

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FILIPÍ GODINHO VEIGA

**MAGNETOMETRIA TERRESTRE NO AUXÍLIO À DETECÇÃO DE ZONAS
MINERALIZADAS CONTENDO HEMATITA – PORÇÃO NOROESTE DO GRANITO
SANTOS FERREIRA, CAÇAPAVA DO SUL-RS**

**Caçapava do sul
2018**

FILIPI GODINHO VEIGA

**MAGNETOMETRIA TERRESTRE NO AUXÍLIO À DETECÇÃO DE ZONAS
MINERALIZADAS CONTENDO HEMATITA – PORÇÃO NOROESTE DO GRANITO
SANTOS FERREIRA, CAÇAPAVA DO SUL-RS**

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

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Fries.

**Caçapava do sul
2018**

G585m Godinho, Filipi

MAGNETOMETRIA TERRESTRE NO AUXÍLIO À DETECÇÃO DE ZONAS
MINERALIZADAS CONTENDO HEMATITA - PORÇÃO NOROESTE DO GRANITO
SANTOS FERREIRA, CAÇAPAVA DO SUL-RS / Filipi Godinho.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2018.

"Orientação: Maximilian Fries".

1. Geofísica. 2. Magnetometria . 3. Técnicas de
processamento. 4. Integração Geofísica/Geológica. 5. Granito
Santos Ferreira. I. Título.

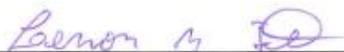
**MAGNETOMETRIA TERRESTRE NO AUXÍLIO À DETECÇÃO DE ZONAS
MINERALIZADAS CONTENDO HEMATITA – PORÇÃO NOROESTE DO GRANITO
SANTOS FERREIRA, CAÇAPAVA DO SUL-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso para
obtenção de nota parcial da disciplina
(TCC I) do Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa.

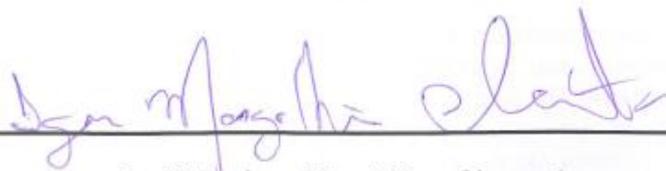
Banca examinadora:



**Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador UNIPAMPA**



**Prof. Mr. Lenon Melo Ilha
UNIPAMPA**



**Profª. Dr. Igor Magalhães Clemente
UNIPAMPA**

UNIPAMPA

Dedico esse trabalho a mãe Vera Lucia e ao meu pai Delmar, que sempre acreditaram no meu futuro e que me proporcionaram tudo de melhor para que eu chegasse aonde eu cheguei. Amo muito vocês.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me iluminar nos momentos ruins e bons.

A minha família, principalmente a minha mãe Vera Lucia, meu pai Delmar e minha irmã Bianca por estar lado a lado nessa caminhada e por me servir como exemplo.

Aos meus amigos que sempre me impulsionam e são fonte de muito ensinamento de vida, Fabiano Madrid, Gabriel Brinhol, Adriano Chaves, Ricardo Ferreira, Silvano Ferreira, Vinicius Rosa, Hamilton Reis, Lenon Ilha, Renan Cardoso, John Gorayski, Hugo Hruby, Gabriel Pacheco, Everton Guedes, Rodrigo Rockenbach, Guilherme Madrid, Cassiano Casanova, Patrick Garcia, Paulo Roberto, Hernanes Firmo, Matheus Silva, Roger Menezes, Cassiano Dias, Willian Rosa, Mateus Fernandes, Claudia Marques, Thayane Barbosa, Amanda Borges, Isabela Moreira, Camila Casado, Natalia Pinheiro, Victoria Ximenes, Aline Barbosa, Lissa Cunha, Marieli Zago, Carolina Chaves, Clenia Vargas, Karina Colares.

A Bruno Machado o qual foi desbravador de estudos anteriores nas proximidades de Caçapava do Sul, e por prestar grande auxílio para que pudesse dar seguimento a sua pesquisa na Região do Granito Santos Ferreira.

Gostaria de agradecer a Gledson Pereira, amigo que não se faz mais presente aqui na Terra, mas sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis e sei que está a iluminar de onde estiver.

Agradeço os professores os quais me passaram muito conhecimento, mas em especial ao Prof. Dr. Maximilian Fries que me ajudou a chegar até aqui me proporcionando muito aprendizado.

A pessoa a qual é grande exemplo e sempre procurou transmitir a importância do respeito e humildade, meu Mestre de capoeira, Mestre Ali e aos irmãos dessa Arte.

Também a uma pessoa muito especial a que mostrou que a vida tem um propósito maior que bens materiais, obrigado Horrana Vargas.

Meu avô que não se encontra mais presente fisicamente, mas o qual foi exemplo de pessoa por sua personalidade legendária e ilumina meus caminhos para que eu continue caminhando entre os obstáculos da vida.

Palavras estas não são nada além de
pensamentos, logo se não estão no
plano da realidade irrelevantes são.
(Renan Cardoso).

RESUMO

O Escudo Sul Rio-grandense é reconhecido por geocientistas por sua importância como testemunho da evolução geológica do continente e formação rochosas aflorantes remanescentes. Na exploração mineral é reconhecido pelas mineralizações de Cu e Au, que foram intensamente estudadas desde o início do século passado com o descobrimento de cobre em Caçapava do Sul nas hoje denominadas Minas do Camaquã e de ouro no município de Lavras do Sul. Além das ocorrências de Cu e Au, também foram identificados depósitos de hematita (Fe) e cassiterita (dióxido de estanho SnO₂). Dentre as ocorrências de hematita, foram descritos depósitos de pouca concentração (baixos teores) e localizados ao longo de estruturas (veios). Estes foram mapeados em superfície ao longo de falhas e fraturas do Granito Santos Ferreira. Uma caracterização mais detalhada e em subsuperfície dos limites desses corpos e sua articulação com a rocha encaixante (granito) e estruturas associadas é importante. Foi realizado nesse estudo uma aquisição magnetométrica ao longo das principais estruturas condicionantes da ocorrência tendo como principal objetivo detectar as principais estruturas (fraturas\falhas) e corpo rochoso (ocorrência do mineral hematita). A análise a partir de técnicas de processamento e realce, interpretação e integração dos dados geofísicos com a geologia estrutural fornecerão subsídio para modelos incrementando as informações existentes permitindo novas interpretações das continuidades dos corpos, profundidade e distribuição da concentração de minério. Através dessa abordagem foi possível interpretar os resultados obtidos e apontar regiões anômalas coerentes a estruturas e mudanças litológicas em subsuperfície provenientes de ocorrências mineralizadas.

Palavras-chave: Integração Geofísica/Geológica, Magnetometria, Técnicas de processamento, Exploração Geofísica.

ABSTRACT

The Rio-grandense South Shield is recognized by geoscientists for their importance as a testimony to the continent's geological evolution and remaining rocky outcroppings. In the mineral exploration is recognized by the mineralization of Cu and Au, which have been intensely studied since the beginning of the last century with the discovery of copper in Caçapava do Sul in the now called Minas do Camaquã and gold in the municipality of Lavras do Sul. In addition to the occurrences of Cu and Au, deposits of hematite (Fe) and cassiterite (tin dioxide SnO₂) were also identified. Among the occurrences of hematite, deposits of low concentration (low levels) and located along structures (veins) were described. These were mapped on surface along faults and fractures of Santos Ferreira granite. A more detailed and subsurface characterization of the boundaries of these bodies and their articulation with the nesting rock (granite) and associated structures is important. This study proposes a magnetometric acquisition along the main conditioning structures of the occurrence with the main objective of detecting the main structures (fractures \ faults) and rocky bodies (occurrence of the mineral hematite). The analysis of the techniques of processing and enhancement, interpretation and integration of the geophysical data with the structural geology will provide subsidy for models by increasing the existing information allowing new interpretations of the continuities of the bodies, depth and distribution of the ore concentration.

Key words: Geophysical integration geology, Magnetometry, Processing techniques, Granite Santos Ferreira.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, principais rodovias e acessos.....	16
Figura 2. Mapa com a compartimentação geotectônica do Escudo Sul Rio-Grandense.....	17
Figura 3. Mapa geológico da porção oeste do ESRG com ênfase no Domínio São Gabriel e da área de estudo.....	18
Figura 4. Mapa geológico simplificado da Bacia do Camaquã.....	19
Figura 5. Contexto geológico regional, com ênfase nas principais unidades geológicas.....	20
Figura 6. Contexto geológico local, com ênfase nas principais feições geológicas, área de estudo e área de aquisição geofísica do estudo (retângulo).....	21
Figura 7. Amostras coletadas em campo em trincheira. a) Rocha com hematita e ocorrência de malaquita na sua composição. b) predominância de hematita e c) visualização da trincheira onde a mineralização é observada no local.....	23
Figura 8. As componentes geomagnéticas (KEAREY, 2002).....	25
Figura 9. Histograma com os valores médios e intervalos de suscetibilidade de tipos de rochas mais comuns. (Baseado em Dobrin & Savit, 1988).....	27
Figura 10. Magnetômetros de precessão de prótons modelo GSM-19 da GEM SYSTEMS.....	30
Figura 11. Granito Santos Ferreira a) no contexto regional e localização das mineralizações, em b) perfis realizados neste estudo e em c) detalhe da litologia e perfis magnetométricos.....	31
Figura 12. Valores médios de inclinação, inclinação e datum utilizados para melhor consistência no processamento de dados (NOAA, 2018).....	32
Figura 13. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 1.....	34
Figura 14. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo	

Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 2.....	34
Figura 15. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 3.....	34
Figura 16. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 4.....	35
Figura 17. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 5.....	35
Figura 18. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 6.....	35
Figura 19. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 7.....	35
Figura 20. Mapa de isovalores do <i>Campo Magnético Anômalo Total</i> da área;.....	36
Figura 21. Mapa de isovalores de Campo Magnético Anômalo Total submetidos a <i>Redução ao Polo</i> na área.....	37
Figura 22. Mapa de isovalores de Campo Magnético Anômalo Total submetidos a <i>Amplitude do Sinal Analítico da área</i>	38
Figura 23. Modelo Digital de Terreno Alos Palsar com sobreposição da imagem de aérea da área.....	39
Figura 24. Modelo Digital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, Campo Magnético Anômalo Total.....	40
Figura 25. Modelo Digital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, <i>Redução ao Polo</i>	40

Figura 26. Modelo Digital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, Amplitude do Sinal Analítico.....	41
Figura 27. Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Redução ao Polo.....	42
Figura 28. Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Amplitude do Sinal Analítico.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVO	16
2.1 Geral	16
2.2 Especificos	16
3 JUSTIFICATIVA	16
4 ÁREA DE ESTUDO	17
5 CONTEXTO GEOLÓGICO	18
5.1 Geologia Regional.....	18
5.2 Geologia local	21
6.FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO	25
6.1 Magnetometria	25
6.2 Campo Geomagnético	26
6.3 Magnetismo das Rochas.....	27
6.4 Processamento dos dados magnetométricos – técnicas de realce.....	28
Campo magnético Total:.....	28
Redução ao pólo:.....	29
Amplitude do Sinal Analítico	29
7 MATERIAIS E MÉTODOS	30
7.1 Levantamento de dados.....	31
7.2 Processamento	33
7.2.1 Dados brutos de campo – Correção Diurna e IGRF	33
7.2.2 Elaboração de Base de dados – magnetometria	34
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
8.1 Perfis	34
8.2 Mapas magnetométricos	37

8.3 Integração geofísica <i>versus</i> geologia – Mapas interpretativos	40
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
10 REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho utiliza dados magnéticos adquiridos em uma abordagem de campo na região conhecida como Granito Santos Ferreira (GSF). O estudo abrange uma área de aproximadamente 150 m², o qual recobre uma parte do corpo Granítico (GSF).

O Granito Santos Ferreira (GSF) encontra-se Próximo ao limite sudoeste da Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS), onde ao município de Caçapava do Sul, são registradas, também ocorrências de Fe e Cu segundo relatórios e mapas geológicos (e. g. LEINZ, BARBOSA & TEIXEIRA, 1941; RIBEIRO *et al.*, 1966; RIBEIRO, 1968; UFRGS, 1998; GAZZONI, 2010).

As mineralizações de caráter monoelementar ou polimetálicas de Cu-Pb-Zn (Au-Ag) desta província são hospedadas por rochas metamórficas criogenianas do Escudo Sul-rio-grandense e por sequências vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã, estando muitas delas especialmente associadas ao Granito Caçapava (REMUS, 1999). Estudos recentes (MACHADO, 2017) identificaram em mapeamento geológico (escala de 1:25.000) corpos mineralizados com hematita e malaquita no Granito Santos Ferreira (GSF). Esses estudos possibilitaram a identificação e delimitação em caráter preliminar dessas ocorrências.

Características importantes como a concentração, limites laterais e em profundidade dessas ocorrências são desconhecidas. O comportamento e principais direções das estruturas condicionantes a mineralização são, também escassas tanto em níveis superficiais como profundos. A investigação geofísica, a partir do método magnetométrico terrestre constitui uma abordagem indireta, rápida e não evasiva no complemento ao mapeamento geológico.

A magnetometria terrestre consiste em um método reconhecido e de eficácia na identificação de falhas e fraturas. Além de ter significativa resposta na detecção nos minerais presentes (hematita e malaquita). Dados magnetométricos quando integrados a geologia estrutural (mapeamento em escala de detalhe regional) consistem em importantes elementos para refinar e detalhar os limites litológicos e estruturas permitindo, também, estimar o comportamento das ocorrências minerais em profundidade.

2 OBJETIVO

2.1 Geral

A partir dos resultados, pretendia-se, especificamente:

- i) Caracterizar as estruturas condicionantes e direções preferenciais das ocorrências de Fe e Cu;
- ii) Detectar e delinear as principais direções de falhas e fraturas não conhecidas em mapeamentos de superfície;
- iii) Detectar zona anômalas correspondentes de ocorrência de Fe e Cu em outras regiões onde não a mineralização não é aflorante.
- iv) Identificar as variações faciológicas (minerais) da rocha hospedeira (granito) a partir das anomalias magnéticas;

2.2 Especificos

O objetivo específico deste trabalho foi contribuir ao conhecimento geológico/estrutural (mapeamento) do Granito Santos Ferreira por meio da magnetometria terrestre em escala de detalhe (1:10.000).

3 JUSTIFICATIVA

As ocorrências de corpos mineralizados (hematita/malaquita) foram mapeadas e caracterizadas por estudo geológico ao longo de todo corpo granítico Santos Ferreira (MACHADO, 2017) e geofísico localizado ao sul em escala de detalhe (PEREIRA, 2017) . Portanto uma caracterização geofísica por meio da magnetometria a partir de perfis atingindo a região mais central do corpo intrusivo onde também é encontrado um outro afloramento mineralizado, justifica este estudo.

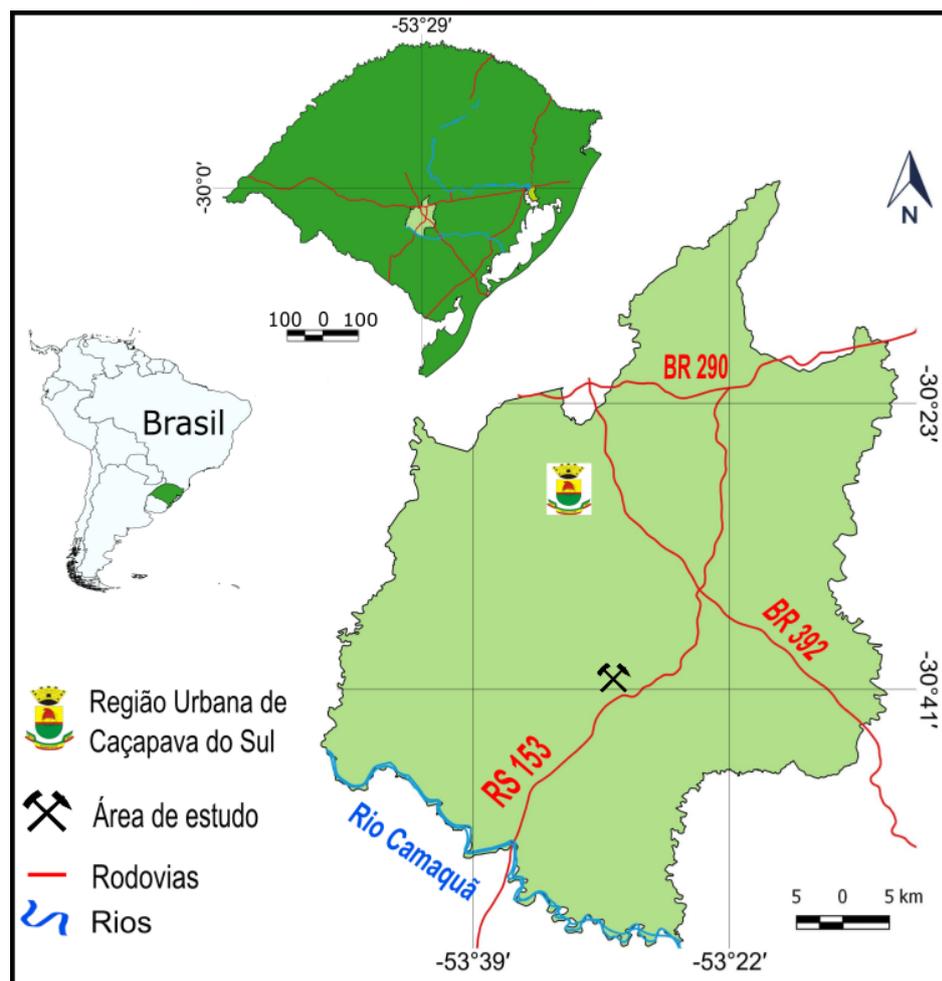
Dados geofísicos submetidos a técnicas de processamento e realce avançadas quando associados a um mapeamento geológico com base na geologia estrutural fornece subsídios quanto às concentrações de hematita e respectiva distribuição ao longo do corpo, através da sua assinatura magnética.

Proporciona, também, um refinamento da área por meio da melhor definição dos limites laterais e em profundidade das ocorrências (subsuperfície), onde até o momento não é citado a continuidade espacial da mineralização.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na porção sudeste do estado do Rio Grande do Sul. Dista 20 km a sudeste da área urbana do município de Caçapava do Sul. Da capital do estado, Porto Alegre, o acesso se dá pela via BR-290 no sentido oeste (Uruguaiana) até o entroncamento da RS-153. De Caçapava do Sul, o acesso se dá pela via BR-392, sentido sul a partir do entroncamento com a RS-153, até a o km 486 (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, principais rodovias e acessos.



Fonte: autor. Mapa elaborado com base de dados Shepefile (IBGE).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 Geologia Regional

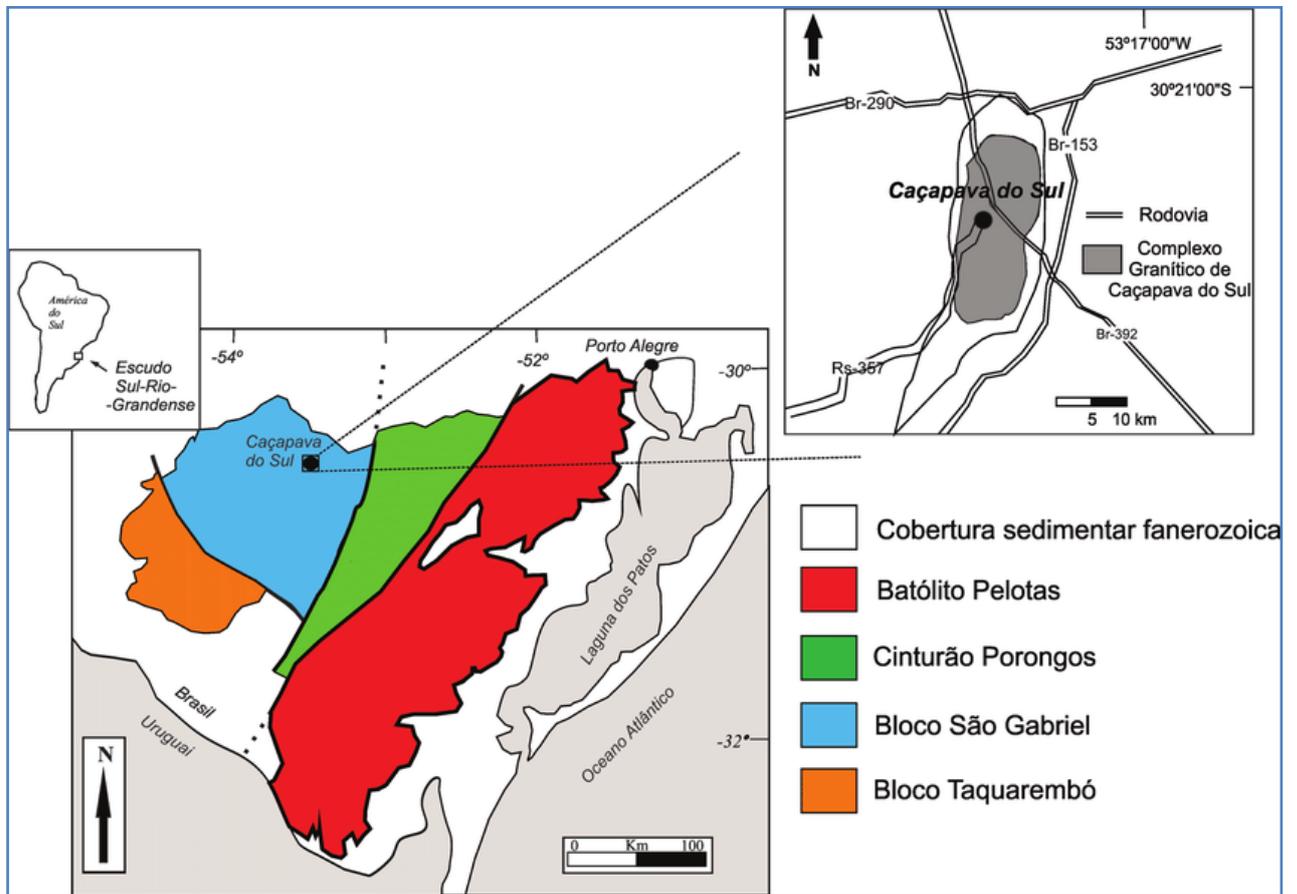
A área de estudo está inserida regionalmente no complexo geotectônico do denominado Escudo Sul-rio-grandense (ESRG), o qual representa parte da porção meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1981).

O ESRG é constituído de terrenos arqueanos a paleoproterozoicos (2,26-2,0 Ga) e unidades neoproterozoicas (900-535 Ma) relacionadas a dois ciclos orogênicos conhecidos, respectivamente, como Transamazônico e Brasileiro/Pan-Africano (FRAGOSO-CESAR, 1980; SOLIANI JR, 1986; HARTMANN, CHEMALE JR, PHILIPP, 2007).

Os grandes lineamentos regionais que seccionam o ESRG, de direções NE-SW e NW-SE, serviram como base para as primeiras compartimentações internas deste (*e. g.* PICADA, 1971; RIBEIRO & FANTINEL, 1978) e são até o presente momento parâmetros-chave dos modelos geotectônicos postulados. Lineamentos os quais estão associadas diversas ocorrências de mineralizações.

O complexo geológico (ESRG) é subdividido em quatro domínios definidos a partir de características estruturais, petrotectônicas e isotópicas, sendo estes os domínios Taquarembó, São Gabriel, Tijucas e Pelotas (HARTMANN; CHEMALE JR; PHILIPP, 2007; REMUS, 2000). (Figura 2).

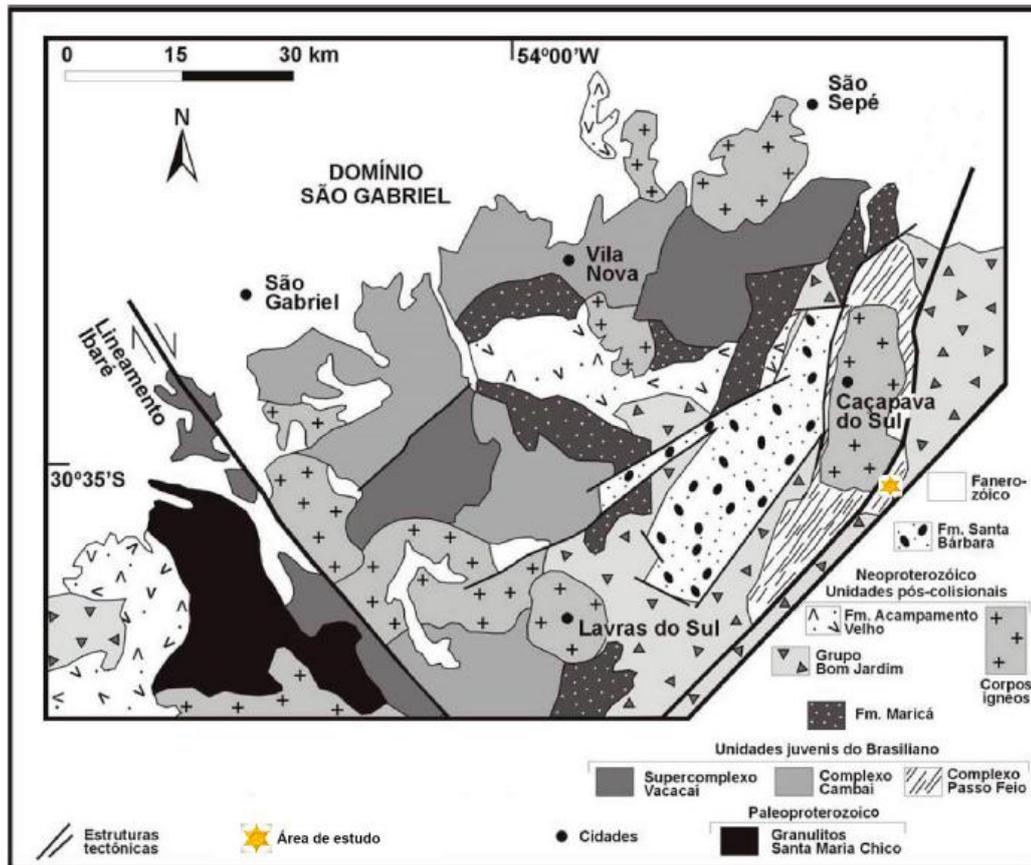
Figura 2 – Mapa com a compartimentação geotectônica do Escudo Sul Rio-Grandense.



Fonte: modificado de REMUS (2000).

O Domínio São Gabriel (DSG) está na porção oeste do Cinturão Dom Feliciano e limita-se a leste com o Domínio Tijucas, ao norte com a Bacia do Paraná e ao sul com o Domínio Taquarembó (CDF; HARTMANN; CHEMALE JR; PHILIPP, 2007). (Figura 3).

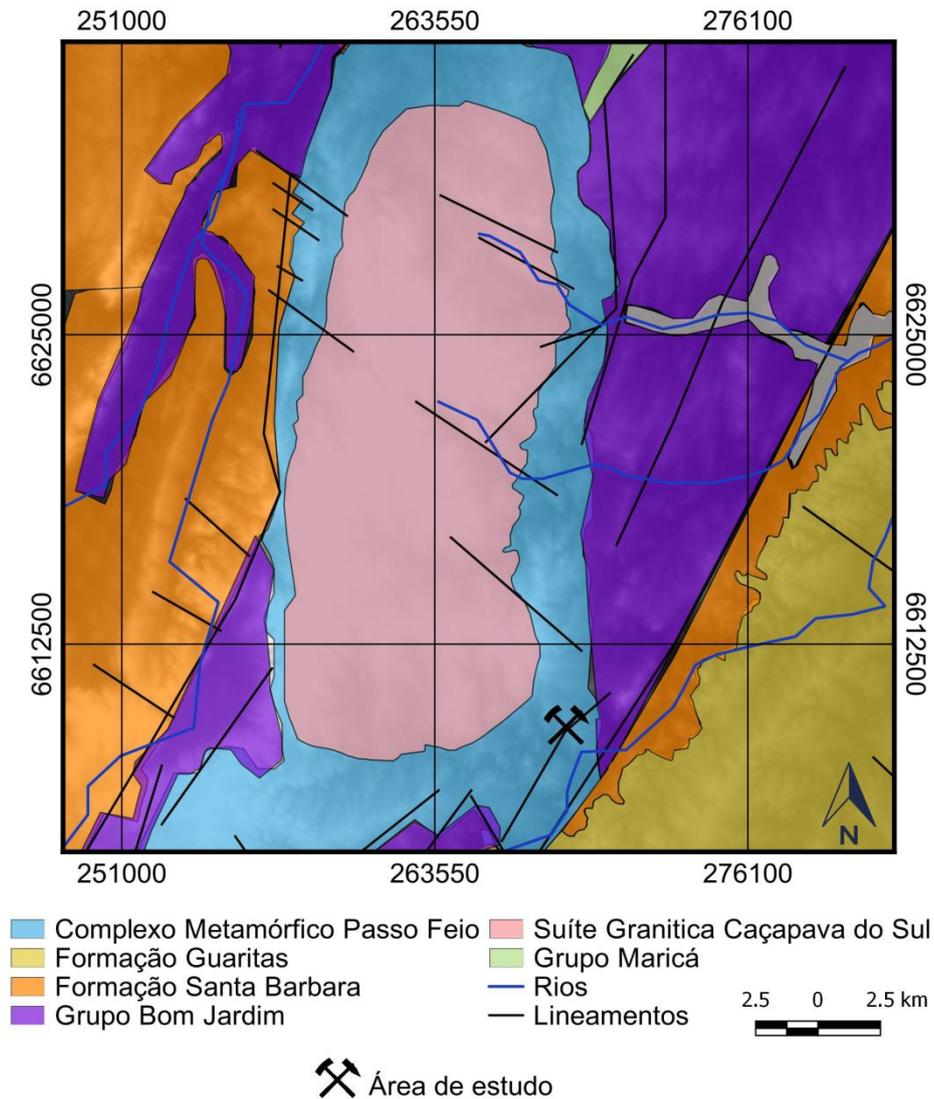
Figura 3 – Mapa geológico da porção oeste do ESRG com ênfase no Domínio São Gabriel e da área de estudo.



Fonte: modificado de BORBA; MARASCHIN; MIZUSAKI (2007).

As principais unidades do DSG são o Complexo Cambaí, que compreende rochas gnáissicas de composições variadas, e o Supercomplexo Vacacaí (CHEMALE Jr., 2000). O Supercomplexo Vacacaí é formado por uma série de complexos metamórficos, como o Complexo Palma/Bossoroca, o Complexo Cerro Mantiqueira e o Complexo Metamórfico Passo Feio, todos compostos por associações meta-vulcanossedimentares (CHEMALE Jr., 2000). Além dessas unidades, também ocorrem os grupos Maricá, Bom Jardim e Santa Bárbara da Bacia do Camaquã e corpos ígneos intrusivos (BORBA; MARASCHIN; MIZUSAKI, 2007) (Figura 4).

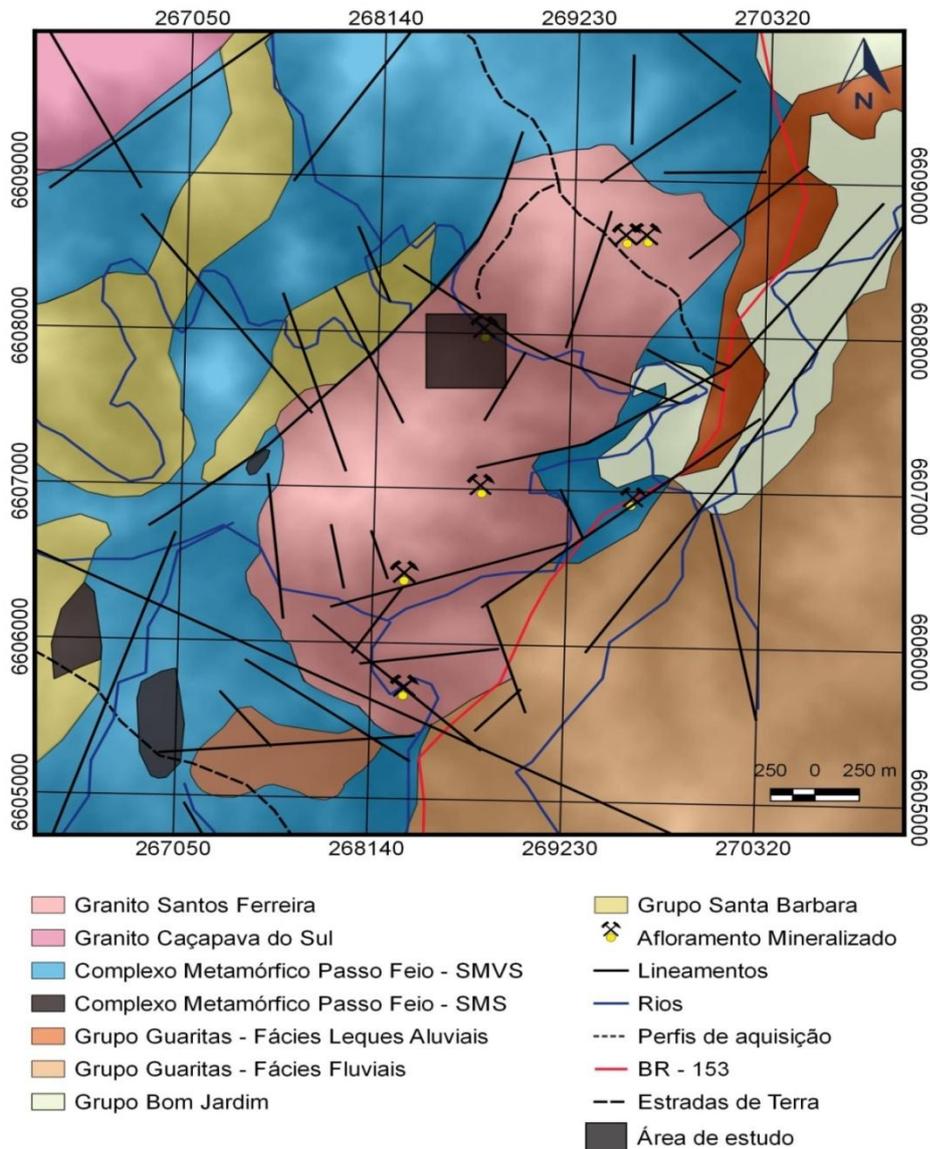
Figura 4 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Camaquã.



Fonte: modificado de CPRM (2013).

Posteriormente em continuidade das atividades de mapeamento e pesquisas na região de Caçapava do Sul, Ribeiro (1970) define formalmente o GSF como unidade litodêmica (*stock*) da seguinte forma: “O Granito Santo Ferreira é um pequeno “stock” a sudeste de Caçapava e em tudo similar ao mesmo, sendo nada mais do que uma de suas protuberâncias. Penetra com relações de intrusão nas rochas da Formação Vacacaí, desenvolvendo nelas metamorfismo de contato do fácies anfibolítico, e é capeado em seu bordo leste, em pequenas secções pelas Formações Santa Bárbara e Guaritas. As mesmas relações do Granito de Caçapava são válidas para o “stock” Santo Ferreira. Este nome foi tirado do proprietário das terras em que esta massa granítica se situa.”

Figura 6 – Contexto geológico local, com ênfase nas principais feições geológicas, área de estudo e área de aquisição geofísica do estudo (retângulo).



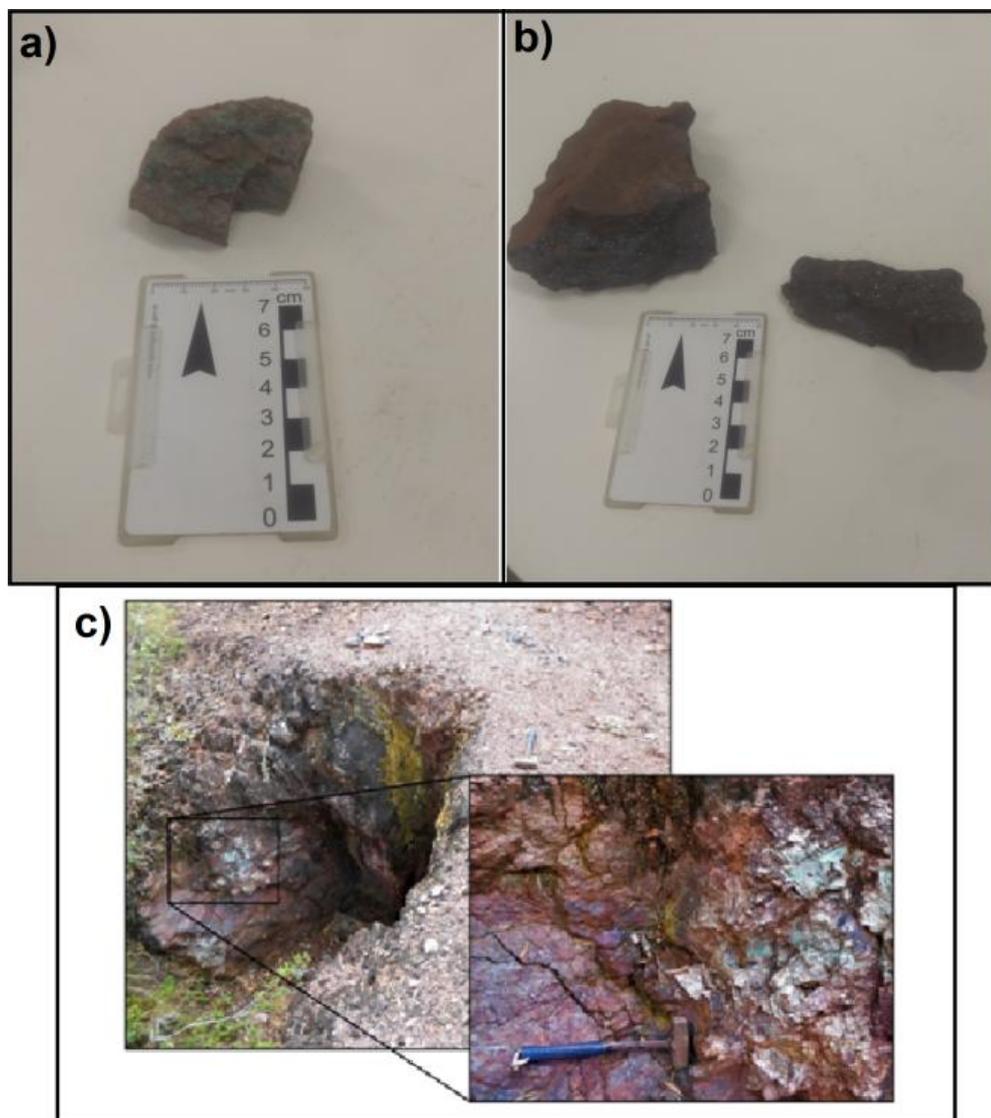
Fonte: modificado de UFRGS (1999) e MACHADO (2017).

Reproduz em menor escala as mesmas feições geológicas observadas no Granito Caçapava (GC), este último com idade de cristalização (U-Pb por SHRIMP em zircão) de 562 ± 8 Ma obtida por Remus *et al.* (1999). A proximidade geográfica entre o GSF e o GC, aliada a semelhanças petrográficas, geoquímicas, estruturais e geocronológicas permitiram os agrupar em uma só unidade (BITENCOURT, 1983; NARDI & BITENCOURT, 1989; SARTORI & KAWASHITA, 1989; UFRGS 1998).

O GSF mostra relações de intrusão com os metassedimentos do Supercomplexo Vacacaí e é recoberto pelas formações Santa Bárbara e Guaritas a norte e a leste (SARTORI; KAWASHITA, 1989; MACHADO *et al.*, 2017)

Conforme UFRGS (1998), veios de hematita estão restritos a borda do corpo e possuem de 2 cm a 60 cm. Ocorrem preenchendo fraturas de direção NW-SE e concordante aos planos de foliação da rocha encaixante. No local deste estudo há uma trincheira onde é possível se observar os veios do minério hematita na rocha (Figura 7).

Figura 7 – Amostras coletadas em campo em trincheira. a) Rocha com hematita e ocorrência de malaquita na sua composição. b) predominância de hematita e c) visualização da trincheira onde a mineralização é observada no local.



Fonte: Autor e modificado de MACHADO (2017).

A concentração de hematita ao longo destas fraturas, segundo os autores acima citados, é explicada como remobilização do ferro derivado da Formação Guaritas, o que explicaria sua ocorrência preferencialmente em fraturas oriundas das rochas sedimentares dessa unidade

6.FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO

6.1 Magnetometria

A magnetometria consiste no método geofísico que mede a variação do campo magnético terrestre (CMT) causada pela susceptibilidade magnética dos materiais (minerais e rochas). O campo magnético secundário originado pela interação do campo magnético primário com rochas presentes na crosta terrestre causa perturbações no CMT sendo estas, detectadas pelo sensor (magnetômetro).

É um método geofísico muito utilizado na exploração mineral e, também empregado em estudos geológicos associados à ocorrência de corpos ferrosos (SOARES, 2001). Tem como base medir o campo magnético secundário originado pela interação do campo magnético primário com rochas presentes na crosta terrestre.

A equação fundamental que rege a magnetometria traz como resultado o valor do campo Magnético medido B resultante da soma entre as seguintes componentes.

$$B = IGRF + V_D + C_C \quad (6.1.1)$$

IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), referente ao valor médio do campo magnético regional.

V_D Variável relacionada as variações diurnas do campo magnético terrestre empregadas ao fluxo de partículas carregadas dentro da ionosfera em direção aos polos magnéticos.

C_C Componente resultante do campo magnético secundário produzido pela interação do campo magnético terrestre com formações geológicas e suas estruturas presente na crosta Terrestre.

A unidade de medida internacional para as “pequenas” anomalias magnéticas causadas por rochas presente na crosta é o nanotesla (nT) (KEAREY, 2002).

Quando um material é submetido a um campo magnético H (campo aplicado), é originado um campo de magnetização do material, M (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). O campo de indução magnética gerado, B , é proporcional à soma de H e M . O fator de proporcionalidade é a permeabilidade magnética no vácuo, μ_0 (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

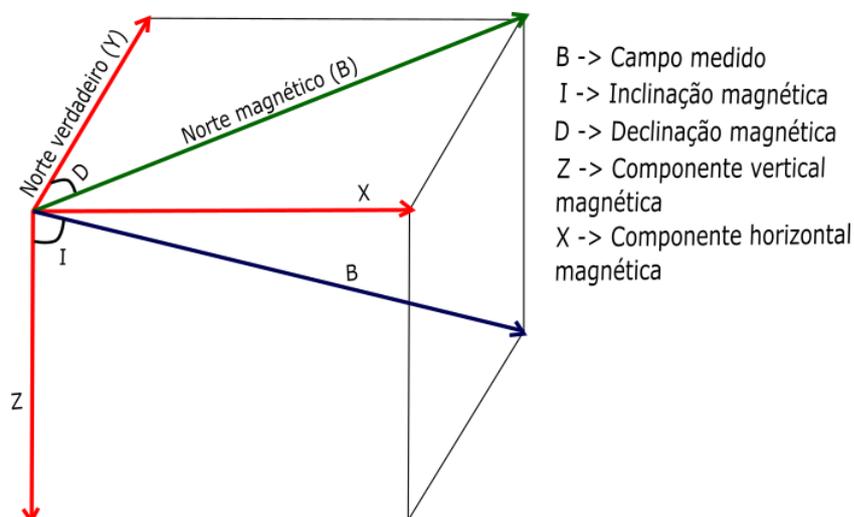
$$B = \mu_0 (H + M) \quad (6.1.2)$$

6.2 Campo Geomagnético

As anomalias magnéticas causadas por rochas são efeitos localizados que se superpõem ao campo magnético real da Terra (campo geomagnético). O conhecimento do comportamento do campo geomagnético é importante para a interpretação das anomalias resultantes.

O campo geomagnético é geometricamente mais complexo que, e exibe variações irregulares em orientação e magnitude com a latitude, a longitude e o tempo. Uma medida magnética geralmente é dada por um vetor *campo total* B tem uma componente vertical Z e uma componente horizontal H na direção do norte magnético. O mergulho de B é a *inclinação* I do campo, e o ângulo horizontal entre o norte geográfico e o magnético é a *declinação* D , como mostra a Figura 8.

Figura 8. As componentes geomagnéticas (KEAREY, 2002).



Fonte: modificado de Kearey, 2002.

O campo magnético médio é definido a cada 5 anos e denominado de *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). É definido como campo magnético médio não perturbado em qualquer ponto da superfície da Terra. Num levantamento magnético aplicado á prospecção, o IGRF é usado para remover dos dados magnéticos medidos em uma área a fim de corrigir as variações magnéticas atribuíveis a esse campo médio ao longo do período.

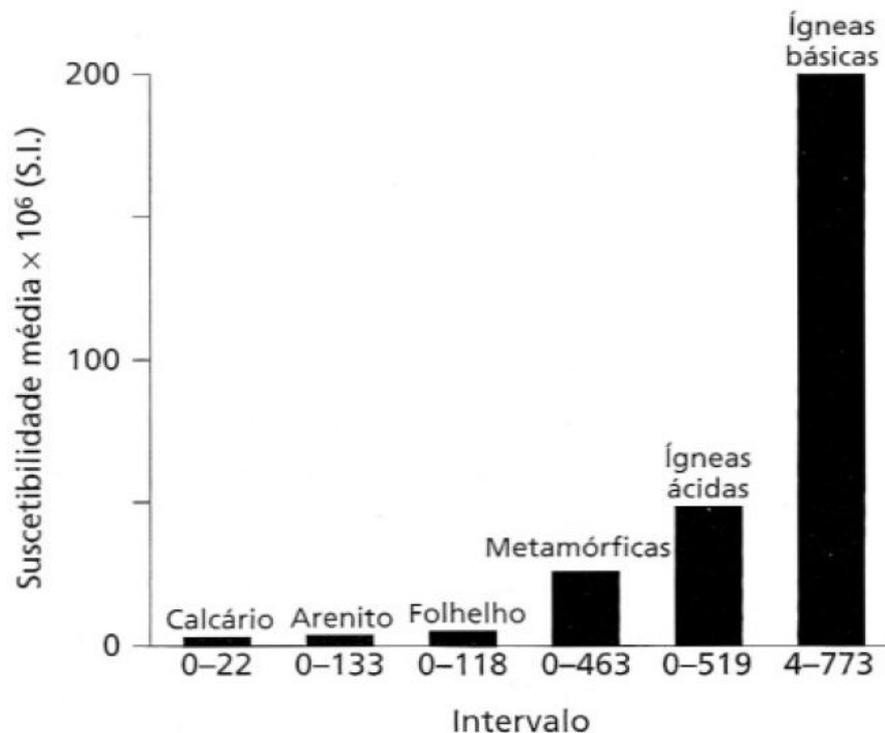
Os efeitos magnéticos de origem externa fazem com que o campo geomagnético varie diariamente, produzindo as *variações diurnas*, que consiste em uma variação suave e regular. Essa variação resulta do campo magnético induzido pelo fluxo de partículas carregadas dentro da ionosfera em direção aos polos magnéticos, já que ambos os padrões de circulação e as variações diurnas se modificam em sintonia com os efeitos de maré do Sol e da Lua (KEAREY, 2002).

6.3 Magnetismo das Rochas

Os minerais formadores de rocha mais comuns exibem uma suscetibilidade magnética muito baixa, e as rochas devem seu caráter magnético à proporção geralmente baixa de minerais magnéticos que contêm (Figura 9).

As rochas ígneas básicas são, em geral, altamente magnéticas em razão de seu conteúdo relativamente alto em minerais contendo ferro em sua composição cristalina. Causas comuns de anomalias magnéticas incluem diques, *sills* (ou soleiras) e fluxos de lava falhados, dobrados ou truncados, intrusões de maciços básicos, embasamentos de rochas metamórficas e corpos de minério de ferro.

Figura 9. Histograma com os valores médios e intervalos de suscetibilidade de tipos de rochas mais comuns. (Baseado em Dobrin & Savit, 1988).



Fonte: Kearey, 2002.

6.4 Processamento dos dados magnetométricos – técnicas de realce

Anomalias magnéticas sobrepõem o campo geomagnético natural variando tanto a amplitude quanto a direção do campo resultante medido. É importante que sejam feitas correções a fim de que sejam eliminados os efeitos da Variação Diurna do Campo Magnético e posteriormente para se atenuar ruídos causativos nos dados medidos.

Após a correção dos dados adquiridos no levantamento de campo foram aplicadas as técnicas de processamento e realce a fim de se observar o caráter das anomalias magnéticas associadas às litologias, estruturas e mineralizações envolvidas.

A ordem de apresentação dos dados e técnicas utilizadas foram:

Campo magnético Total: Visa detectar mudanças do contexto mineralógico das fontes causativas em diferentes níveis de profundidade. Possibilita localizar contatos geológicos e estruturas.

A equação que rege esse processamento é:

$$B_T = B_x + B_y + B_z \quad (6.4.1.1)$$

Sendo:

B_T Valor do campo magnético total;

B_x Valor do campo magnético na direção x;

B_y Valor do campo magnético na direção y;

B_z Valor do campo magnético na direção z.

Redução ao pólo: Técnica de realce e otimização da detecção de limites da fonte causativa. Ao ser empregada atenua o efeito de fontes rasas, e apresenta maior resolução lateral das anomalias magnéticas observadas referentes a fontes causativas encontradas em subsuperfície (SILVA, 1986).

A equação que rege esse processamento é:

$$L(\theta) = \frac{\text{sen}(I) - \text{icos}(I) \cdot \cos(D - \theta)^2}{[\text{sen}^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cdot \cos(D - \theta)] \cdot [\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos(D - \theta)]} \quad (6.4.2.1)$$

Onde I é a inclinação magnética, Ia é a inclinação da correção de amplitude, D é a declinação magnética e θ é a direção do número de onda.

Amplitude do Sinal Analítico: O filtro Amplitude do Sinal Analítico auxilia como ferramenta para obter informações sobre geometria da fonte anômala observada (NABIGHIAN, 1972, 1974). O principal resultado ao aplicar a técnica de realce é o destaque de características como limites de bordas das anomalias magnéticas.

Calcula-se o efeito através do domínio do número de onda, como forma do calculo de derivadas dos dados trabalhados originais trabalhados (ROEST *et al.*, 1992).

A equação que rege esse processamento é:

$$|A(x, y)| = \left[\left(\frac{\partial B}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial Z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.4.3.1)$$

Onde:

$\frac{\partial B}{\partial X}$ Derivada em x do campo magnético na direção total;

$\frac{\partial B}{\partial Y}$ Derivada em y do campo magnético na direção total;

$\frac{\partial B}{\partial Z}$ Derivada em z do campo magnético na direção total.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo proposto foram realizadas as seguintes etapas:

a) Escritório:

Revisão bibliográfica (trabalhos anteriores na área, fundamentação teórica do método, trabalhos geológicos envolvendo o tema);

Mapas geológicos/estruturais de escala regional (CPRM 1999);

Mapas geológicos/estruturais – escala de detalhe (mapeamento básico do curso de Geologia/UNIPAMPA);

Dados aerogeofísicos(Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul, (CPRM, 2010) e, geofísicos terrestres em diferentes escalas;

Base de dados digitais – SIG (Aster, CPRM, IBGE, NASA, outros.);

Integração dos dados magnetométricos, geológicos e estruturais em uma base SIG;

Processamento bruto dos dados magnetométricos;

Processamento avançado/técnicas de realce aplicadas aos dados magnetométricos,

Geração mapas litogeofísicos– integração das anomalias detectadas processadas a geologia, estruturas e limites reconhecidos nos mapeamentos geológicos prévios.

b) Campo:

Mapeamento geológico/estrutural sucinto no local a fim de caracterizar as principais estruturas identificadas e direções preferenciais destas;

Realização de perfis geológicos com direções seccionando perpendicularmente as principais estruturas e direções identificadas;

Aquisição de 7 perfis geofísicos (magnetométricos – estações medidas) perpendicularmente as principais estruturas e direções identificadas; (GPS) para localização das estações medidas.

7.1 Levantamento de dados

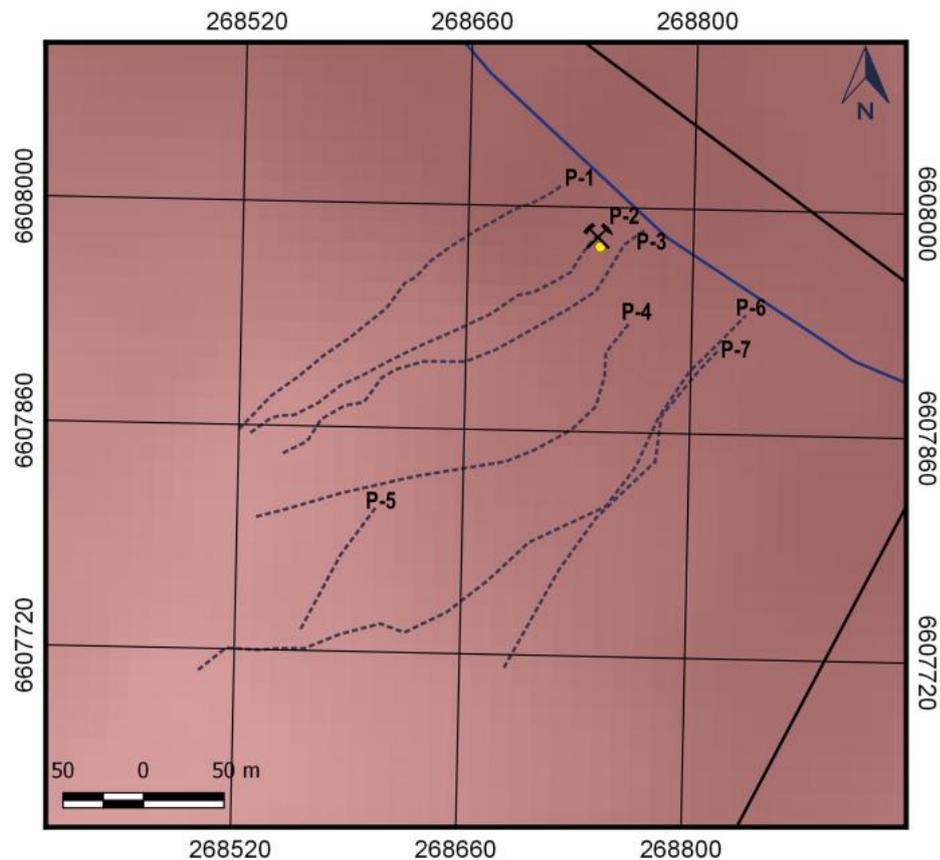
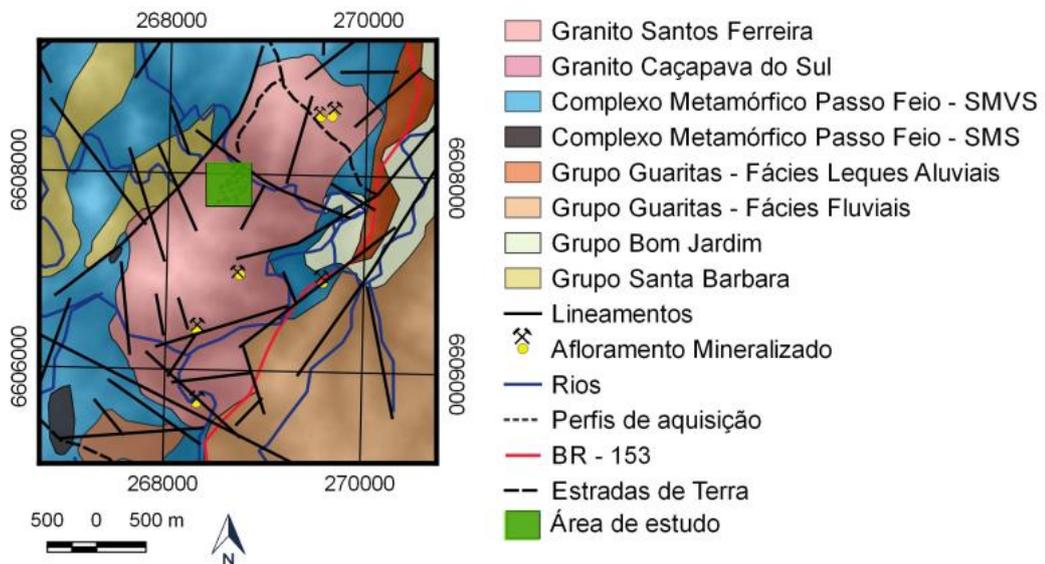
Na aquisição magnetométrica foram utilizados dois magnetômetros de precessão de prótons modelo GSM-19 da GEM SYSTEMS (Figura. 7). A aquisição dos dados em campo foi realizada nos dias 08 de Julho e 29 de agosto de 2018 juntamente com o georreferenciamento dos pontos medidos ao longo dos perfis com o GPS de mão da marca Garmin modelo MAP62CS. (Figura 10).

Figura 10. Magnetômetros de precessão de prótons modelo GSM-19 da GEM SYSTEMS.



Fonte: autor.

Figura 11. Mapa detalhado da área de estudo a) no contexto regional e localização das mineralizações, em b) perfis realizados neste estudo e em c) detalhe da litologia e perfis magnetométricos.



Fonte: modificado de UFRGS (1999) e MACHADO (2017).

7.2 Processamento

7.2.1 Dados brutos de campo – Correção Diurna e IGRF

Os valores obtidos pelo magnetômetro base foram inicialmente subtraídos das leituras feitas pelo magnetômetro móvel. Essa correção foi efetuada tendo como variável de referência a hora da amostragem, fixada com precisão de 60 segundos.

A remoção do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) foi efetuada com base na tendência do comportamento do campo geomagnético internacional observado onde se encontra a área de estudo. Valores de inclinação / declinação magnética e datum magnético foram retirados da base de dados (NOAA), (Figura 12).

Figura 12. Valores médios de inclinação, declinação e datum utilizados para melhor consistência no processamento de dados (NOAA, 2018).

Model Used:		IGRF12					
Latitude:		30.638824° S					
Longitude:		53.412966° W					
Elevation:		0.0 km GPS					
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2018-06-08	-15.1456°	-39.2376°	17,386.2 nT	16,782.3 nT	-4,542.6 nT	-14,198.9 nT	22,447.5 nT
Change/year	-0.1661°/yr	-0.2358°/yr	-81.7 nT/yr	-92.0 nT/yr	-27.3 nT/yr	-52.6 nT/yr	-30.0 nT/yr

Fonte: www.ngdc.noaa.gov (2018).

7.2.2 Elaboração de Base de dados – magnetometria

Foram geradas planilhas com os dados tendo-se cada perfil as informações de posicionamento (x e Y), anomalias magnéticas (z) e hora exata da aquisição (Tabela 1).

Tabela 1. Base de dados magnetométricos adquiridos neste estudo.

Ponto	X	Y	Dados (nT) Bruto
1	268790	6608880	22462.02
2	268704	6607873	22459.37
3	268780	6608867	22459.00
4	268777	6607860	22454.47
5	268772	6607855	22456.64
6	268768	6607851	22454.34
7	268764	6607848	22449.84
8	268760	6607840	22451.63
9	268757	6607835	22451.71
10	268754	6607830	22453.10

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 Perfis Magnéticos

A partir Base de Dados elaborada e respectivos processamentos, foram gerados para os sete perfis medidos, separadamente, um gráfico contendo as seguintes informações:

- Variação do Campo Magnético Total medido (CMAT);
- Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidas à Redução ao Polo (RTP);
- Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidas à Amplitude do Sinal analítico (ASA).

As Figuras de 13 a 19 apresentam as variações magnetométricas na área juntamente com as técnicas empregadas.

Figura 13. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 1.

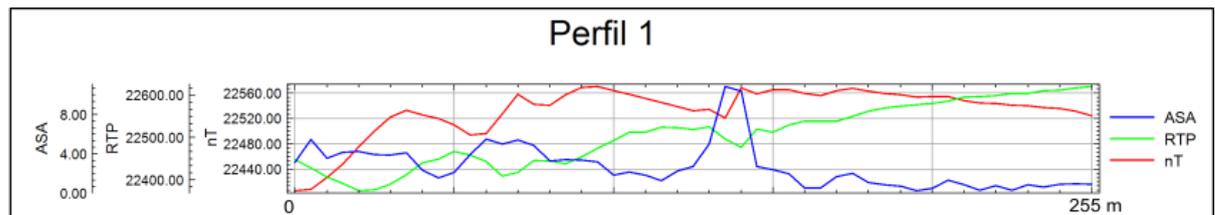


Figura 14. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 2.

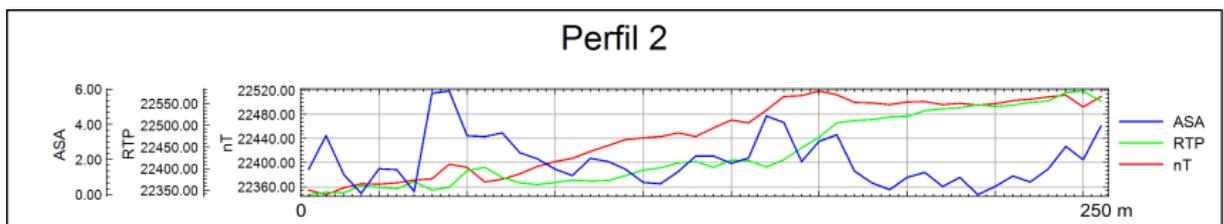


Figura 15. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 3.

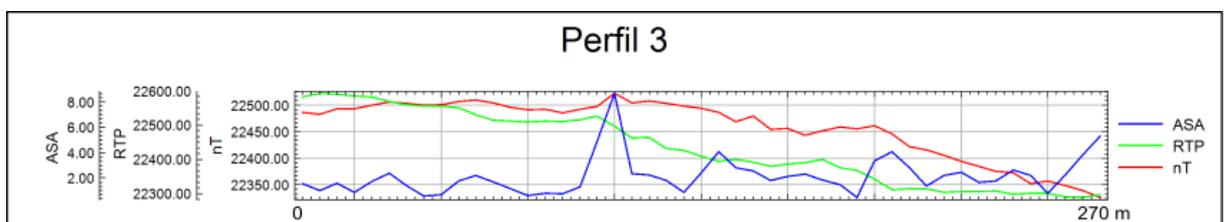


Figura 16. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 4.

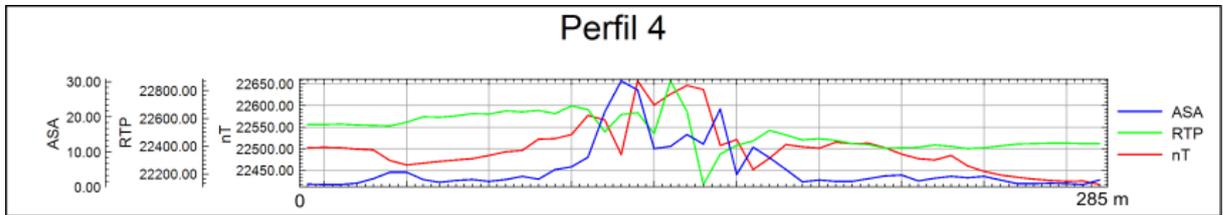


Figura 17. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 5.

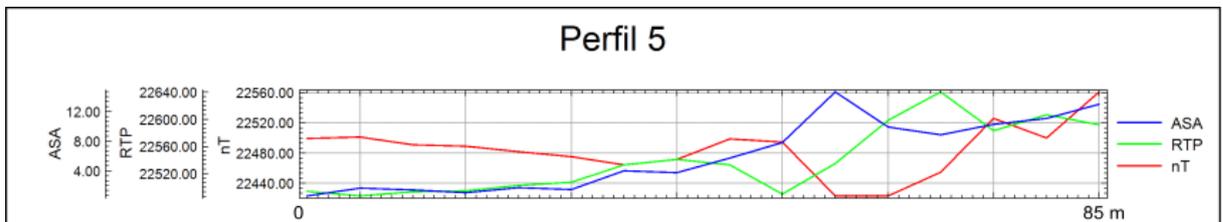


Figura 18. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 6.

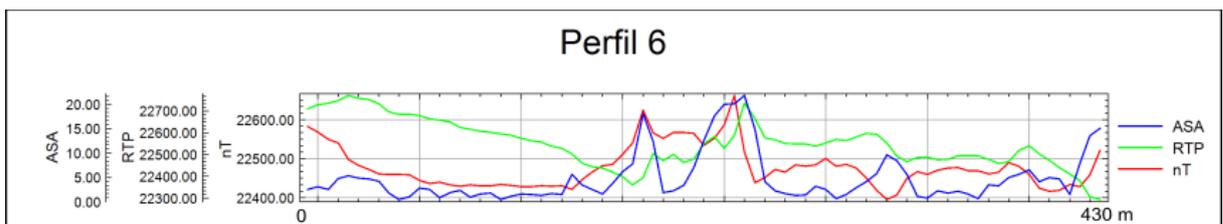
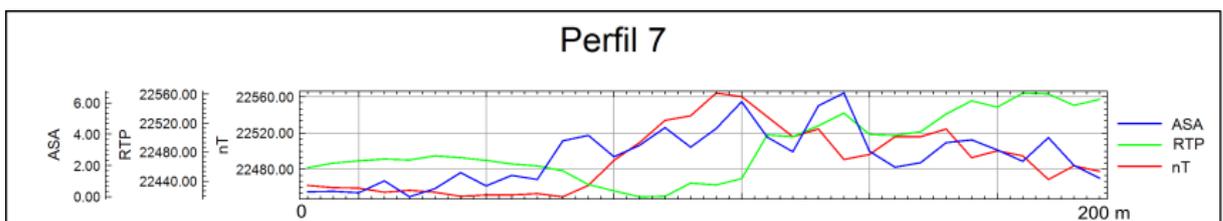


Figura 19. Variação do Campo Magnético Anômalo Total, Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Redução ao Polo e Variação do Campo Magnético Anômalo Total submetidos a Amplitude do Sinal Analítico para o Perfil 7.

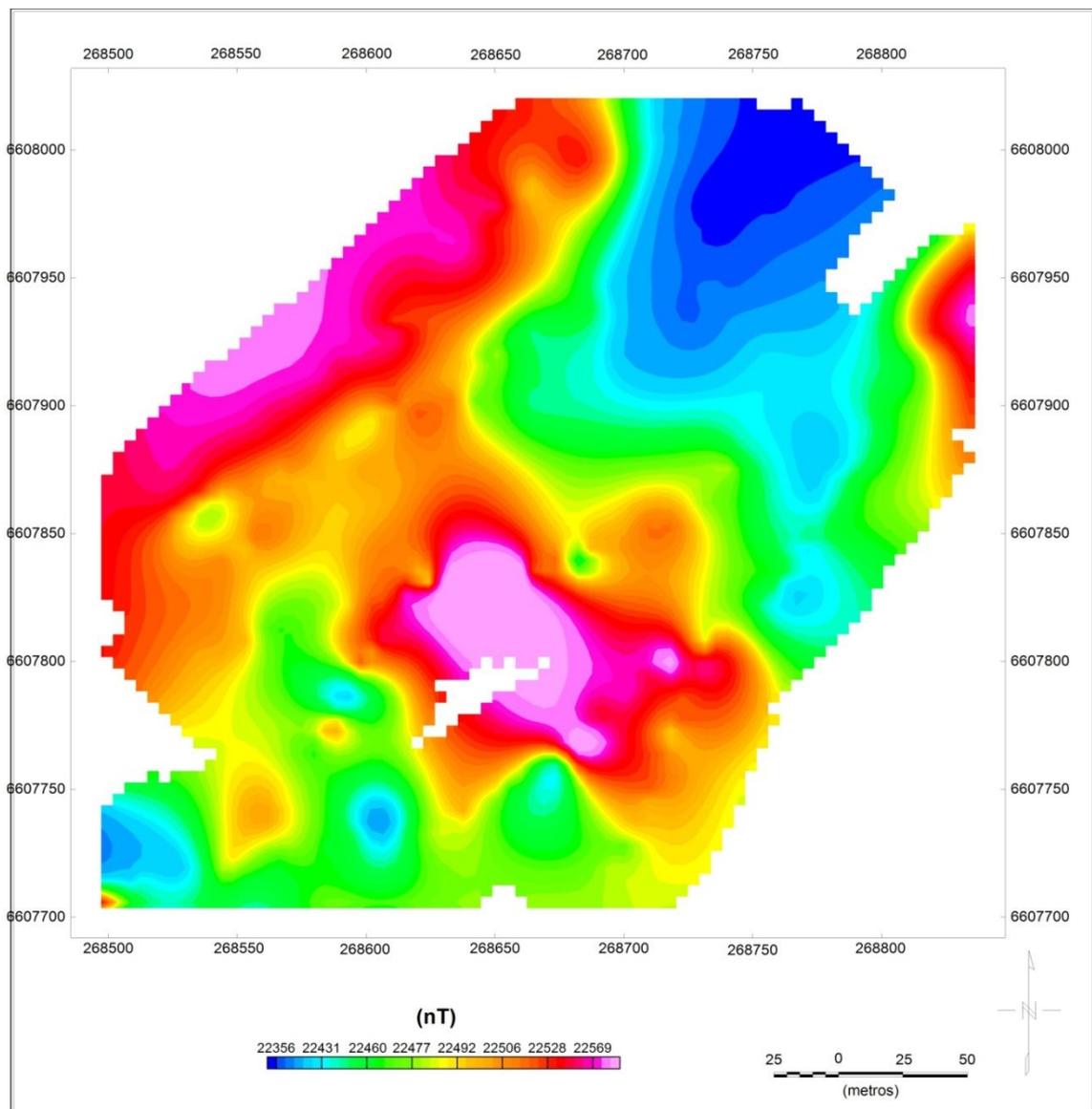


8.2 Mapas magnetométricos

A partir da integração dos dados e processamentos dos respectivos Perfis de 1 a 7, foram gerados os seguintes mapas conforme apresentado nas Figuras 20, 21 e 22

No mapa do Campo Magnético Anômalo Total pode ser observado na região central da área de estudo altos magnéticos onde possivelmente predominam zonas mineralizadas não aflorantes. (Figura 20).

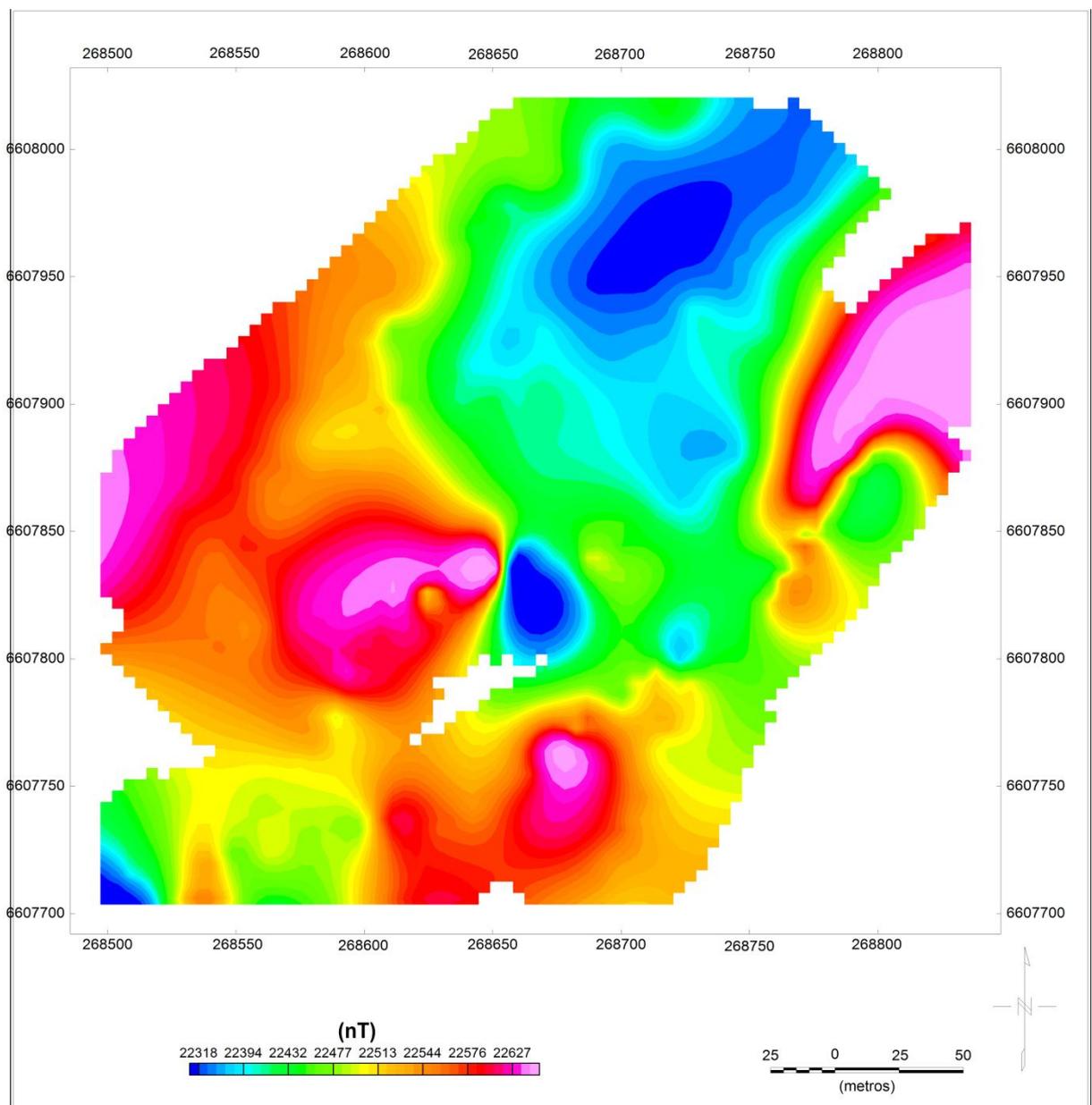
Figura 20. Mapa de isovalores do *Campo Magnético Anômalo Total* da área;



Fonte: autor. Mapa elaborado por meio de interpolação mínima curvatura utilizando os dados magnéticos.

O mapa de Redução ao Polo apresentou um dipolo magnético na região central, onde é coerente com a mesma anomalia observada no mapa de Campo Magnético Anômalo Total. Com base nessas informações é possível interpretar como um lineamento estrutural de sentido NW-SE onde possivelmente é contido corpos mineralizados (Figura 21).

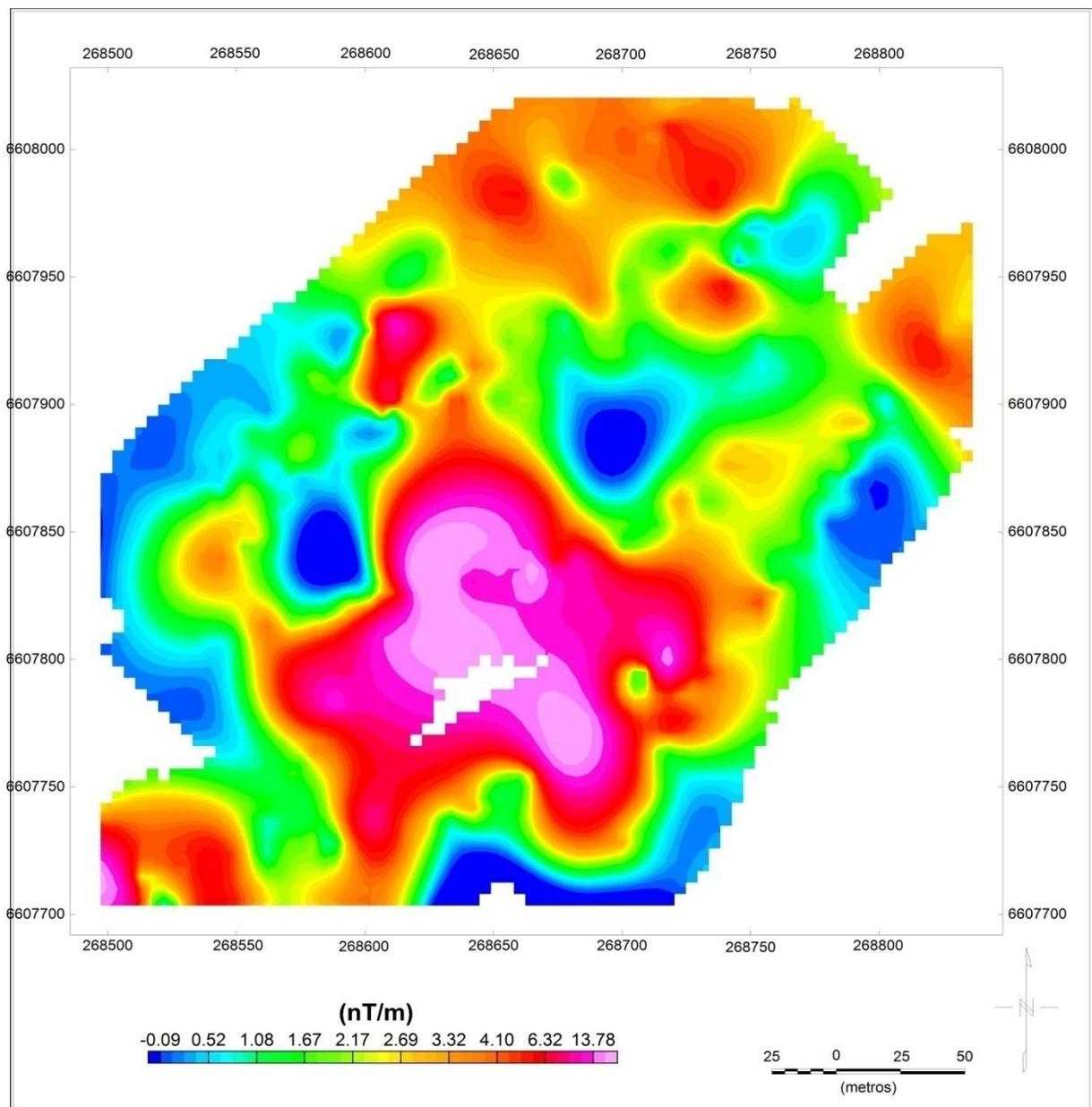
Figura 21. Mapa de isovalores de Campo Magnético Anômalo Total submetidos a *Redução ao Polo* na área;



Fonte: autor. Mapa elaborado por meio de interpolação mínima curvatura utilizando os dados magnéticos.

O mapa de Amplitude do Sinal Analítico apresentou um caráter de anomalias magnéticas no sentido NW-SE dando assim uma consistência as informações que as ocorrências mineralizadas na região estão dispostas ao mesmo sentido dos lineamentos regionais conforme citado anteriormente (Figura 22).

Figura 22. Mapa de isovalores de Campo Magnético Anômalo Total submetidos a *Amplitude do Sinal Analítico da área;*



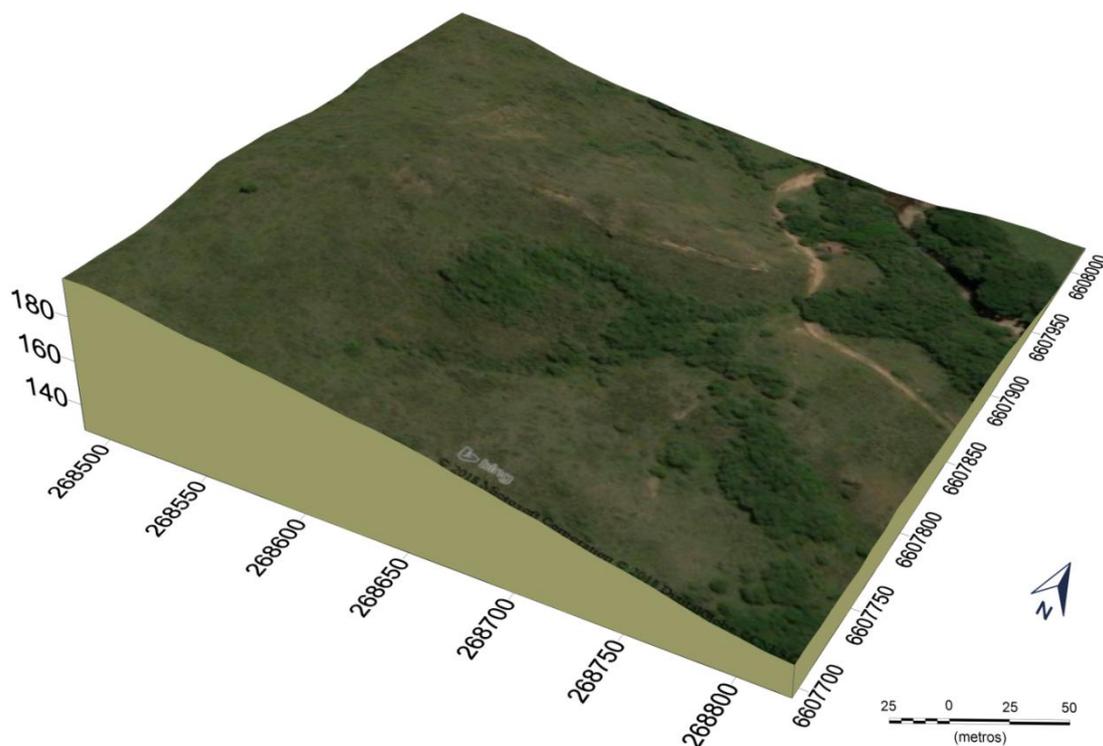
Fonte: autor. Mapa elaborado por meio de interpolação mínima curvatura utilizando os dados magnéticos.

8.3 Integração geofísica versus geologia – Mapas interpretativos

A partir dos perfis, mapas, informações de geologia e base de dados geofísica, realizou-se uma integração com arquivo *RASTER* – Modelo Digital de Terreno com resolução de 12,5 metros AlosPalsar (www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar). A Análise foi efetuada em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) a partir da sobreposição de informações. As anomalias magnéticas integradas a estes elementos encontram-se nas (Figuras 23 a 26) sendo, respectivamente:

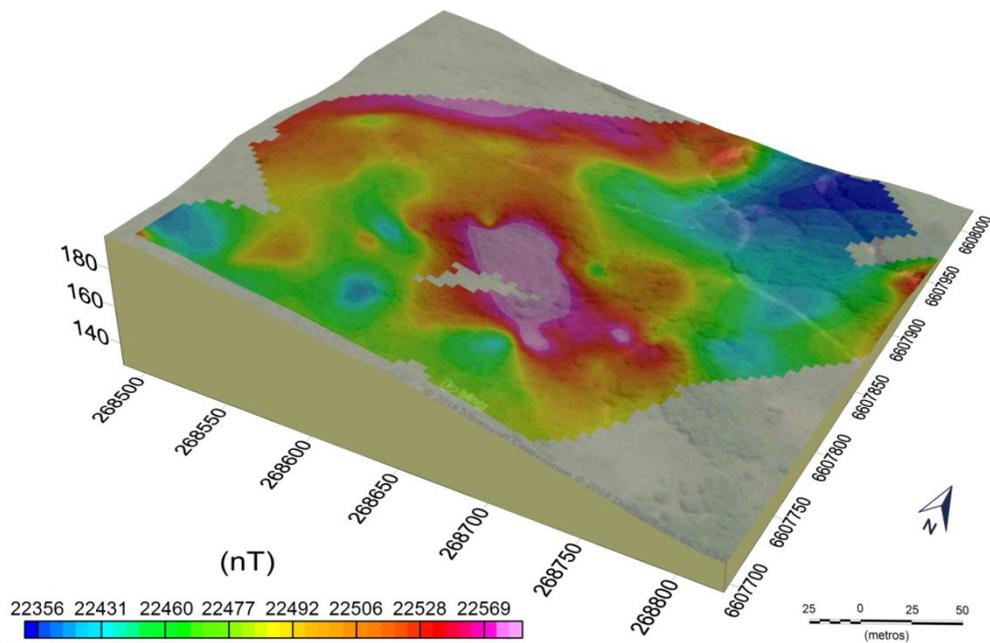
- a) Mapa de Modelo Digital de Terreno com imagem de satélite sobreposta;
- b) Mapa de Modelo Digital de Terreno com valores sobrepostos do Campo Magnético Anomalo Total;
- c) Mapa de Modelo Digital de Terreno com valores sobrepostos de Redução ao Polo;
- d) Mapa de Modelo Digital de Terreno com valores sobrepostos de Amplitude do Sinal Analítico.

Figura 23. Modelo Digital de Terreno Alos Palsar com sobreposição da imagem aérea da área.



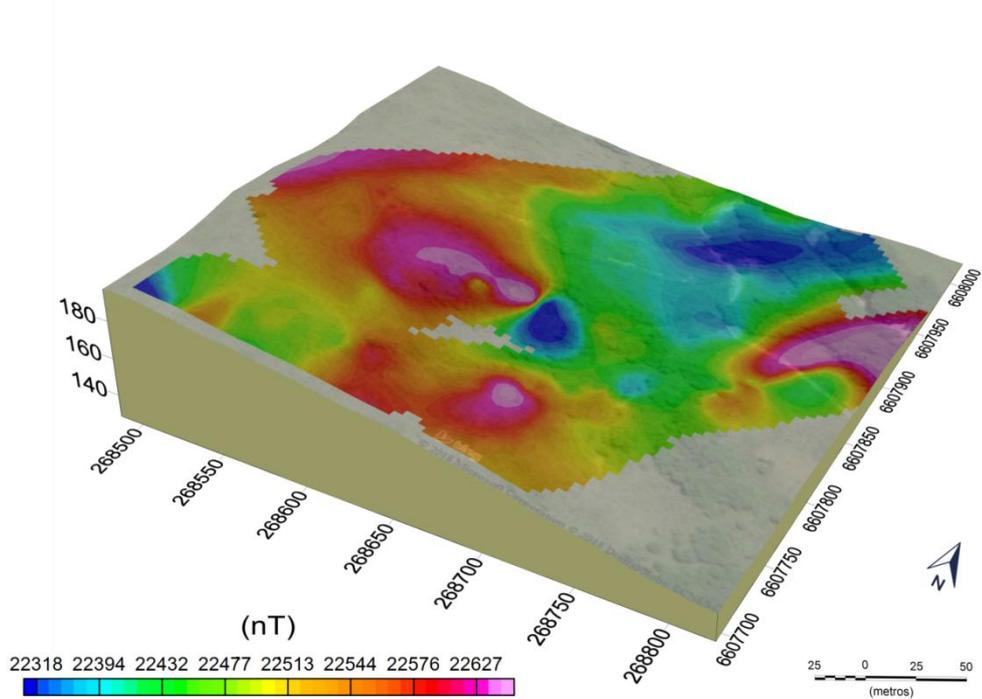
Fonte: autor. Mapa elaborado com base de dados AlosPalsar e imagem de satélite sobreposta.

Figura 24. Modelo Digital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, Campo Magnético Anomalo Total.



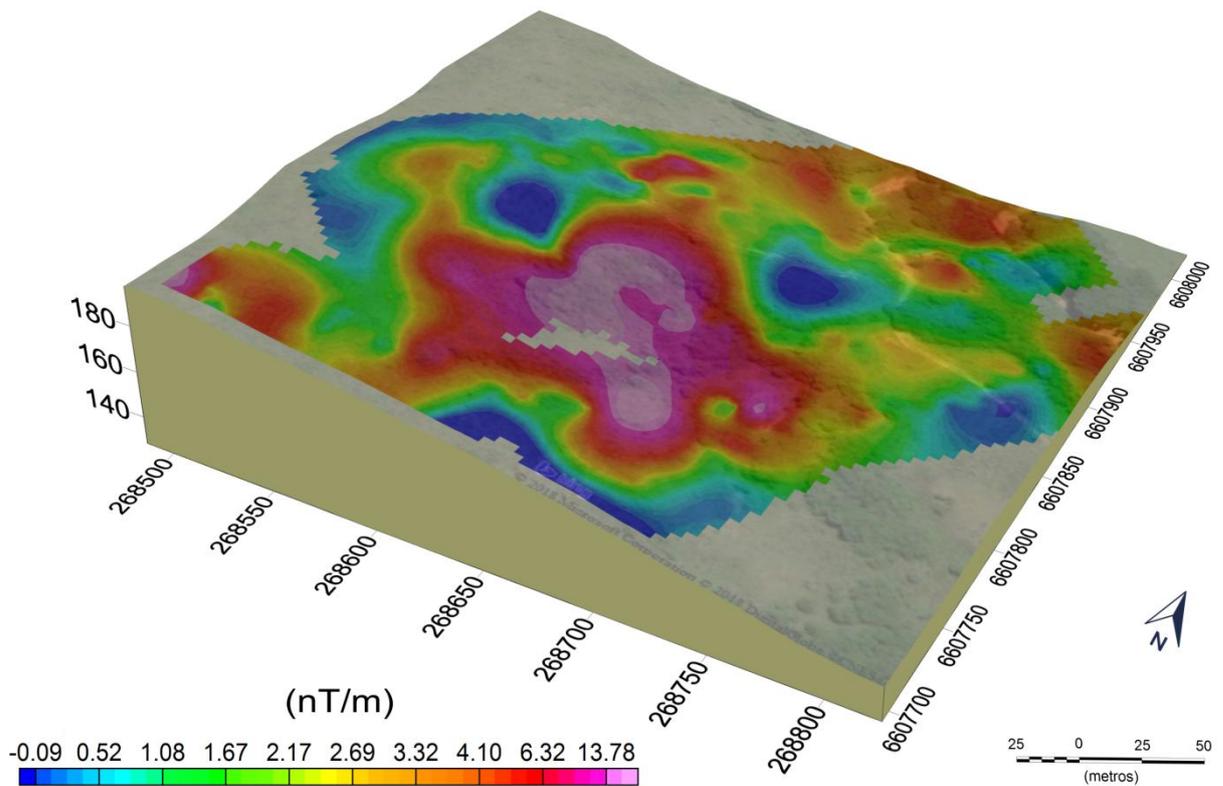
Fonte: autor. Mapa elaborado com base de dados AlosPalsar e Mapa do Campo Magnético Anomalo Total sobreposto.

Figura 25. Modelo Digital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, Redução ao Polo.



Fonte: autor. Mapa elaborado com base de dados AlosPalsar e Mapa de Redução ao Polo sobreposto.

Figura 26. Modelo Dfigital de Terreno com valores magnéticos anômalos sobrepostos, Amplitude do Sinal Analítico.



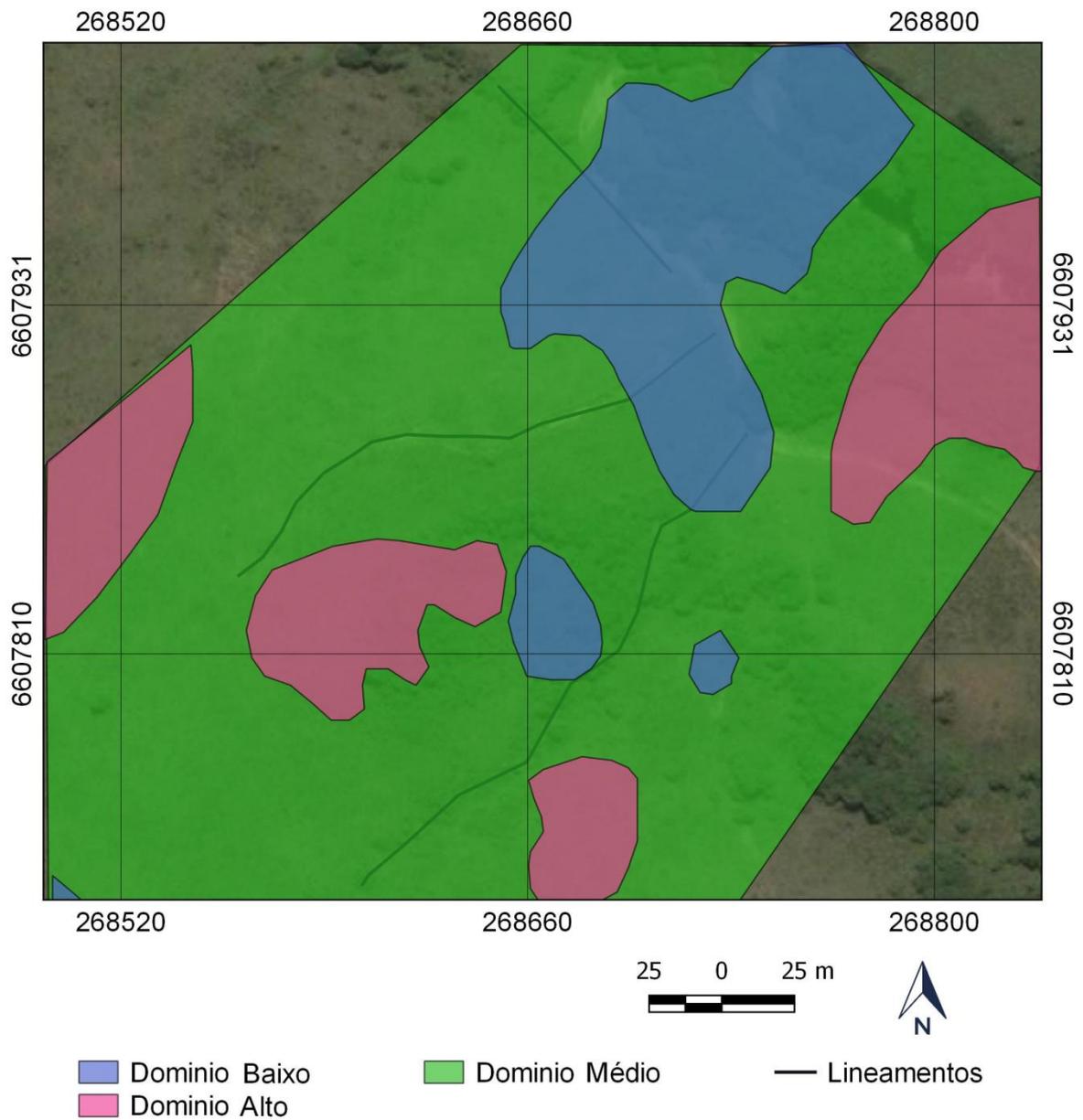
Fonte: autor. Mapa elaborado com base de dados AlosPalsar e Mapa de Amplitude do Sinal Analítico sobreposto.

Os resultados obtidos a partir dos mapas de Amplitude do Sinal Analítico e Redução ao pólo possibilitaram interpretar três distintos domínios magnéticos para mudanças mineralógicas presentes no Granito Figuras 27 a 28. A característica do domínio alto magnético foi associado a magnetização referente a possível ocorrência mineralizada em subsuperfície do Granito Santos Ferreira.

- a) Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Redução ao Polo.

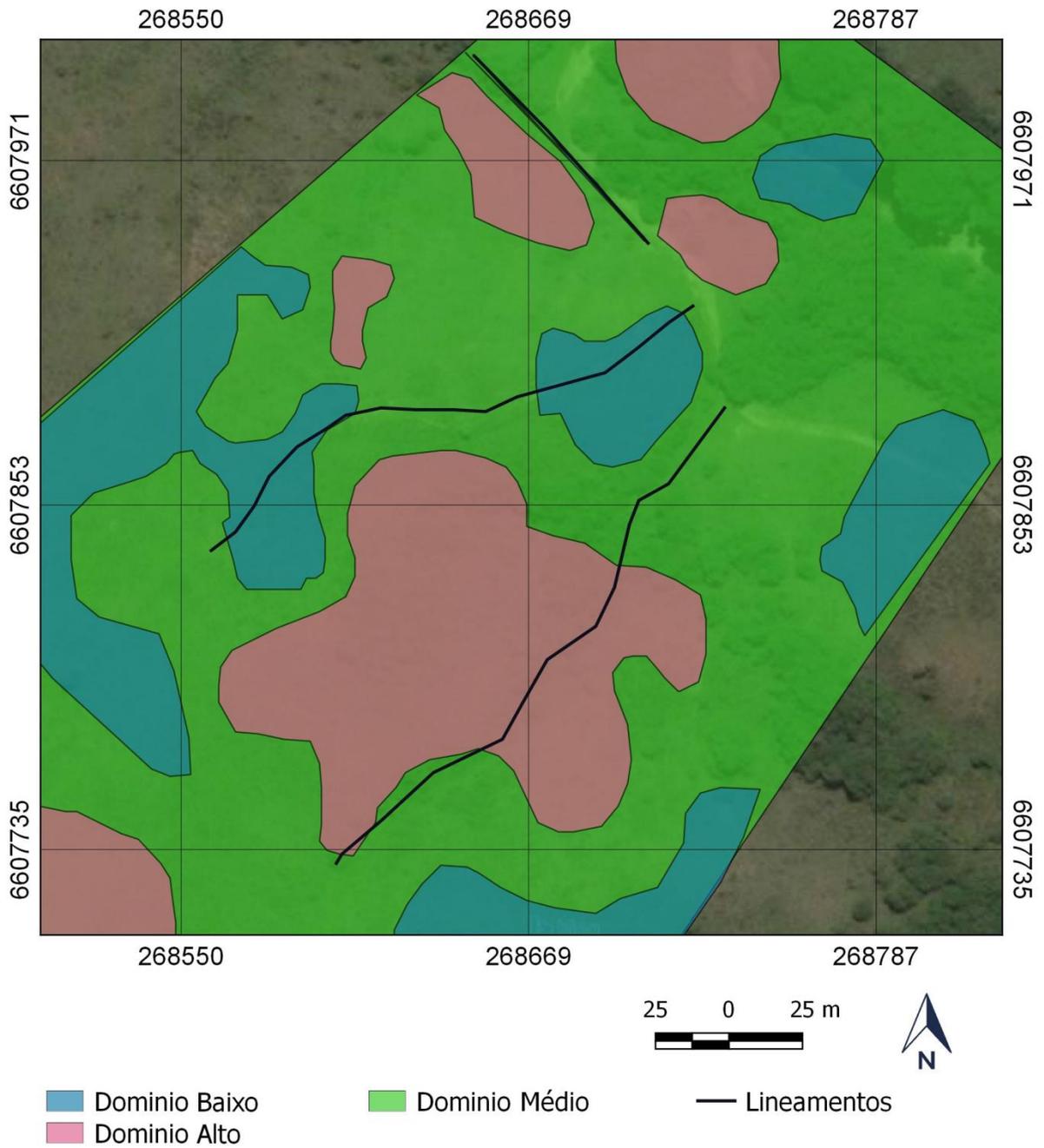
b) Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Amplitude do Sinal Analítico.

Figura 27. Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Redução ao Polo.



Fonte: autor. Mapa elaborado com base nos dados de Redução ao Polo.

Figura 28. Mapa litogeofísico/Domínios a partir da variação topográfica e anomalias observadas através da técnica de realce Amplitude do Sinal Analítico.



Fonte: autor. Mapa elaborado com base nos dados de Amplitude do Sinal Analítico sobreposto.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de dados magnetométricos ao serem submetidos às técnicas de realce, possibilitou gerar mapas litogeofísicos da área e demonstrou resultados satisfatórios quanto a identificação e caracterização de anomalias magnéticas relacionadas a fontes alojadas em subsuperfície providas possivelmente de zonas mineralizadas de Hematita e Malaquita na região central do Corpo Granítico Santos Ferreira.

Os resultados do Mapa Campo Magnético Anômalo Total permitiram identificar características de contrastes físicos relacionados às mudanças mineralógicas da rocha em questão, definindo uma zona anômala relevante na parte central da área de estudo.

Ao relacionar as informações estruturais da região com as informações do mapa de Amplitude do Sinal Analítico, verificou-se que o comportamento das principais anomalias magnéticas tem mesmo o sentido NW-SE dos lineamentos regionais anteriormente mapeados.

Com o resultado da técnica de realce de Redução ao Polo foi identificado lineamentos magnéticos relacionados ao plano de falhas e fraturas em escala de detalhe ainda não mapeadas que possivelmente estão relacionados a ocorrências alojadas em subsuperfície.

O estudo realizado possui resultados satisfatórios considerando que os altos anômalos identificados na área fornecem importantes resultados na caracterização de possíveis depósitos mineralizados na região de Caçapava do Sul.

Corroboram e fornecem importantes subsídios para o emprego de outras metodologias e técnicas para futuros estudos a fim de identificar novas zonas anômalas compreendidas por ocorrências de mineralizações em subsuperfície de hematita e malaquita na região do Granito Santos Ferreira.

10 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. **Bol. Div. Geol. Min.** v.241, p.1-36. 1967. LEINZ, V.; BARBOSA, A.; TEIXEIRA, E. Mapa Geológico Caçapava-Lavras. Porto Alegre: Secr. Agric. Ind. Com. Dep. Prod. Min, 1941. **Boletim 90**. 1:200.000.

BLAKELY, R. J. **Pontential Theory in Gravity and Magnetics Applications.** Cambridge: University Press, 1996.

CHEMALE JR., F. **Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense.** In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Ed.): Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CIGO/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 13-52. 2000.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul.** Escala 1:750.000. 2008.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. **Estratigrafia do Supergrupo Camaquã (Ediacarano do Rio Grande do Sul).** In: Semana Acadêmica Integrada UNIPAMPA, 1, Caçapava do Sul/RS, Palestra, 2016.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. O Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-SulrioGrandense. In: Congr. Bras. Geol., 31, 1980, Balneário Camboriú. **Anais** Balneário Camboriú: SBG, n.5, p. 2879-2892, 1980.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração.** São Paulo, 2009. p. 355-390. SCHON J.H. **Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics.** Pergamon, 592 p., 1996.

LINDENBERG, M. Caracterização das zonas de alteração hidrotermal do minério de Cu-Pb-Zn na área 3 (Jazida Santa Maria) e Mina Uruguai, Minas do Camaquã. Monografia. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 71p, 2014.

MACHADO. **Geologia e paragenese Mineral das Mineralizações do Granito Santos Ferreira, sudeste de Caçapava do Sul – RS, 2017.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, Geologia, 2017.

NOAA link www.ngdc.noaa.gov (2018)

PEREIRA. Magnetometria Terrestre Aplicada ao Mapeamento de Corpos Magnéticos Intrausivos no Granito Santos Ferreira – Caçapava do Sul, RS, 2017

REMUS M.V.D.; HARTMANN L.A.; MCNAUGHTON N.J.; GROVES D.I.; FLETCHER, I.R. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brazilian Cycle in southern Brazil. **Journal South American Earth Sciences**, p.191-216, 2000.

RIBEIRO. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico, 2013.

REMUS, M.D.V., HARTMANN, L.A., MCNAUGHTON, N.J., FLETCHER, I.R. Shrimp U-Pb zircon ages of volcanism from the São Gabriel Block, southern Brazil. In: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados. **Anais...** Boletim de Resumos, 83, 1999.

ROEST., Magnetic Interpretation using the 3-D analytic signal, 1992.

SILVA, J. B., 1986. Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low-latitude anomalies.

SOARES. Processamento e integração de dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos no estudo do controle das mineralizações auríferas na região do Complexo Bossoroca, São Sepé, RS, 2001.

TELFORD, W.M.; GELDART, I.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2 ed. Cambridge University Press, Nova Iorque, 1990, 774p.