurações de eletrodos possíveis de ser utilizadas, já que a medida de resistividade do meio depende da disposição dos pontos de injeção de corrente e dos eletrodos de medida de potencial. Dois são os arranjos mais empregados atualmente, sendo eles o arranjo tipo Schlumberger e o tipo Wenner. Os demais arranjos existentes são derivados destes, desenvolvidos com o intuito de aprimorar os resultados. Na realização deste trabalho foi empregado o arranjo combinado Wenner-Schlumberger (Figura 3).

Este tipo de arranjo é caracterizado pela configuração eletródica de um par de eletrodos potenciais (MN) ao centro e um par de eletrodos de corrente (AB) nas extremidades.

Figura 3 – Configuração dos Eletrodos de Corrente (A) e (B) e dos eletrodos de Potencial (M) e (N) para o arranjo combinado tipo Wenner-Schlumberger.



(Adaptado de TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1976)

O espaçamento entre os eletrodos para este arranjo é dado por $AM=BN$, sendo o valor um fator “n” do espaçamento “a” entre os eletrodos MN de potencial, como mostra a figura 3.

Para este arranjo o fator geométrico (k) pode ser conhecido a partir da equação 3:

$$K = \pi * n(n - 1) * a \quad \text{(Equação 3)}$$

O arranjo tipo Wenner-Schlumberger foi escolhido para a realização da linha geoeétrica pela característica da resposta de interesse. Este tipo de arranjo é conhecidamente empregado nas geociências pela boa resposta quanto à estratigrafia em subsuperfície, já que apresenta a configuração de uma SEV, com eletrodos de potencial ao centro, e eletrodos de corrente nas extremidades.

As formas de propagação das correntes elétricas artificiais geradas pelo método podem ser de dois principais tipos: (a) Forma eletrônica - quando a passagem de corrente elétrica em rochas e solos é propiciada por minerais metálicos condutores e semicondutores e (b) Forma iônica - quando a passagem de corrente elétrica em solos e rochas é propiciada pelo deslocamento de íons dissolvidos em água nos poros e fissuras (BRAGA, 1997). Na finalidade do estudo de mineralizações de ferro a propagação de corrente elétrica pelo meio geológico é do tipo eletrônica.

5.2.1.2 Aquisição dos dados

Foi realizado um perfil eletrorresistivo por caminhamento elétrico ao longo da área de estudo (Figura 7). Dentre os arranjos possíveis de serem empregados se optou pelo arranjo combinado Wenner-Schlumberger que, conhecidamente, é empregado a fim de realçar a estratigrafia em subsuperfície.

A linha eletrorresistiva totalizou 360 metros de cabos, 72 pontos de investigação e espaçamento entre os eletrodos foi de 5 m ($AB = MN = 5$ m), por meio da qual foram realizadas leituras de resistividade elétrica em 20 níveis de profundidade. O tempo médio de aquisição dos dados foi de 4 horas

Na realização do método, foi utilizado o resistivímetro da marca francesa IRIS Instruments, modelo Syscal Pro (Figura 4B) que combina um transmissor, um receptor e uma unidade de comutação num único equipamento, com tensão máxima de 800 Volts, corrente máxima de 2,5 Ampères, resolução de $1\mu V$ e dez canais de leitura. O equipamento foi fornecido pela Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul – RS

Figura 4 - Preparação para a aquisição dos dados de eletrorresistividade por caminhamento elétrico em região acidentada (A). Em (B) preparação dos comandos para início da aquisição dos dados pelo arranjo Wenner-Schlumberger.



(Arquivo Pessoal)

5.2.2 Método Magnetométrico

De acordo com BLAKELY (1996), o método magnetométrico consiste basicamente na obtenção de medidas das variações do campo magnético terrestre. O principal objetivo é mapear variações de magnetização nos materiais que compõem o substrato geológico, medindo as variações de suscetibilidade magnética em diferentes pontos da superfície com objetivo principal de detectar as anomalias e correlacionar com as estruturas geológicas.

Em um levantamento magnetométrico terrestre de detalhe, o método proporciona informações necessárias para criar e confirmar modelos buscando a localização de áreas de interesse.

O método explora o fato de que variações nas propriedades magnéticas das rochas resultam em perturbações no campo magnético, que podem ser medidas em superfície. As variações no campo magnético são conhecidas como anomalias, e são interpretadas quanto a sua geometria e profundidade magnética dos corpos causadores destas variações (BLUM, 1999)

5.2.2.1 Campo Magnético Terrestre

O campo magnético da Terra pode ser representado por um vetor num ponto qualquer da superfície. Esse vetor resulta da combinação de diversas variáveis. A declinação magnética (D) é o ângulo entre as direções do norte geográfico e do norte magnético, por convenção, negativo no sentido anti-horário. A inclinação (I) é o ângulo entre a direção do campo e o plano horizontal, por convenção, negativa no hemisfério sul. A direção do campo magnético tem como referência, coordenadas geográficas e ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal. Na superfície do globo terrestre, a intensidade e a direção do campo magnético variam de local para local e em relação ao tempo sendo sua intensidade mínima em regiões equatoriais e máxima nos polos (FERNANDES, 1984).

5.2.2.2 IGRF

O IGRF (International Geomagnetic Reference Field) corresponde à representação teórica para um dado intervalo de tempo, do campo magnético normal da Terra ou campo principal, ou seja, do campo que se origina no interior da Terra. Excetuam-se neste caso os campos causados por materiais magnéticos da crosta e correntes elétricas induzidas por

campos magnéticos externos. Para gerar o IGRF, o campo magnético terrestre é representado por um somatório de harmônicos esféricos, cujos coeficientes são determinados a partir de medidas magnéticas realizadas sobre todo o planeta, por meio de levantamentos terrestres, marinhos e aéreos (com aeronaves e satélites) (SILVA, 2010).

O IGRF é usado como referência para a definição das perturbações causadas no campo normal pelas estruturas geológicas e depósitos de minérios, isto é, como referência para a definição das anomalias magnéticas da prospecção (TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1976)

5.2.2.3 Correções aos dados magnetométricos

Os dados magnéticos após a aquisição necessitam ser submetidos a processamentos que visam corrigir variações advindas de causas não geológicas, como a variação diurna (SILVA, 2010). Outra correção importante consiste na subtração do IGRF para a área de estudo.

5.2.2.4 Correção da variação Diurna

Em um levantamento magnetométrico terrestre o procedimento empregado na correção da variação diurna consiste em medir em um dos magnetômetros denominado de “base” a variação do campo magnético continuamente ou a intervalos regulares. Outro magnetômetro dito viajante ou *rover* é utilizado para medir o campo nas diversas estações de medidas. A correção dos valores medidos é feita somando-se ou subtraindo-se dos mesmos a variação do campo observada no magnetômetro fixo (base), para os momentos das medidas. O valor é somado se o campo magnético da estação fixa diminuiu em relação ao primeiro valor medido naquele dia e diminuído, no caso inverso (FERNANDES, 1984).

Como a estação base corresponde a uma unidade fixa, as variações do campo magnético circundante são resultados na maioria da variação diurna, juntamente com ruídos presentes no local (fios de alta tensão, antenas, celulares, veículos etc.). As leituras da estação viajante são influenciadas tanto pela variação diurna como pelas variações locais do campo magnético em virtude das anomalias presentes no local do levantamento geofísico (BLUM, 1999). A correção diurna remove, portanto, a variação diurna do campo magnético terrestre, permitindo que somente as anomalias magnéticas sejam devidamente reconhecidas no levantamento.

5.2.2.5 Remoção do IGRF local

As anomalias magnéticas são perturbações ou desvios do campo geomagnético terrestre, ou seja, do campo magnético normal. Desse modo, para definir uma anomalia, é necessário subtrair-se o valor do campo normal de cada medida realizada no levantamento. O campo normal é representado pelo IGRF e seus valores podem ser encontrados em tabelas e mapas ou gerados em computadores por algoritmos.

5.2.2.6 Amplitude do Sinal Analítico

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA) é dada pela combinação dos gradientes vertical e horizontal de uma anomalia magnética. Ainda, apresentam-se com baixa dependência dos parâmetros oriundos da geometria dos corpos e do campo magnético terrestre desta forma, as anomalias se posicionam em suas respectivas fontes.

A aplicação do sinal analítico de interpretação magnética é utilizada principalmente como uma ferramenta para estimar a profundidade e a posição das fontes (BLAKELY, 1996).

A amplitude do sinal analítico é uma ferramenta bastante útil, considerando que as formações ferríferas possuem alta susceptibilidade magnética.

5.2.2.7 Aquisição dos dados

Os dados magnetométricos foram adquiridos com o emprego de dois magnetômetros modelo GSM 19 da marca GEM Systems. Um destes magnetômetros serviu como estação base (22J 241270/6575111) e outro como magnetômetro viajante, responsável por efetuar as medidas em cada estação, a cada 25 metros, ao longo de seis perfis (Figura 7) de seis perfis com extensão variando de 675 a 925 metros propostos a fim de cobrir a área de interesse.

Figura 5- (a) Magnetômetros utilizados na aquisição dos dados magnetométricos. (b) magnetômetro base. (c) e (d) magnetômetro viajante ou Rover.



(Arquivo Pessoal)

Como o campo magnético terrestre varia ao longo do dia faz-se necessário uma correção das medidas efetuadas pelo magnetômetro viajante ao longo do dia. O magnetômetro base (Figura 5b) é utilizado para a devida correção, conhecida como correção diurna. Foram adquiridos um total de 192 medidas com os valores magnetométricos de campo total observados ao longo da área de interesse.

Os dados que foram adquiridos em campo, ao longo dos seis perfis, foram representados graficamente após processamentos e tratamentos sob forma de mapas de isovalores gerados por um *grid*. Estes dados correspondem a valores de intensidade do campo magnético da registrados em pontos de localização definidos. Um *grid* (com a variável de interesse anomalia campo total, sinal analítico, etc.) é gerado sob a forma de coordenadas X e Y com um espaçamento pré-determinado para cada célula, de acordo com a distância das estações de aquisição de dados em campo, no caso, 25 metros.

5.2.3 Técnica da Susceptibilidade Magnética

Quando rochas e solos são submetidos a uma estimulação magnética propiciada por um campo magnético (H), estes adquirem uma intensidade de magnetização (M), proporcional ao campo magnético. A constante de proporcionalidade entre a intensidade de magnetização e o

campo magnético é denominada de Susceptibilidade Magnética (K), uma grandeza adimensional, já que tanto a estimulação magnética, quanto a magnetização induzida tem em comum a unidade Ampere por metro (A/m) (LUIZ e SILVA, 1995).

O sinal da susceptibilidade magnética pode indicar se o material de análise é paramagnético ou diamagnético. Quando a susceptibilidade magnética (K) é positiva, tem se o caso de um material paramagnético e quando K é negativo, tem se o caso de um material diamagnético. Paramagnetismo, Diamagnetismo e Ferromagnetismo são os ditos comportamentos magnéticos, e caracterizam os três principais comportamentos possíveis em relação a um campo magnético externo.

Materiais são ditos paramagnéticos quando possui momentos magnéticos inerentes, devido a momentos de spin descompensados (camadas atômicas incompletas) (LUIZ e SILVA, 1995); quando em presença de um campo magnético os materiais com esta característica se alinham, provocando leve aumento no valor do campo magnético induzido. Os materiais paramagnéticos caracterizam-se por apresentarem suscetibilidade positiva com ordem de grandeza entre 10^{-5} e 10^{-3} (SI). Um exemplo de mineral paramagnético é a ilmenita (FeTiO_3).

Materiais diamagnéticos por sua vez, caracterizam-se por serem magneticamente neutros e, apresentarem comportamento contrário ao do campo aplicado (LUIZ e SILVA, 1995). Nesses casos a susceptibilidade magnética é negativa e na ordem de grandeza de 10^{-6} (SI). Um exemplo de mineral diamagnético é o quartzo (SiO_2).

Ocorre também um terceiro tipo de material em relação à sua interação com o campo magnético aplicado, os materiais denominados de ferromagnéticos.

São considerados ferromagnéticos os materiais que espontaneamente já possuem momentos magnéticos sem a necessidade de indução por algum campo externo. Na natureza existem três elementos que naturalmente são ferromagnéticos: o ferro, níquel e cobalto. É comum que, quando se aplique um campo magnético em substâncias ferromagnéticas estas, guardem uma magnetização residual chamada de magnetização remanescente (Mr) e, a partir desta magnetização residual é possível que se conheça a história magnética destas rochas (LUIZ e SILVA, 1995).

O ferromagnetismo corresponde a uma propriedade que depende do arranjo tridimensional dos átomos na estrutura cristalina mineral. Nos óxidos de ferro, a presença do oxigênio muda o sinal das forças de troca e os momentos adjacentes são antiparalelos. Quando os momentos cancelam-se totalmente trata-se de minerais com característica de

antiferromagnetismo e, quando os momentos numa direção excedem os da direção oposta trata-se de minerais de característica Ferrimagnética.

A susceptibilidade Magnética é uma propriedade física inerente às rochas e ao solo proporcional a seu conteúdo de minerais ferromagnéticos, principalmente a magnetita, podendo ser medida em campo ou em amostras de mão com o auxílio do susceptibilímetro ou também conhecido como Kappameter. Os principais minerais ferromagnéticos correspondem a magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e a pirrotita (Fe_7S_8) e, de modo geral, quando estes ocorrem na composição de rochas e solos, são responsáveis pelas propriedades magnéticas.

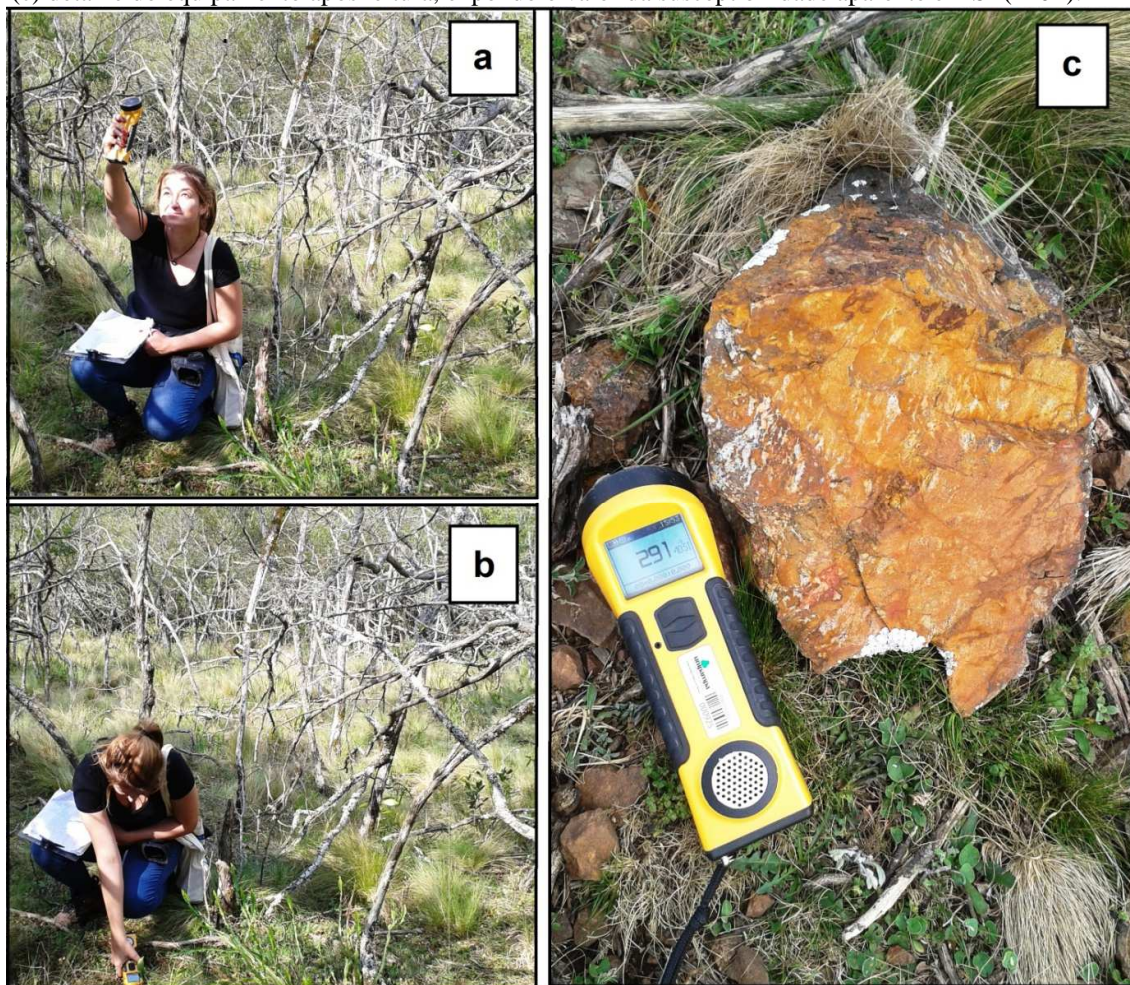
As anomalias magnéticas são geradas por contrastes de magnetização entre rochas com diferentes propriedades magnéticas. A anomalia magnética depende da forma, profundidade e orientação do corpo fonte que, em geral apresentam altas concentrações de minerais ferromagnéticos.

Levantamentos magnéticos têm por objetivo identificar e descrever regiões da crosta terrestre que apresentem magnetizações anômalas que, podem estar associadas à mineralizações locais de interesse, como o depósito de ferro bandado alvo do estudo.

5.2.3.1 Aquisição dos dados

Medidas de susceptibilidade magnética foram realizadas pelo susceptibilímetro KT-10 a cada 25 m ao longo dos mesmos seis perfis em solo e rocha, quando aflorante.

Figura 6 – Aquisição dos valores de susceptibilidade magnética com uso do susceptibilímetro KT-10 (a) e (b). Em (c) detalhe do equipamento após leitura, expondo o valor da susceptibilidade aparente em SI ($\times 10^{-3}$).

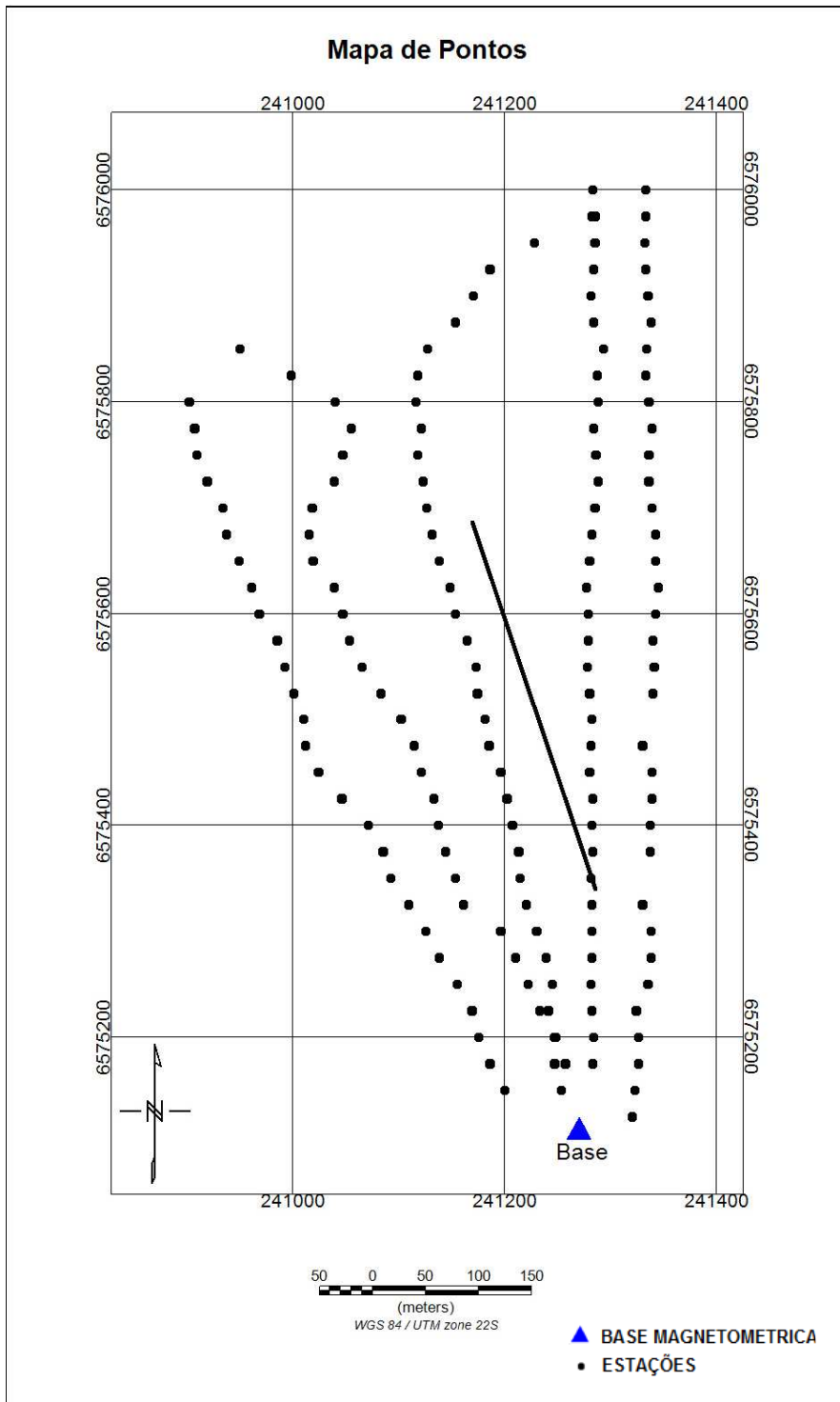


(Arquivo Pessoal)

Em cada ponto, ao longo dos perfis, foram realizadas três medidas dos valores de susceptibilidade magnética e o valor médio destas fora utilizado na elaboração do mapa de distribuição da susceptibilidade magnética da área.

Para a caracterização geofísica foi realizadas uma linha eletrorresistiva e medidas pelo método magnetométrico e pela técnica de susceptibilidade ao longo de seis perfis, como mostra a figura 7.

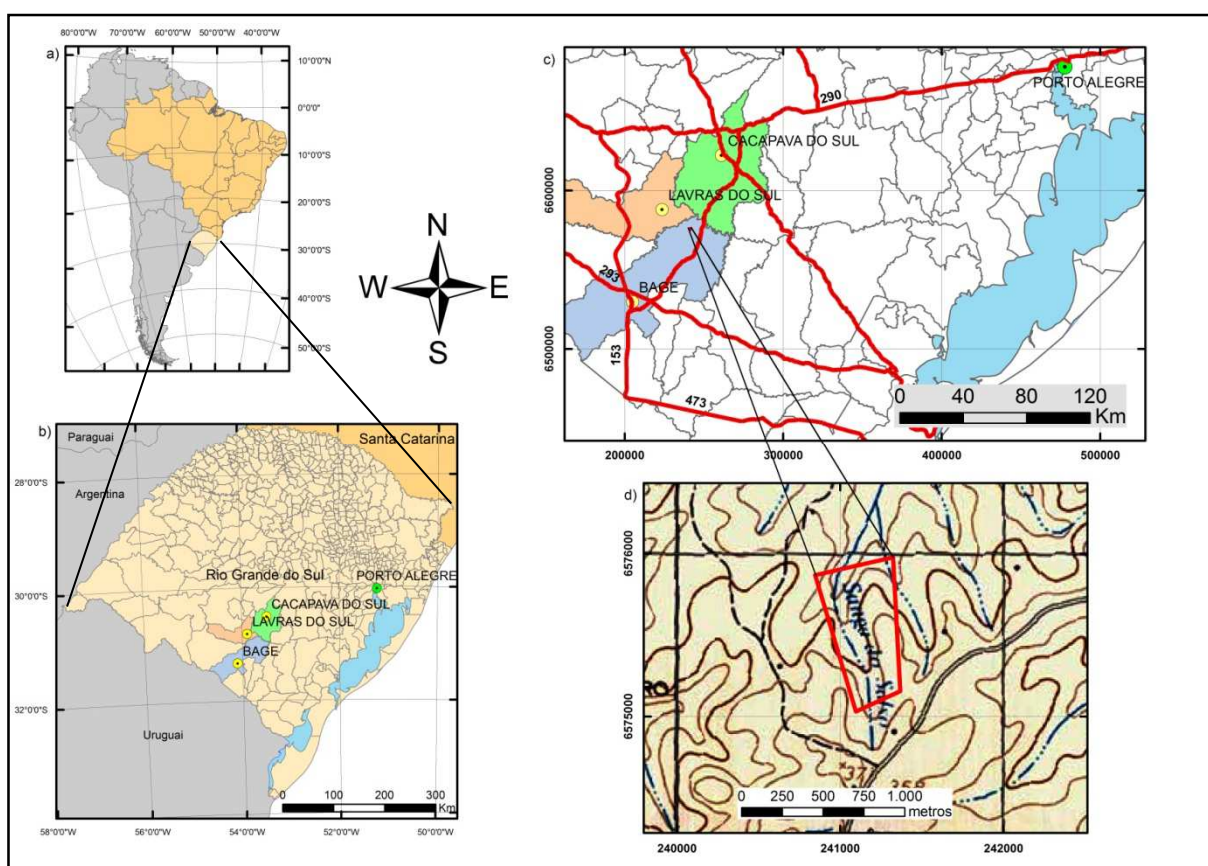
Figura 7 - Mapa de localização das estações de medidas do método magnetométrico e da técnica de Susceptibilidade Magnética. Posicionamento da linha de eletrorresistividade.



6 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no Município de Bagé, pertencente à região centro sul do estado do Rio Grande do Sul (Figura 8) O acesso principal se dá pela BR-153 que liga os Municípios de Bagé-RS e Caçapava do Sul - RS. Secundariamente fez-se uso de estrada rural para acesso à localidade de interesse. A região encontra-se toda inserida na carta topográfica Arroio Carajá (SH.22-Y-A-IV-4) de datum horizontal Córrego Alegre e datum vertical em Torres - RS.

Figura 8 - Localização da área de estudo no município de Bagé na região centro sul do Rio Grande do Sul.



(Fonte Autoral)

7 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A localização da área de interesse encontra-se disposta sobre a área morfotectônica denominada de Província Mantiqueira, definida como uma faixa de direção NE-SW, paralela à costa sul e sudeste do Brasil (ALMEIDA, 1977) (ALMEIDA *et al.*, 1981) e inserida no domínio tectônico da Plataforma Sulamericana. Segundo Heilbron *et al.* (2004), a Província Mantiqueira trata-se de um sistema orogênico de idade Neoproterozóica desenvolvido durante amalgamação do paleocontinente Gondwana ocidental, que engloba os orógenos Araçuai, Ribeira e Dom Feliciano, São Gabriel e a zona de interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira.

O Escudo Sul-Riograndense (ESRG), porção meridional da Província Mantiqueira, é a área do Estado do Rio Grande do Sul onde predominam rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-paleozóicas, cuja gênese está ligada aos ciclos Transamazônico (Paleoproterozóico) e Brasileiro/Pan-Africano (Neoproterozóico) (CHEMALE Jr., 2000).

O escudo congrega rochas que registram distintos processos de geração e deformação de crosta continental, ocorridos principalmente durante grandes ciclos orogênicos, como o Transamazônico (2,26 - 2,00 Ga) e Brasileiro (900 - 535 Ma). O principal marco dos ciclos corresponde à formação de crostas oceânicas, microcontinentes intraoceânicos e arcos magmáticos (CHEMALE Jr., 2000). De modo geral, a porção sul do continente sul-americano encontra-se vinculada a acresções de sucessivas litologias provenientes destes ciclos.

O anteparo arqueano de colisão do ciclo Transamazônico não se observa no estado gaúcho em contrapartida, o ciclo orogênico Brasileiro datado do Neoproterozóico encontra-se bem marcado, sendo o referencial o cráton Rio de La Plata, atualmente representado por uma borda retrabalhada, pertencentes à compartimentação tectônica do estado, denominada de Bloco Taquarembó.

Também compõem a compartimentação tectônica do estado gaúcho os blocos Neoproterozóicos São Gabriel, Tijucas e o batólito de Pelotas diferenciando-se entre si por suas características estruturais, geofísicas, petrológicas, geoquímicas e geocronológicas.

Os limites entre estas compartimentações crustais distintas foram determinados por Fernandes *et al.* (1995) com base em um complexo arranjo tectono-estratigráfico, controlado e segmentado por zonas de cisalhamento profundas, possivelmente de natureza intercontinental.

De idade Paleoproterozóica, o bloco Taquarembó (Figura 9) localizado no extremo sudoeste gaúcho, é visto como fragmento do cráton Rio de La Plata. O bloco Taquarembó

ocorre como uma associação de rochas granulíticas básicas, trondhjemíticas e tonalíticas ácidas (TTG's), e corpos de metaultramafitos todos metamorfizados em fácies granulito e anfíbolito. Os limites deste bloco são determinados a leste pela Sutura de Caçapava do Sul (SCS), a norte pela Zona de Cisalhamento de Ibaré (ZCI), que o separa do bloco São Gabriel, e a oeste e sul limitado por coberturas da Bacia do Paraná.

O bloco São Gabriel, é caracterizado por litologias de ambientes de margem passiva, retroarco e arcos magmáticos datados do Criogeniano (900-700 Ma). Interpretado como orógeno do tipo acrescionário, inclui sequências metassedimentares, metaultramafitos, ortognaisses e granitóides cálcio-alcalinos.

O bloco é limitado, por estruturas tectônicas e por limites de exposição. O limite oriental, de caráter tectônico é dado pela zona de cisalhamento Caçapava, também de caráter tectônico, o limite meridional é determinado pela Zona de Cisalhamento Ibaré (ZCI) que separa o mesmo do bloco Taquarém. A ZCI se apresenta com orientação de movimentação sinistral sendo sua origem transpressiva (Figura 9). O bloco São Gabriel limita-se ainda estratigraficamente por deposições da bacia intracratônica do Paraná em suas porções ocidental e setentrional (SALVI, 2014). A porção sul do bloco São Gabriel agrega o Complexo Máfico-Ultramáfico Cerro Mantequeira (CMUCM), o Complexo Imbicuí (CI) e o Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM), alvo do estudo.

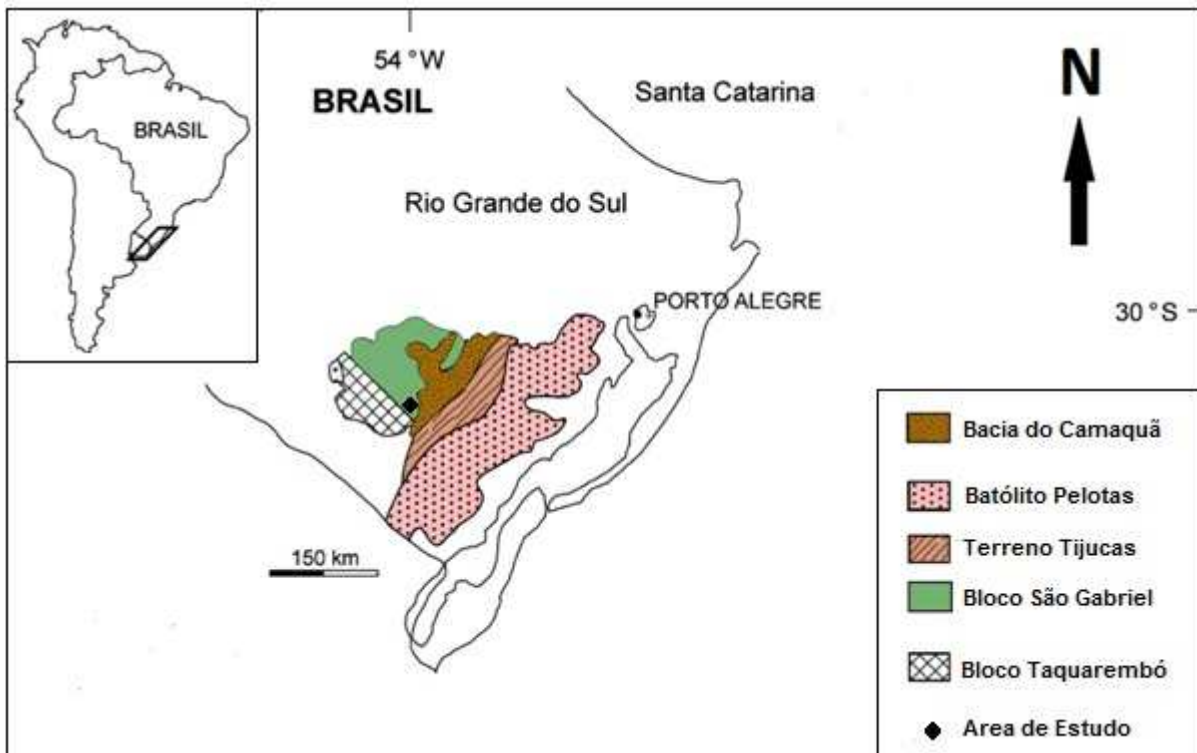
Localizado na porção central da compartimentação tectônica do ESRG, o cinturão/terreno Tijucas (Figura 9) ocorre como uma faixa alongada composta por duas principais unidades geológicas metamorfisadas: Complexo Encantadas, caracterizado por granito-gnaisses Paleoproterozóicos e Complexo Porongos, de idade Neoproterozóica, composto por rochas supracrustais e plutônicas cálcio-alcalinas.

A terceira unidade que compõe o terreno Tijucas, não metamorfisada, corresponde a Bacia do Camaquã, uma unidade sedimentar siliciclástica e vulcânica depositada em ambiente dúctil-ruptil (CHEMALE-JR, 2000).

O Batólito de Pelotas também denominado por Jost & Hartmann (1984) e Chemale Jr. (2000) de cinturão Dom Feliciano (Figura 9), situa-se na porção leste do ESRG e caracteriza-se por sucessivas ocorrências de plutonismos que propiciaram várias interpretações genéticas ao longo dos anos. Segundo Fernandes (1995), o Batólito de Pelotas poderia ter sido gerado em ambiente de arco magmático, localizado acima de zona de subdução do oceano Adamastor em mergulho para oeste. Mais recentemente se aceita a hipótese de Bitencourt e Nardi (2000)

e (Phillip e Machado (2005) na qual a proveniência do batólito seria vinculada a intensos plutonismos magmáticos vinculados a processos de ambiente pós colisional.

Figura 9- Mapa Geológico regional da compartimentação tectônica do ESRG com localização da área de estudo.



(Adaptado de CHEMALE-JR, 2000).

Dentro deste contexto geotectônico, a área de estudo localiza-se na porção sul do Bloco/Terreno São Gabriel (Figura 9), a noroeste do Escudo Sul-rio-grandense, mais especificamente, no Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) (CAMOZZATO e LOPES, 2013).

8 GEOLOGIA LOCAL

O Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM), proposto por Camozzato & Lopes (2013), ocorre como um corpo alongado paralelo ao lineamento de Ibaré, no centro oeste do estado gaúcho, sobre o domínio geotectônico São Gabriel, reunindo as antigas Formações Arroio Marmeleiro (CPRM, 2007) e Arroio da Porteira (Iglesias *et al.*, 1980).

Composto predominantemente por rochas metamórficas em fácies xisto verde a anfibolito (SIVIERO, 2001), o CMAM compreende metapelitos carbonosos e límpidos associados a mármore, talco xistos, anfibolitos e metavulcanoclásticas. Subordinadamente ocorrem serpentinitos, xistos magnesianos e rochas metabásicas.

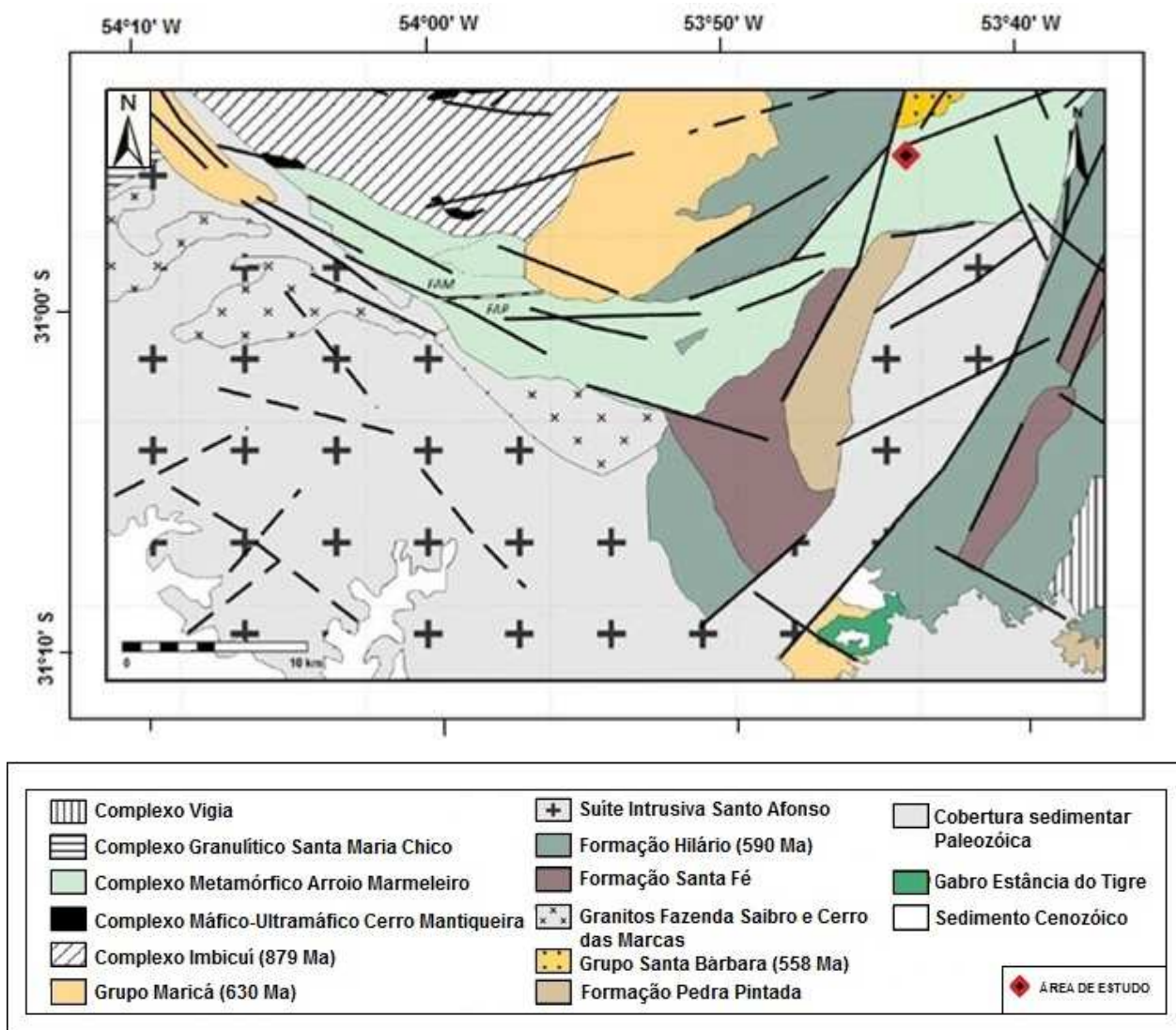
Estruturalmente, o complexo exibe foliação bem marcada com direção NE-SW, coincidindo com a orientação da principal estrutura tectônica em grande escala, a Zona de Cisalhamento Ibaré (ZCI) (UFRGS, 2004).

Tornam-se relevantes considerações relacionadas à história hierárquica da região de estudo, uma vez que por diversas vezes houve alternâncias de hierarquia e de grupo litológico as quais a região fora integrante.

Inicialmente reunidos na Série Porongos, estavam todos os metamorfitos de baixo grau metamórfico do ESRG (CARVALHO, 1932). Goñi *et al.* (1962) iniciou as primeiras modificações hierárquicas conhecidas para a região, agrupando rochas metassedimentares na Formação Vacacaí e rochas metavulcanoclásticas na Formação Cerro do Ouro. Prosseguindo, Fragoso-Cesar (1980) propôs relacionar o termo Vacacaí às sequências metamórficas de baixo grau do oeste do escudo, reunindo assim metamorfitos vulcanossedimentares e máficos-ultramáficos, propiciando localmente uma gama de denominações litológicas, dentre as quais se encontram os Metamorfitos Arroio da Porteira, Complexo Marmeleiro, Complexo Máfico e Ultramáfico Cerro da Mantiqueira. Especialmente no caso dos metamorfitos Arroio da Porteira, tal nomenclatura foi individualizada por Iglesias *et al.* (1980) para designar uma sequência epimetamórfica composta por ardósias, filitos e quartzitos interestratificados com direção E-W, ocorrendo como uma continuidade do Complexo Marmeleiro, que ocorria a leste da mesma.

Uma nomenclatura mais atual fora proposta por Camozzato & Lopes (2013), na qual se reúnem duas unidades (Arroio da Porteira e Complexo Marmeleiro), que ocorrem em continuidade lateral, no denominado Complexo metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) (Figura 10).

Figura 10 – Mapa geológico da região de interesse localizado no Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro. Linha contínua grossa para os principais lineamentos, linha contínua fina para contatos geológicos.



(Modificado de UFRGS, 2004; CPRM, 2007; Camozzato & Lopes, 2013)

Fazem divisa com o Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro: as formações Hilário e Maricá ao norte, as formações Pedra Pintada e Santa Fé ao sul, os Granitos Saibro e Santo Afonso a sudoeste, a extremo nordeste a Formação Santa Bárbara e em contraponto a extremo Noroeste o Complexo Máfico Ultramáfico Cerro Mantiqueira e o Complexo Imbicuí (Figura 4) (CAMOZZATO e LOPES, 2013).

A Formação Hilário, que ocorre ao norte, a leste e ao sul do complexo, caracteriza-se por lavas de afinidade shoshonítica, rochas piroclásticas e sedimentos vulcanogênicos (LIMA *et al.* 2007). A Formação Maricá por sua vez, correspondente a porção basal da Bacia do Camaquã circunda o Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro em sua porção norte e extremo noroeste, caracterizadas por dois pacotes, basal e de topo, compostos por arenitos e

arenitos conglomeráticos típicos de ambiente fluvial, separados por um pacote pelítico intermediário de ambiente marinho raso (BORBA *et al*, 2008).

A Suíte Intrusiva Santo Afonso pertencente ao domínio geotectônico Taquarembó, caracteriza-se por monzogranitos, granodioritos e sienogranitos ocorrem em toda porção, sudoeste e a leste do Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro, assim como a Suíte Intrusiva Saibro, que ocorre como pequenos corpos monzograníticos alongados circundantes ao complexo a oeste e na porção central, seguindo o próprio lineamento de Ibaré (HARTMANN & NARDI, 1982).

O Complexo Imbicuí ocorre a norte do CMAM e caracteriza-se por sequências de gnaisses dioríticos, trondhjemíticos e tonalíticos (UFGRS, 2004). Ocorrendo como corpos estreitos de anfibolitos, metaultramafitos, serpentinitos e xistos magnesianos, o Complexo Metamórfico Cerro Mantiqueira ocorre imbricado às litologias do Complexo Imbicuí e é interpretado como lascas de ofiolito de supra-subducção (CHEMALE-JR, 2000) e (HARTMANN *et al*, 2007).

Interpretado como um sistema aluvial de entrelaçado, composto por conglomerados ricos em clastos vulcânicos ácidos, a Formação Santa Fé aflora a sudeste-leste e, aflorando a leste a Formação Pedra Pintada é vista como composta por sedimentos de origem desértica tendo em sua base, rochas vulcânicas básicas a intermediárias pertencentes ao vulcanismo Rodeio velho (PAIM *et al*, 2000).

Por fim, aflorante a extremo nordeste da área de interesse, a Formação Santa Bárbara (PAIM *et al*, 2000), caracteriza-se por representar um sistema deltaico, entrelaçado arenoso a arenoso-conglomerático.

9 RESULTADOS

9.2 Petrografia Mesoscópica

O estudo petrográfico, buscou a caracterização do litotipo visando à identificação das principais estruturas da rocha e, incidiu principalmente na descrição dos aspectos texturais e na caracterização dos padrões e tipos de bandamentos presentes.

A análise petrográfica foi realizada com auxílio de Lupa Binocular pertencente ao Laboratório de Petrografia da Universidade Federal do Pampa- Campus Caçapava do Sul.

Figura 11 - Amostra de mão da litologia de interesse, apresentando intercalação de bandamento entre camadas ricas em sílica e camadas ricas em minerais de ferro, caracterizando formação ferrífera do tipo bandada. Em detalhe: (A) Bandamentos claros, ricos em minerais visíveis a olho nu de quartzo, dispostos de modo irregular, não contínuo ao longo de toda amostra, (B) Intercalação de bandamentos claros e escuros e (C) evidências de processos de oxidação.



(Arquivo Pessoal)

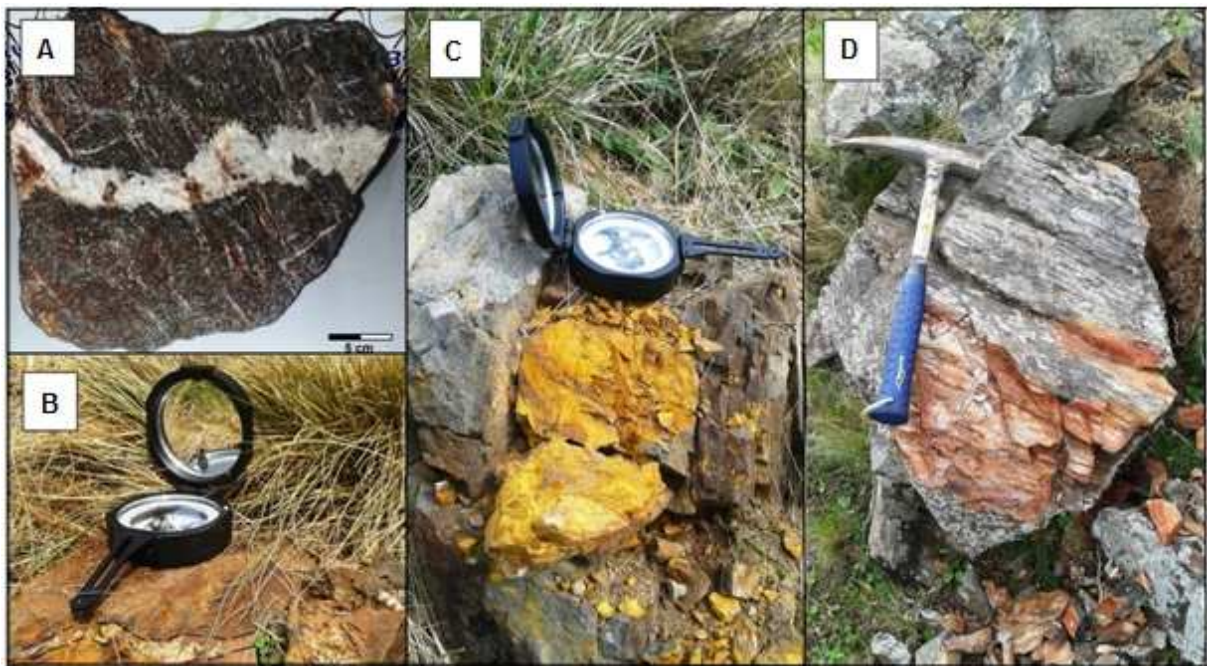
Os termos bandados apresentam-se caracteristicamente com coloração acastanhada, subordinadamente escura, com granulometria fina a média. O micro, macro e mesobandamento são caracterizados pela alternância rítmica de níveis opacos (provavelmente óxidos de ferro), quase sempre contínuos, e níveis silicáticos compostos provavelmente por quartzo e minerais félsicos (Figura 13).

As espessuras das bandas oscilam de milímetros (microbandas) a centímetros (mesobandas) nas porções mais silicáticas, e submilimétrica a centimétrica (microbandas, microlaminações e mesobandas) nas porções contendo óxidos de ferro. As microlaminações e mesobandas são plano paralelas, muitas vezes onduladas, difusas ou levemente dobradas. O

contato entre estes níveis em geral é brusco, mas ocorre também gradação entre as bandas, dada pela presença de óxidos ocorrendo intersticialmente nos minerais silicáticos.

Diversas gerações de fraturas, preenchidas ou não, e a presença de veios afetam o bandamento principal da rocha (Figura 14). A presença destas estruturas evidenciam processos deformacionais hidrotermais aos quais a litologia foi exposta.

Figura 12 – Litologia da área de estudo . (A) e (B) Presença de veios cortando o bandamento principal. Ocorrem em campo, geralmente de modo alterado/oxidado, devido às condições de exposição intempérica que podem ser visualizadas nas fotografias (c) e (D). Presença de goethita e limonita

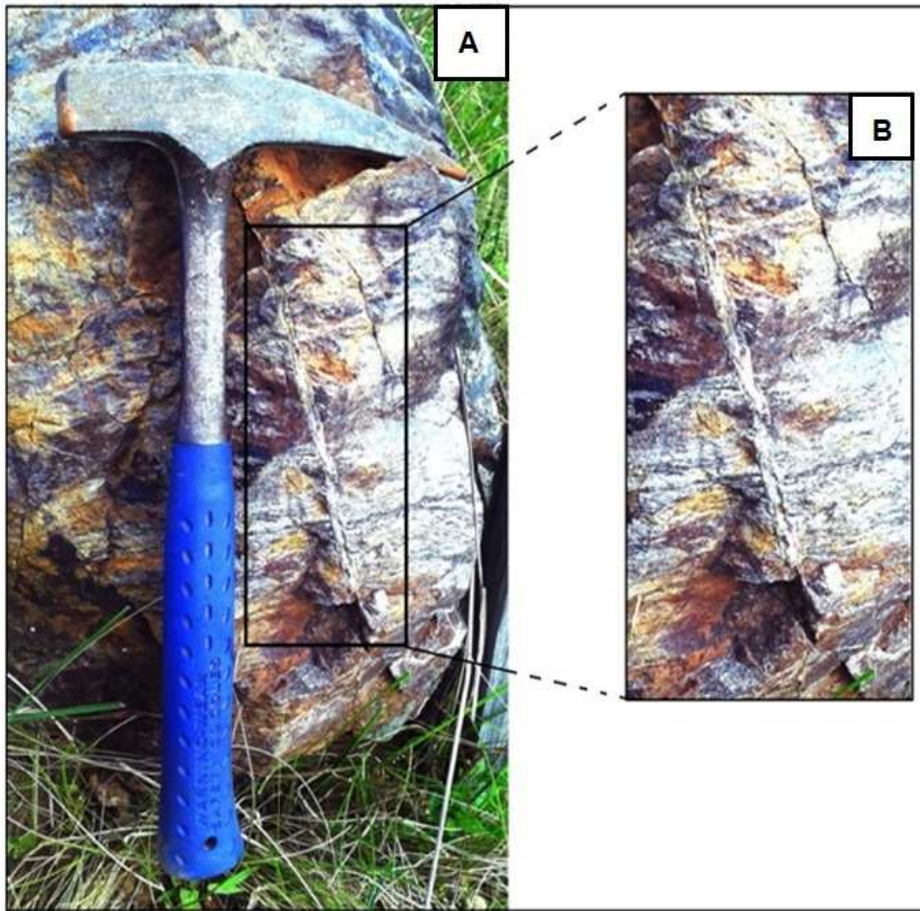


(Arquivo Pessoal)

Observa-se na maioria das amostras a ocorrência de processo de oxidação em nível já avançado (Figura 14C e 14D). As condições de exposição da litologia a ação intempérica promove a oxidação da mineralogia principal das bandas acastanhadas, provavelmente ricas em óxidos ferro.

A ocorrência de fraturas preenchidas (Figura 15) corrobora na interpretação de que a região do CMAM onde a área de estudo está localizada foi exposta a processos deformacionais e hidrotermais. Os processos deformacionais, geradores de fraturas são condizentes com a localização do CMAM, em região regida estruturalmente pelo lineamento tectônico de Ibaré. O preenchimento destas estruturas falhadas e fraturadas aponta para posterior processo hidrotermal, responsável por remobilizações minerais, principalmente de quartzo.

Figura 13 –(A) Presença de fraturas preenchidas cortando o bandamento principal da rocha. (B) Detalhe de fratura preenchida, evidenciando processos hidrotermais posteriores.

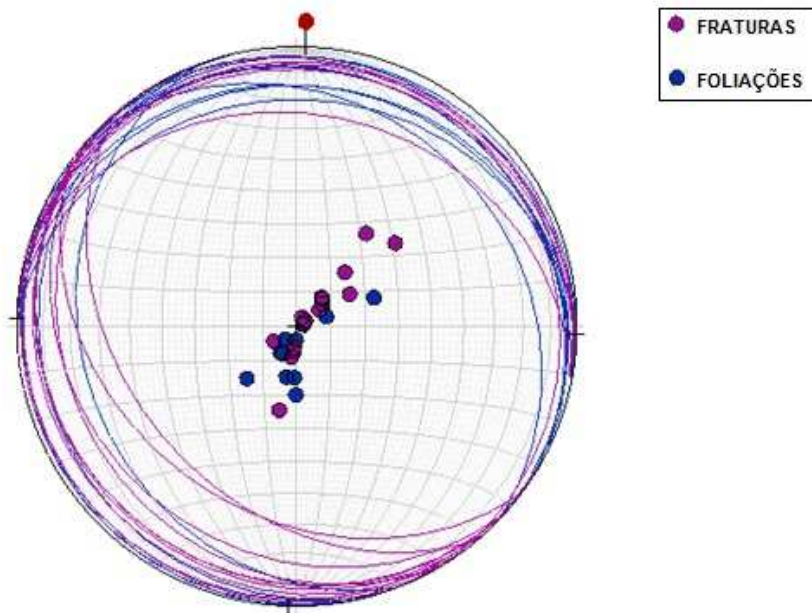


(Arquivo Pessuar)

9.3 Geologia Estrutural

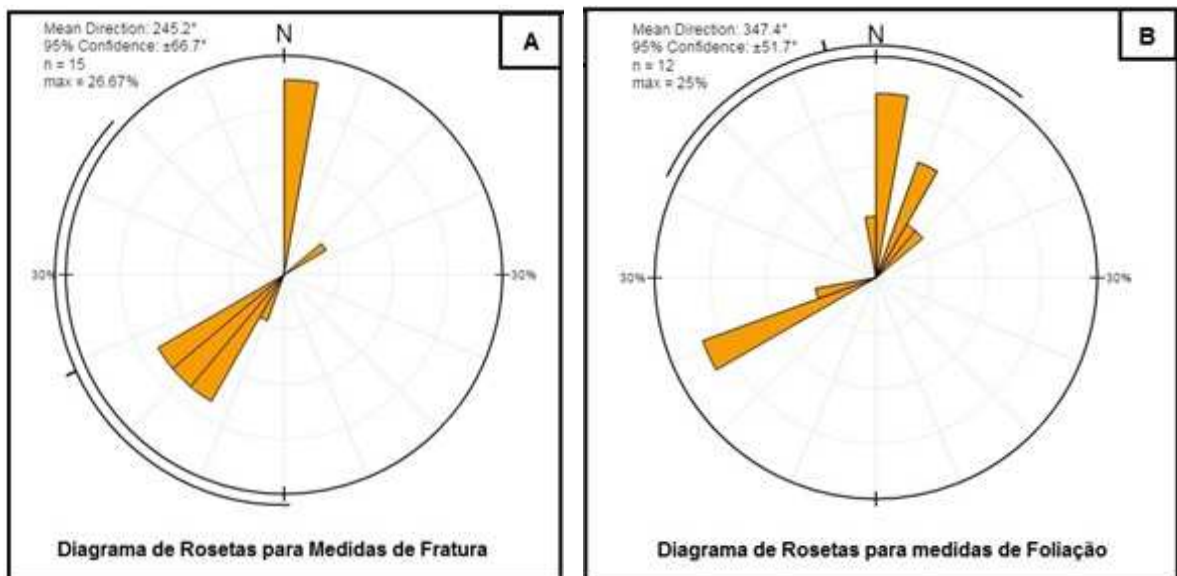
A coleta de amostras e dados estruturais faz-se necessária para corroborar na interpretação das respostas geofísicas. As principais famílias de fraturas que afetam o bandamento principal da litologia têm direções preferenciais NE-SW, já sugerido pela literatura, como mostra o estereograma (Figura 16) e os diagramas de rosetas (Figura 17 e 18)

Figura 14 – Estereograma das medidas de Fratura e Foliação



Analisando a distribuição dos dados de fraturas e foliações coletados em campo nos afloramentos disponíveis, é possível notar que ocorre uma forte correlação entre as direções principais, expondo que estas estruturas estão diretamente relacionadas. As medidas de fraturas exibem-se preferencialmente em direção NE-SW como ocorre com o lineamento tectônico de Ibaré, que controla estruturalmente a região do CMAM (CAMOZZATO e LOPES, 2013).

Figura 15 – Diagrama de rosetas para as medidas de fraturas (A) e Foliação (B).



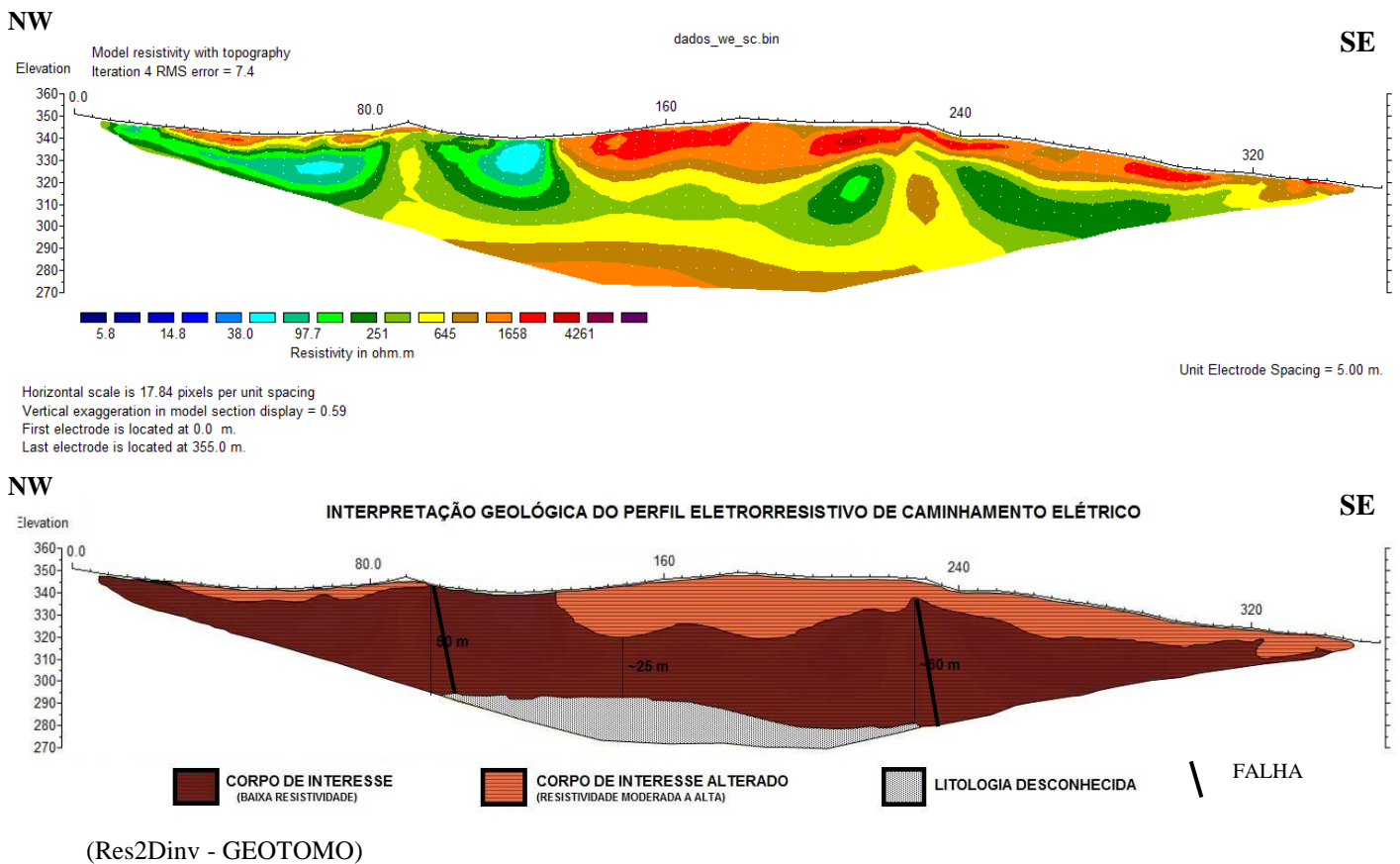
(Stereonet)

9.4 Eletrorresistividade

A partir das informações obtidas em campo para a linha eletrorresistiva pela técnica de caminhamento elétrico e arranjo Wenner-Schlumberger os dados obtidos foram tabelados num editor de tabelas e posteriormente processados com o uso do software Res2Dinv da GEOTOMO, de origem Malasiana. O Res2dinv é um programa que determina automaticamente um modelo de profundidade bidimensional para a subsuperfície a partir de dados obtidos por meio de levantamentos elétricos de resistividade aparente. Para diminuir o erro apresentado no primeiro perfil, foi adotado como controle de qualidade durante a aquisição de dados, leituras de medidas com desvio padrão abaixo de 5%.

As informações de topografia ao longo da linha de investigação foram levadas em consideração a fim de auxiliar na interpretação da provável espessura do corpo mineralizado de interesse. Também, fez se uso da distribuição das amostras coletadas em campo como ferramenta de suporte para provável interpretação da lateralidade deste corpo, caso aflorasse.

Figura 16- Perfil Eletrorresistivo por caminhamento elétrico e arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação Geoelétrica.



(Res2Dinv - GEOTOMO)

O perfil expressa suas informações a partir de cores, sendo as cores claras (tons de azul, verde e amarelo) representam baixos valores de resistividade elétrica, ao passo que cores escuras (tons pastel, vermelhos e arroxeados) indicam altos valores. A resistividade medida apresenta ampla variação, com tendência geral de valores baixos em profundidade. Intervalos considerados de baixa resistividade variam de 5,8 Ω .m até 645 Ω .m, enquanto valores elevados variam entre 645 Ω .m e 4.261 Ω .m. Se comparados à outras litologias, tanto os valores que aqui consideramos como sendo de alta resistividade são, na verdade valores indicativos de rochas com resistividade elétrica baixa. O que ocorre é que o tipo litológico em estudo é altamente condutivo se comparado a outras litologias com teores menores ou ausência de ferro.

Tendo em vista que corpos com altos valores de ferro apresentam características altamente condutivas, atribuídas devido à característica do elemento em questão, é possível distinguir no perfil eletrorresistivo as áreas onde os altos teores de ferro estão dispostos. Estas áreas são justamente os baixos valores de resistividade, atribuídos a litologias altamente condutivas como a de interesse.

Interpretando o perfil geoeletrico (Figura 18) é possível perceber que, ao longo do mesmo, ocorrem zonas superficiais de alta resistividade imediatamente acima de uma zona expressiva de baixos valores de resistividade. A diminuição da resistividade em profundidade pode ser atribuída à ocorrência de rochas ricas em ferro com menor grau de alteração intempérica. Estas zonas de baixas resistividades são interpretadas como sendo o corpo de minério de ferro bandado de interesse, ocorrendo ao longo de todo perfil geoeletrico.

Interpretando o que seria o corpo de interesse não alterado na seção é possível averiguar as espessuras que ocorrem em profundidade. Ocorrem porções ao longo do perfil em que a espessura do corpo atinge aproximadamente 60 metros e, outras porções em que a espessura se limita a 25 metros. A interpretação da espessura para a litologia rica em ferro pode ser baseada nas informações advindas da linha de eletrorresistividade realizada. Mas para maior confiabilidade, seria necessária a realização de mais linhas ficando estas espessuras usadas apenas como uma base para a interpretação do trabalho em escala local.

As zonas altamente resistivas imediatamente acima do minério de ferro bandado foram interpretadas como sendo a mesma litologia, em elevado estado de intemperismo químico, responsável pela oxidação do elemento ferro e pela permanência das porções ricas em sílica, conhecidamente resistivas. Tal interpretação foi proposta pela característica superficial de

distribuição desta, que não ocorre em valores tão resistivos em outras profundidades de investigação.

Outra informação que corrobora nesta interpretação está relacionada às etapas de caracterização geológica de campo, onde se verificou um único tipo litológico em diferentes graus de alteração sendo, portanto estes altos valores de resistividade atribuídos a estes produtos de alteração da litologia rica em ferro.

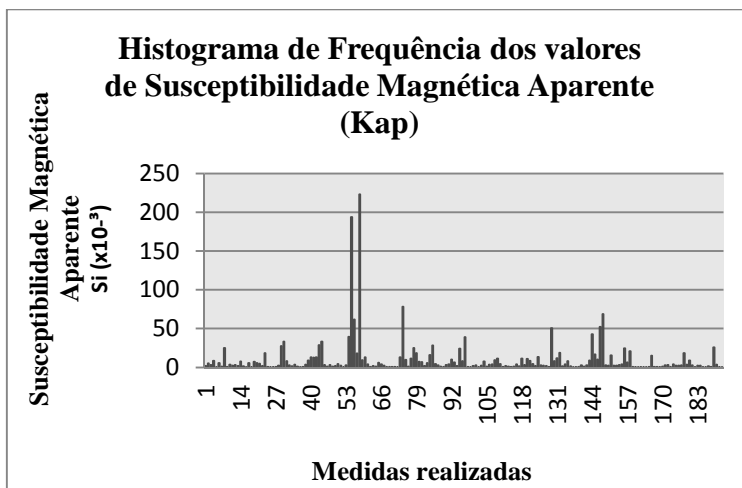
Os valores consideravelmente resistivos em profundidade no perfil geoeletrico provavelmente correspondam à outra litologia que não a de ferro bandado. A sucessão estratigráfica da região do Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CMAM) não é bem definida e inviabiliza uma interpretação razoável da provável base do depósito de interesse em estudo.

9.5 Susceptibilidade Magnética

Foram aferidas 192 estações de medidas de susceptibilidade magnética, em cada qual foi realizada 03 (três) leituras com o uso do susceptibilímetro, totalizando 576 medidas. De posse destas medidas, foi realizada em etapa posterior ao campo a média aritmética destes três valores aferidos em cada estação. O uso de um valor médio para cada estação emprega mais veracidade ao que é medido em campo.

O histograma de frequência dos valores de susceptibilidade magnética aparente (K_{ap}) expõe a grande variação nos valores encontrados (Figura 20), estando ligada principalmente aos diferentes meios onde às medidas foram realizadas, tanto em solos como em rochas frescas e alteradas.

Figura 17- Histograma de Frequência dos Valores de Susceptibilidade Magnética Aparente (K_{ap}) expondo a grande variação entre o litotipo, seus estados de alteração e o solo local, variando de 0.08 a 223×10^{-3} (SI).

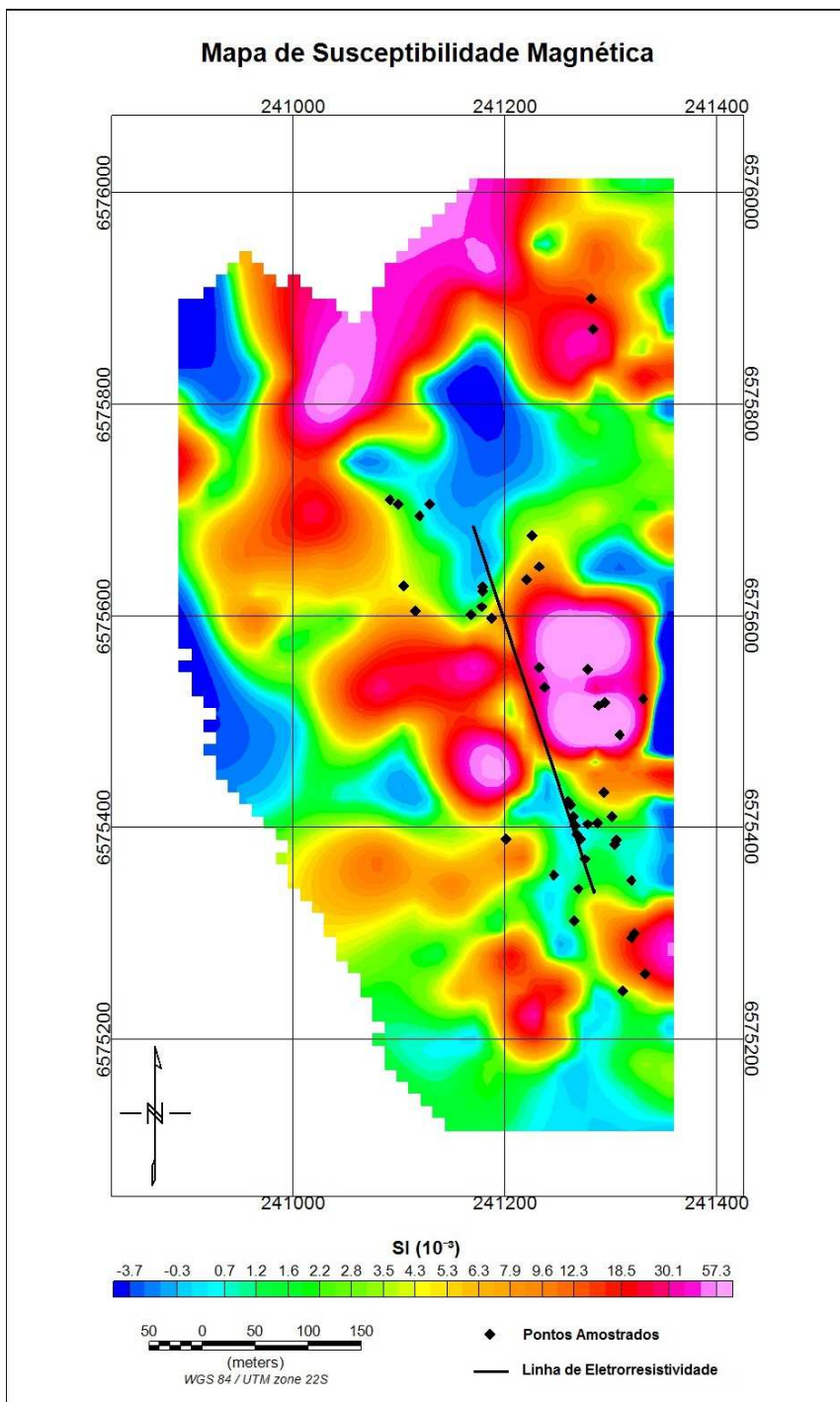


Em regiões de rocha aflorante as medidas foram realizadas diretamente na rocha e em porções não aflorantes as medidas foram feitas no solo, que também retratam o substrato rochoso subjacente. De modo geral, os valores mais baixos de K_{ap} (0.08 a 5×10^{-3} SI) são representativos de medidas realizadas em solo bem desenvolvido, com presença de vegetação de grande porte, indicando camadas de solo mais espessas. Do mesmo modo, os valores mais elevados ($>5 \times 10^{-3}$ SI) medidos ao longo destes perfis são representativos de afloramentos e/ou solos contendo muitos fragmentos de rocha.

Dependendo do estado de alteração da litologia os valores de susceptibilidade magnética também variaram. Rochas pouco alteradas apresentaram valores consideravelmente mais elevados ($>40 \times 10^{-3}$) e rochas mais alteradas apresentaram baixos valores devido à oxidação do ferro presente na litologia de interesse.

Dados os valores de susceptibilidade magnética aparente ao longo dos seis perfis realizados, foi gerado o mapa de distribuição destes valores na área de interesse (Figura 21) com o uso do software Oasis Montaj da GEOSOFT Inc.

Figura 18 – Mapa de distribuição dos valores de Susceptibilidade Magnética ($\times 10^{-3}$ SI).



(Oasis Montaj, GEOSOFT Inc.)

A distribuição dos valores de K_{ap} auxilia na interpretação de zonas de maior potencialidade para o caso da litologia bandada rica em ferro.

Partindo se da distribuição dos valores é possível perceber uma predominância de altos valores de susceptibilidade magnética ao longo de toda área. Valores mais expressivos concentram-se ao norte e ao centro da área.

Os valores baixos que ocorrem estão ligados a medidas realizadas em espessas camadas de solo e a produtos de intemperismo das rochas bandadas. Não é possível dizer que um contato litológico seja a fonte desta grande variação dos valores encontrados na área de interesse, já que em toda área dos perfis foi encontrado um único tipo litológico.

O mapa de distribuição dos valores de susceptibilidade magnética será comparado mais à frente com os mapas gerados pelo método magnetométrico.

9.6 Método Magnetométrico

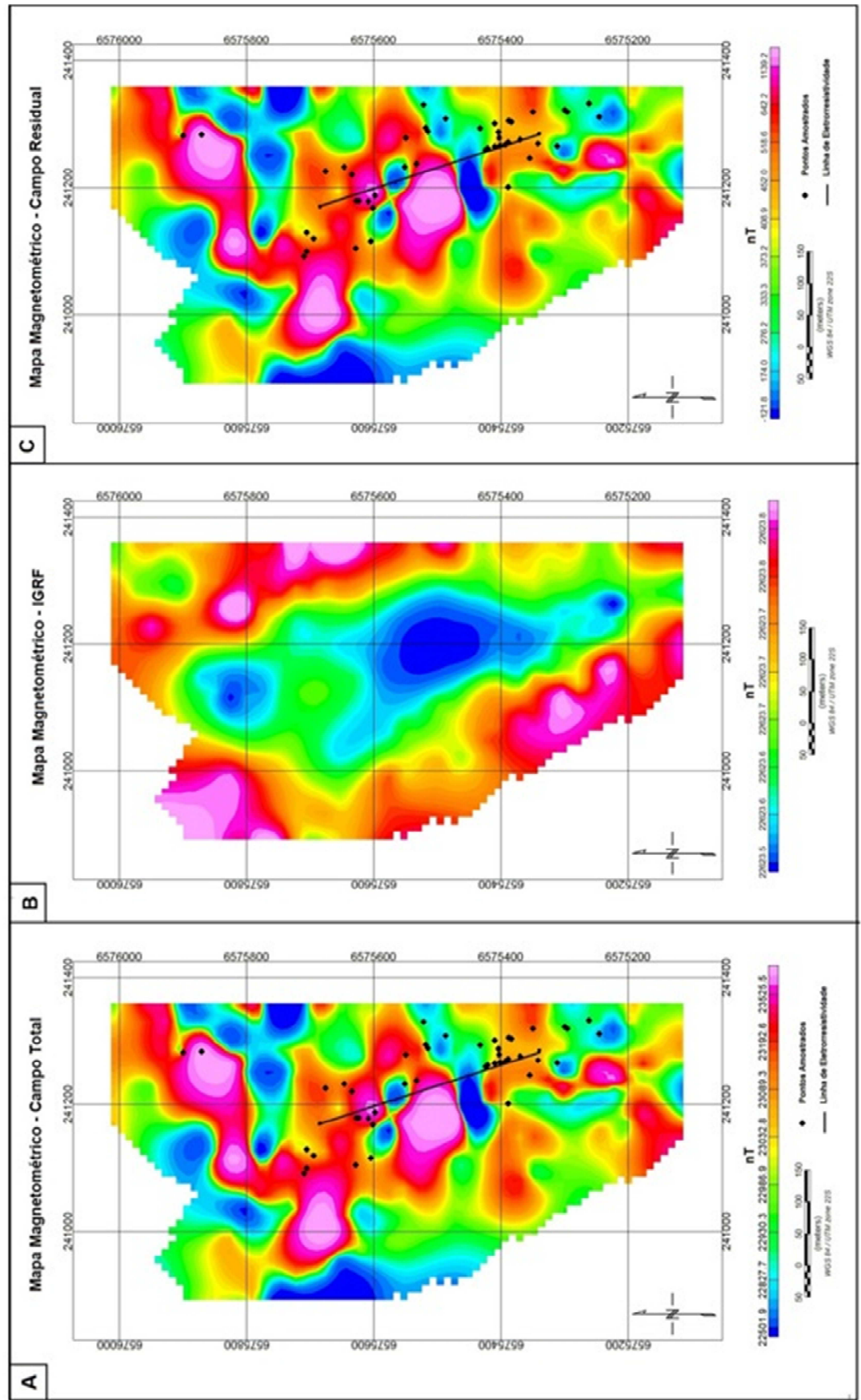
Todo o procedimento de tratamento dos dados magnetométricos foi realizado por meio do software Oasis Montaj da GEOSOFT Inc., que fornece subsídios para a elaboração dos mapas e o processamento dos dados adquiridos. Após gerar o *grid*, é possível gerar o mapa dos valores de campo magnético anômalo total baseado nos dados obtidos nas estações magnetométricas em campo (Figura 22). A partir do mapa de campo magnético total é possível realizar processamentos mais específicos a fim de obter a melhor distribuição e visualização das anomalias da área de interesse.

9.6.1 Remoção dos valores de IGRF

A fim de atribuir maior precisão à aquisição é necessário remover a porção regional do campo em estudo (IGRF), fornecendo assim o chamado campo residual, produzido exclusivamente pelos corpos alvo de interesse (Figura 22). Por isso, em muito dos casos as interpretações e modelagens magnetométricas são realizadas com base em dados residuais.

Em todos os mapas magnetométricos gerados, foi utilizada interpolação pelo método da mínima curvatura, sistemas de coordenadas UTM - zona 22 sul do meridiano de Greenwich, e elipsoide de referência WGS 84 para a América do Sul.

Figura 22 – (A) Mapa magnetométrico dos dados de Campo Magnético Total para a área de interesse; (B) Mapa do IGRF para a área de estudo; (C) Mapa Magnetométrico residual, gerado da subtração do IGRF dos valores de Campo Magnético Total.

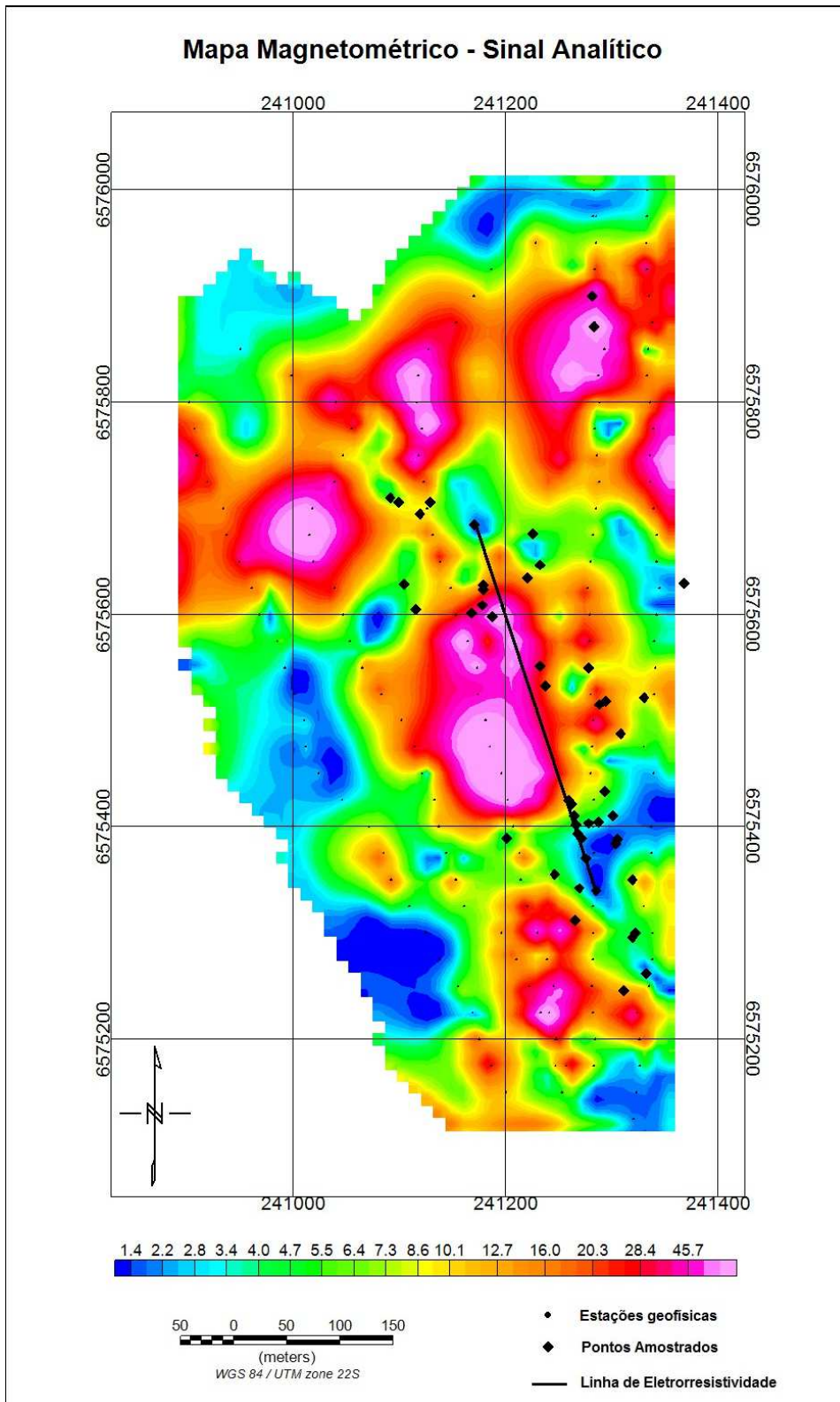


Como um dos objetivos deste trabalho é a interpretação do que pode corresponder a litologia bandada de interesse faz se justificável o mapa da amplitude de sinal analítico (Figura 20).

9.6.2 Transformação do Campo Total – Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

Com base no mapa de amplitude do sinal analítico é possível uma aproximação e interpretação referente à presença de feições anômalas na área de interesse. Analisando os mapas magnetométricos é possível perceber que as anomalias significativas ocorrem ao longo de toda área e concentram-se principalmente ao norte e na região central, assim como sugere a interpretação pela técnica da Susceptibilidade Magnética.

Figura 19- Mapa Magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico, empregado com a finalidade de facilitar a interpretação geológica com base nos valores de campo magnético.



(Oasis Montaj, GEOSOFT Inc)

10 INTEGRAÇÃO DE DADOS

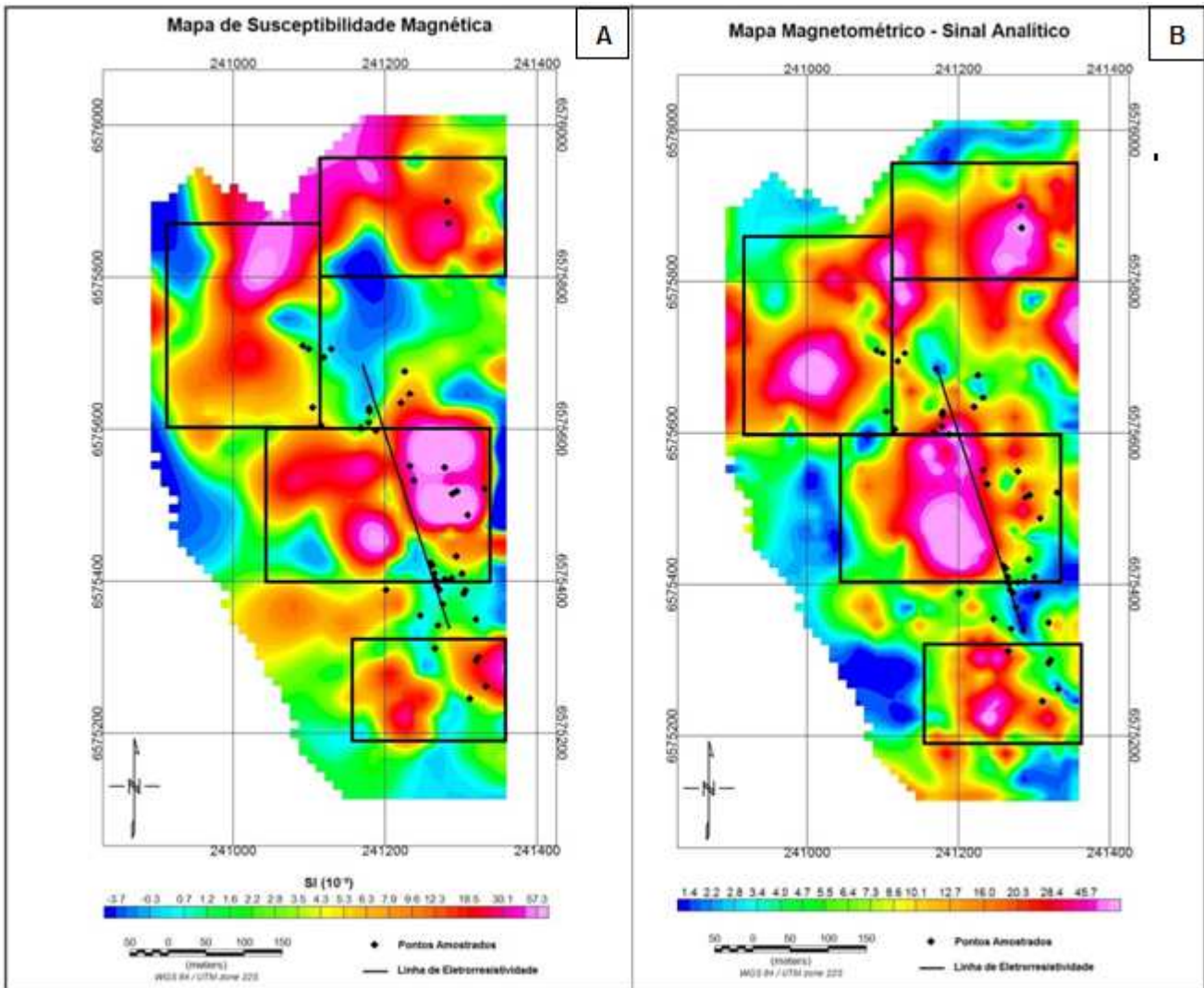
No que tange à integração de dados multifontes para mapeamento geológico, não existe uma técnica que contemple a complexidade dos diversos tipos de rochas e suas alterações intempéricas (MOREIRA e ILHA, 2011). Atualmente a comunidade acadêmica vem trabalhando com o intuito de gerar novas metodologias e procedimentos que auxiliem na definição de domínios definidos nestes dados e que se correlacionem espacialmente com a unidade litológica, esteja ela alterada ou não.

A integração dos resultados de cada método geofísico adquirido na área de estudo possibilita uma compreensão mais completa do depósito de minério de ferro bandado em superfície e em profundidade.

A comparação dos métodos de aquisição que mais se sustentam é a dos valores de susceptibilidade magnética e o mapa magnetométrico de amplitude de sinal analítico. A observação da distribuição dos altos relevantes é perfeitamente correlacionável em ambos os métodos (Figura 24). Vale ressaltar que a susceptibilidade foi realizada com base em dados de superfície e os dados magnetométricos a partir de dados que detalham profundidade. Essa afirmação ressalta que é possível que se realize estudos geofísicos com base em dados de susceptibilidade magnética.

A correlação dos mapas de distribuição para os dados de susceptibilidade magnética e dos corpos geológicos ressaltados pelo mapa magnetométrico da amplitude do sinal analítico reforça ainda mais a existência de um corpo em profundidade, com valores magnéticos anômalos que é detectável também em superfície, já que até mesmo o solo exposto carrega consigo características desta anomalia magnética em profundidade.

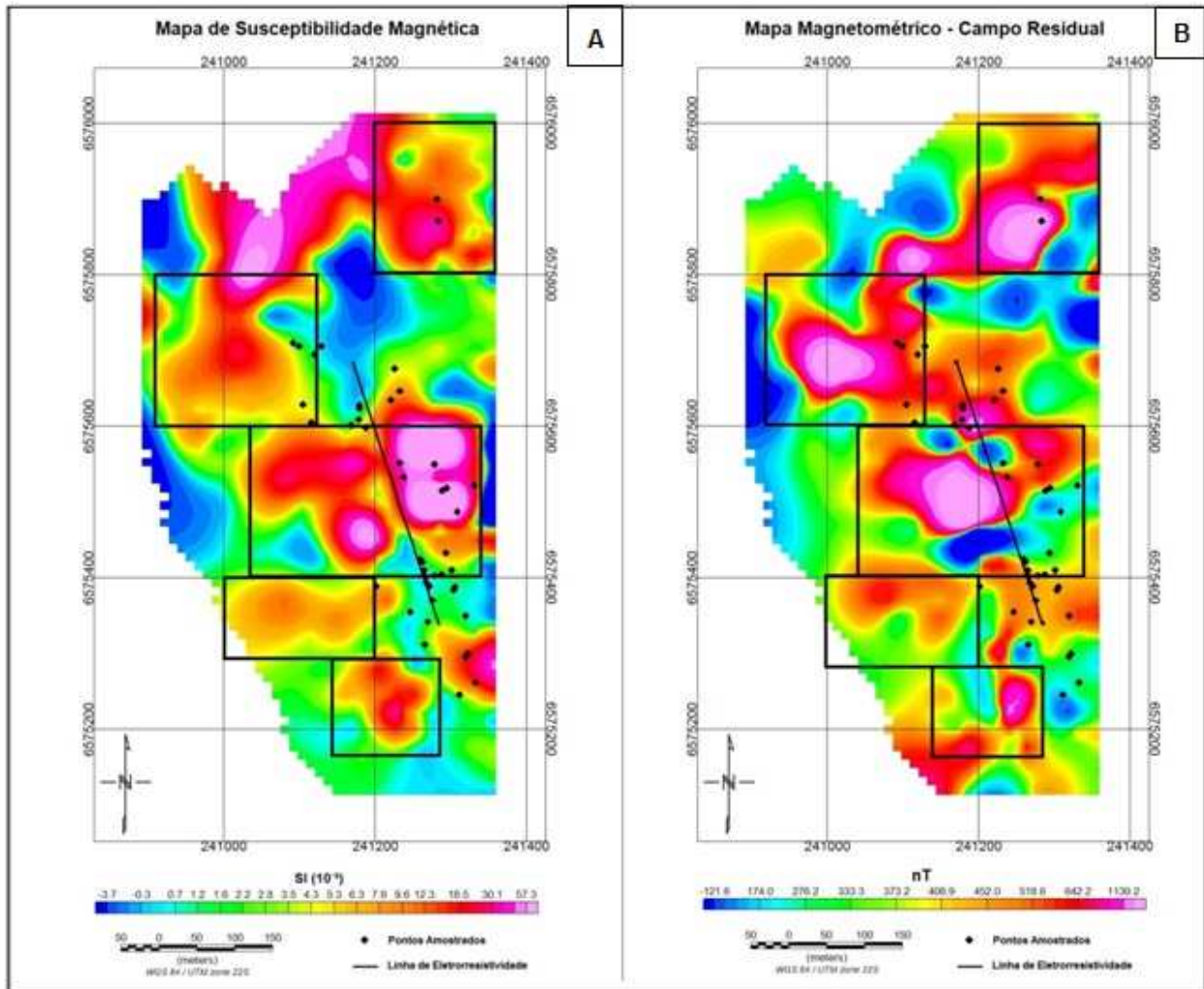
Figura 20 - Correlação dos métodos geofísicos da susceptibilidade magnética (A) e do método magnetométrico para a amplitude do sinal analítico (B). Os retângulos servem para facilitar a correlação.



(Oasis Montaj, GEOSOFT Inc)

De modo similar, é possível correlacionar os dados adquiridos para susceptibilidade magnética com os dados de campo magnético residual, que ressaltam os valores magnéticos do corpo anômalo em subsuperfície (Figura 25).

Figura 21 – Correlação dos resultados de susceptibilidade magnética e dos resultados do método magnetométrico para o campo residual. Os retângulos servem para facilitar a correlação.



(Oasis Montaj, GEOSOFT Inc)

Com base primeiramente nas informações adquiridas para cada método e posteriormente na tentativa de correlacioná-los é possível que se delimite, para cada método empregado, a provável distribuição do corpo de interesse (Figuras 26 e 27).

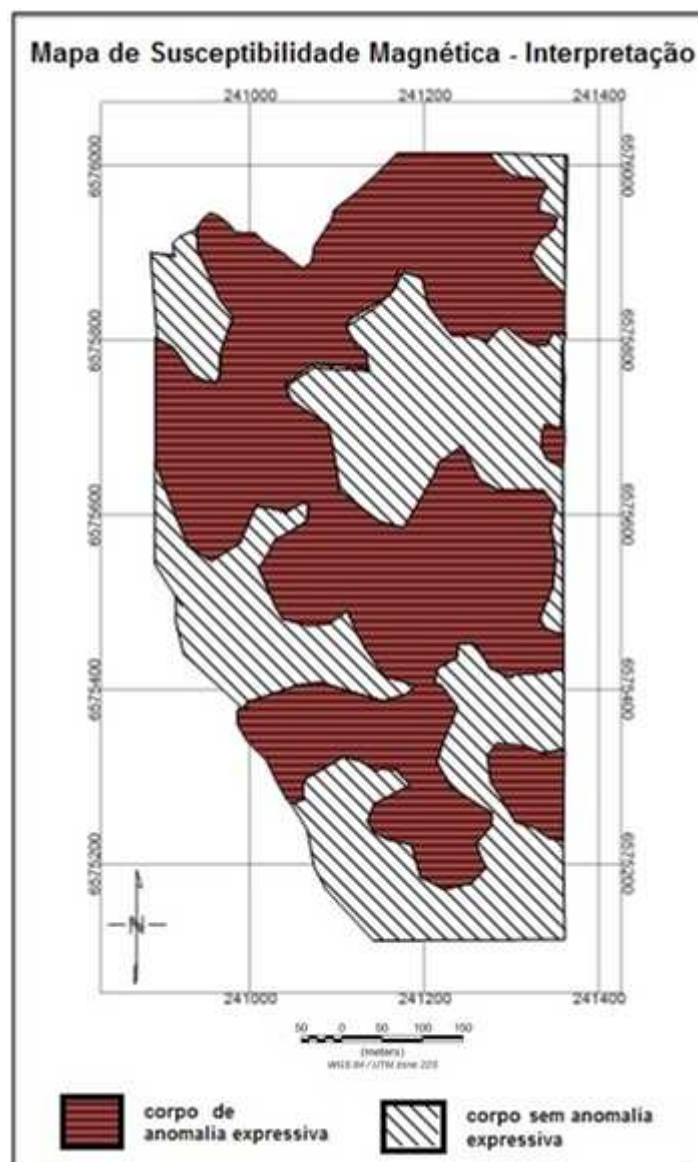
Com base na interpretação da linha eletroresistiva produto da técnica do caminhamento elétrico em arranjo Wenner-Schlumberger, é possível estimar a espessura da litologia de minério de ferro bandado.

Ocorrem, ao longo do alcance da linha, espessuras que variam de aproximadamente 60 metros de espessura máxima e 25 metros de espessura mínima. Em geral, essa variação das espessuras se deve ao fato de serem consideradas apenas as porções do perfil em que se observava o corpo litológico de ferro sem alteração expressiva. As espessuras menos

essivas estão justamente abaixo das grandes porções de rocha alterada por processos de intemperismo. De modo geral a espessura média, para a linha realizada, é de aproximadamente 50 metros.

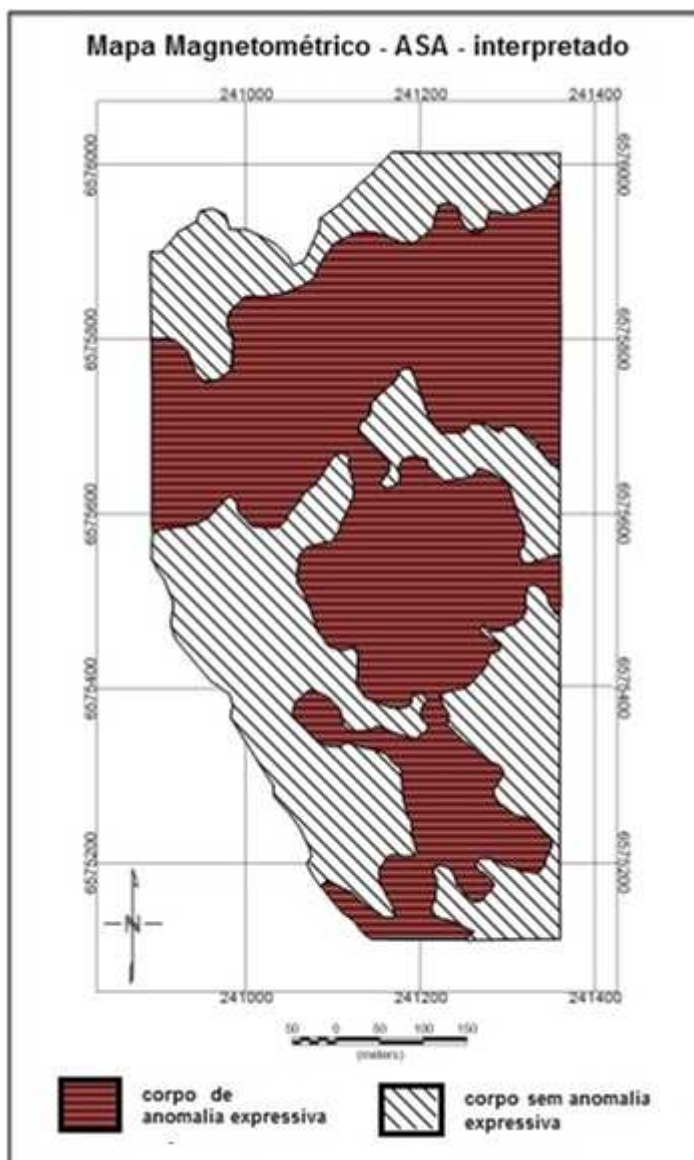
Outra informação pertinente que pode ser observada ao longo da interpretação da linha eletrorresistiva é sua distribuição de modo tabular, ocorrendo como um corpo espesso, sem grande sinuosidade, como já era esperado para uma formação ferrífera bandada. Tais características apontadas a partir da interpretação do perfil eletrorresistivo são imprecindíveis na compreensão das viabilidades econômicas de extração mineral.

Figura 22 – Interpretação do provável corpo mineral de interesse para o método geofísico da Susceptibilidade Magnética.



(Surfer, Golden Software)

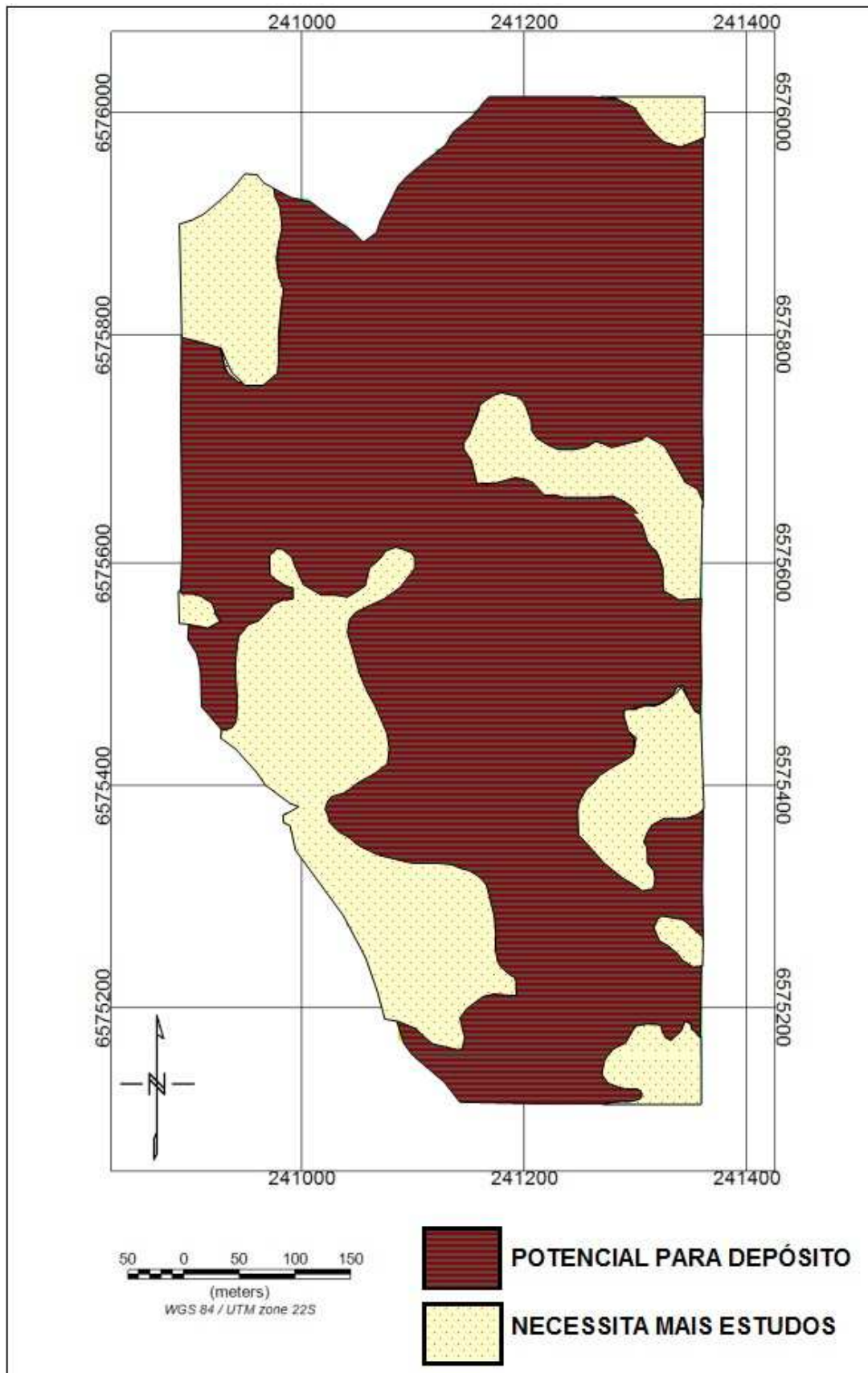
Figura 23 - Interpretação do provável corpo mineral de interesse para o método geofísico magnetométrico da Amplitude do Sinal Analítico.



(Surfer, Golden Software)

A partir da integração destes dados, é possível que se configure um modelo de distribuição do minério de ferro bandado para a área de estudo, como mostra a figura 25.

Figura 24 – Interpretação para as regiões com potencialidade para depósito de minério de ferro com base em dados geológicos e geofísicos de susceptibilidade magnética e magnetométrico.



11 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da integração dos dados dos métodos geofísicos da eletrorresistividade, do método magnetométrico e da técnica da susceptibilidade magnética, relativos a controles de superfície e subsuperfície, foi possível o delineamento da formação ferrífera para a área de estudo.

Os altos valores de Susceptibilidade magnética ($\times 10^{-3}$ SI) foram correlatos aos altos valores do método magnetométrico (nT) e, a partir destes dados, se delimitou as áreas de ocorrência mineral.

Quanto ao tratamento dos dados aplicados ao método magnetométrico de campo total, é possível dizer que se demonstraram apropriados para a identificação de feições anômalas. As medidas de susceptibilidade magnética realizadas, serviram como subsídio para complementar o mapeamento dos aspectos geológicos da área visando a delimitação de depósito de interesse mineral.

A partir do perfil eletrorresistivo obteve-se a espessura média para a litologia de interesse, que é de aproximadamente 50 metros. Para os fins de exploração, a informação de uma espessura média é de total relevância na viabilidade ou não do depósito. Segundo interpretação, o corpo mineralizado rico em ferro em profundidade ocorre de modo tabular, sendo suas porções próximas à superfície as mais intemperizáveis e alteradas. Na seção gerada, os produtos de alteração do corpo rico em ferro são representados pelos mais altos valores de resistividade elétrica 1658 à 4261 [Ω .m], oriundos da alta resistividade dos minerais silicáticos que acabam predominando a litologia com a oxidação dos óxidos de ferro. Do mesmo modo, os valores de baixa resistividade que variaram de 14.8 a 251 [Ω .m], foram interpretados como sendo a litologia características de interesse, do tipo formação ferrífera bandada.

Através de técnicas de processamento e realce aplicados em dados de aquisição geofísica para a técnica da susceptibilidade magnética e para os métodos magnetométrico e eletrorresistivo, usuais ao setor mineral de prospecção, foi possível definir critérios suficientes para a avaliação preliminar do depósito de ferro.

Tendo em vista o quase inexistente estudo na região de interesse, quanto à aplicação de métodos geofísicos, geoquímicos e até mesmo de reconhecimento geológico, considera-se válido que os estudos na região prossigam em todos estes vieses de investigação. O conhecimento geoquímico desta litologia seria de relevância extrema na compreensão das

potencialidades do local, principalmente quanto aos conteúdos de ferro presentes na litologia. A sucessão estratigráfica do Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro também é uma lacuna importante na compreensão geológica local e, estudos neste sentido poderiam auxiliar nas interpretações genéticas deste depósito.

O adensamento de uma malha de linhas de eletrorresistividade paralelas proporcionaria informações acerca de uma provável espessura média para o depósito. Conjuntamente com o mapa de delimitação da área de potencial mineral é possível cubar o depósito.

12 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. O cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F. F.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth Science reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ASSIS, L. M. D. **Geração de Modelo Exploratório para o Minério de Ferro da Província Mineral de Carajás Através da Integração de Dados Multifonte**. Universidade de Brasília - UNB. Brasília. 2013.
- BITENCOURT, M. A. F. S.; NARDI, & L. V. S. Tectonic setting and sources of magmatism related to the southern Brazilian shear belt. **Revista brasileira de geociências**, Porto Alegre, v. 30, p. 184-187, 2000.
- BLAKELY, R. J. **Potencial Theory in Gravity & Magnetic Applications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996. 441 p.
- BLUM, M. L. B. **Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 229. 1999.
- BORBA, A. W. et al. U-Pb zircon and ⁴⁰Ar-³⁹Ar K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Marica Formation: Constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. **Basin Research**, 2008.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro - SP**. UNESP. Rio Claro, p. 173. 1997.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos Geoeletricos Aplicados: Módulo: Hidrogeologia**. Universidade Estadual Paulista-UNESP. Rio Claro. 1999.
- CAMOZZATO, E.; LOPES, R. C. **Mapa geológico da Folha Ulha Negra- SH.22-Y-C-I**. CPRM. Porto Alegre. 2013. Escala 1:100.000.
- CARRINO, T. A.; FILHO, C. R. S.; LEITE, E. P. Processamento e integração de imagens multiespectrais, de radar e aerogeofísicos do bloco Serra Leste (Carajás, PA) e discussão do potencial para mineralizações de ferro. **Revista Brasileira de Geofísica**, p. 123-140, Maio 2008.
- CHEMALE-JR, F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, M.; ROS, L. F. D. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Instituto de Geociências UFRGS, 2000.

CHEMALE-JR, F.; TAKEHARA, L. **Minério de Ferro: Geologia e Geometalurgia.** Metalurgia, Materiais e Mineração. Série Fundamentos. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, v. 1, 2013.

CPRM. COMPANIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Porto Alegre. 2007. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000.

DAVINO, A. Magnetismo anômalo de alguns depósitos de ferro supérgenos de Minas Gerais. **Boletim IG-USP**, São Paulo, v. Vol. 5, p. 57-64, Dezembro 2015.

DOOR, I.; VAN, N. physiographic, stratigrafic and structural development of Quadrilatero Ferrífero, Minas gerais, Brazil. **U.S Geol. Survey**, n. 641-A, p. 109, 1969.

DYMEK, R. F.; KLEIN, C. Chemistry, petrology and origin of iron formations lithologies from 3800 Ma Isua supracrustal belt, west Greenland, 1988.

FERNANDES, C. E. D. M. **Fundamentos de Prospecção Geofísica.** Rio de Janeiro: Interciência, 1984. 190 p.

FERNANDES, G. A.; RENNER, L. C.; PULZ, G. **Resultados Preliminares de Susceptibilidade Magnética Aparente dos Litotipos da Mina Elias Zeca, Vila Palma, RS.** Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, UFRGS. Porto Alegre. 2001.

FERNANDES, L. A. D. et al. **Evolução Tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Riograndense. Parte II: Uma contribuição a partir de assinaturas geofísicas.** [S.l.], p. 375-384. 1995.

FERNANDES, N. H.; CARVALHO, S. G.; FERNANDES, T. M. G. As Formações Ferríferas do Morro do Ferro no Sudoeste do estado de Minas Gerais. **Rev. de Geol.**, v. 17, n. 1, p. 7-21, 2004.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. O cráton Rio de la Plata e o Cinturão Dom Feliciano no escudo Uruguaio-Sul-Riograndense. **Congresso Brasileiro de Geologia**, Balneário Camburiu, v. 5, p. 2879-2892, 1980.

GIACOMELI, H. **As Formações Ferríferas Bandadas de Piumhi: Geologia, Petrografia e Caracterização Tecnológica.** Universidade Estadual Paulista. Rio Claro , p. 159. 2011.

GOÑI, J. C.; GOSO, H.; HISSLER, R. S. Estratigrafia e Geologia Econômica do Pré-Cambriano e Eopaleozóico uruguaio e sul rio-grandense. In: _____ **Avulso da Escola de Geologia.** Porto Alegre: UFRGS, 1962.

HARTMANN, L. A.; F. CHEMALE-JR, R. P. PHILLIP. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré Cambriano. In: R. IANNUZZI, J. C. F. **50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, 2007. p. 97-123.

- HARTMANN, L. A.; L.V.S; NARDI. Os granitos Santo Afonso, Saibro e Vauthier da região do arroio Santa Maria Chico, Dom Pedrito, RS - Geologia, Petrografia e Química de elementos maiores com interpretação geotectônica. **Acta Geologia Leopoldensia**, São Leopoldo, v. 6, n. 12, p. 153-178, 1982.
- HEILBRON, M. et al. Brasileiro orogens in southeast and south Brazil. [S.l.]: [s.n.], v. 14, 2004. Cap. 4.
- HISE, C. R. V.; LEITH, C. K. **The geology of the Lake Superior region**. [S.l.]: United States Geology Survey Monograph, v. 52, 1911. 641 p.
- IGLESIAS, C. M. F.; MACEDO, D.; CHIARELLI, F. **Projeto Lavras do Sul, Geologia da faixa IV**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 290. 1980.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Métodos Geoeletricos. Apostila interna**. São Paulo - SP, p. 70. 1988.
- JAMES, H. L. Sedimentary facies of the iron formation.. **Bulletin of the Society of Economic Geologists**, Littleton, 49, n. 3, 1954. 235-293.
- JOST H., A. L. HARTMANN. Província Mantiqueira: Setor Meridional. **O pré Cambriano no Brasil**, São Paulo, p. 345-368, 1984.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3. ed. United Kingdom: Blackwell Publishing Company, 2002.
- LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; NARDI, L. V. S. O Vulcanismo Neoproterozóico Ordoviciano no Escudo Sul-rio-grandense: os ciclos vulcânicos da Bacia do Camaquã. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. **50 anos de Geologia**. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade , 2007. p. 79-95.
- LIMA, R. G.; ARCHANJO, C. J.; JÚNIOR, J. W. P. M. & G. M. Anomalias de susceptibilidade magnética no batólito granítico de Teixeira (Província da Borborema) Nordeste do Brasil e sua relação com a zona de cisalhamento de Itapetim. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 685-692, 2000.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics**. Cambridge. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.
- LUIZ, J. G.; SILVA, & L. M. C. **Geofísica de prospecção**. Universidade Federal do Pará. Belém. 1995.
- MOREIRA, C. A.; ILHA, L. M. Prospecção geofísica em ocorrência de Cobre localizada na Bacia Sedimentar do Camaquã (RS). **REM Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, p. 305-311, Julho-Setembro 2011.

- OLIVEIRA, A. M. et al. **Isótopos de Carbono em Filitos Carbonosos da Sequência Metavulcanossedimentar Marmeleiro, Sul de Ibaré, Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, p. 41-52. 2003. (ISSN 1518-2398).
- PAIM, P. S. G.; CHEMALE-JR, F.; R. C. LOPES. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M.; DEROS, L. F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 231-274.
- PEREIRA, A. M. **Prospecção Magnetométrica em Intrusiva Básica com Indícios de Mineralização Aurífera no Município de São Sepé - RS**. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, p. 70. 2014.
- PHILLIP, R. P.; MACHADO, R. The Neoproterozoic to Cambrian granitic magmatism of Pelotas batholith, southern Brazil. **Journal of South America Earth Science**, v. 14, p. 461-478, 2005.
- RENNER, L. C.; DIAS, K. D. N.; PULZ, G. M. **Magnetometria aplicada ao mapeamento geológico da Sequência Metavulcano-Sedimentar Marmeleiro, sul de Ibaré**. UFRGS. Porto Alegre. 2002.
- ROLIM, S. B. A. **Resposta geofísica dos depósitos de ouro da porção central do quadrilátero ferrífero, MG**. Unversidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 290. 2001.
- SALDANHA, D. L. **Características espectrais de unidades ultramáficas do sudoeste do Rio Grande do Sul: integração de dados orbitais, geobotânicos e geoquímicos**. UFRGS. Porto Alegre, p. 279. 2003.
- SALDANHA, D. L.; M. C. L. CUNHA, J. C. M. D. Identificação de Rochas Ultramáficas por Imagens Digitais TM - Landsat 5 no Escudo Sul-rio-grandense, RS. **Revista Pesquisas em Geociências, Instituto de Geociências, UFRGS**, Porto Alegre, v. 35, p. 21-26, julho 2008.
- SALVI, M. M. **Geologia e Significado tectônico do Complexo Batoví, Terreno Taquarembó, Cinturão Dom Feliciano, São Gabriel-RS**. Instituto de Geociências. Porto Alegre, p. 61. 2014.
- SALVI, M. M. **Geologia e Significado Tectônico do Complexo Batovi, Terreno Taquarembó, Cinturão Dom Feliciano, São Gabriel-RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 61. 2014.
- SATO, E. N. **Proposta Metodológicasobre dados de geofísica aeroportada na prospecção de minério de ferro: Indicação de ambientes geológicos propícios e geração de mapa de**

probabilidade na região de Curral Novo do Piauí (PI). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

SILVA, F. G. D. Aquisição magnetométrica na caracterização de feições geológicas e estruturais da ocorrência de cobre de Capão Grande, Município de Caçapava do Sul, RS. Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul - RS, p. 68. 2010.

SIVIERO, R. S. Petrografia e Geoquímica aplicado ao aproveitamento industrial de mármore da região do Arroio Marmeleiro, Torquato severo, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 131. 2001.

TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, p. 372. 2004.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. & K. D. A.. Applied Geophysics. Cambridge University. Cambridge, p. 869. 1976.

UFRGS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Mapeamento geológico 1:25.000 de parte da folha Lavras do Sul (MI2995/3): Projeto Lavras do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.l.]. 2004.