

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

Resposta magnética e radiométrica da porção sul do
depósito epitermal Minas do Seival (Cu-Ag), RS

HERNÂNI DOS SANTOS GONÇALVES

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

HERNÂNI DOS
SANTOS GONÇALVES

**RESPOSTA MAGNÉTICA E RADIOMÉTRICA DA PORÇÃO
SUL DO DEPÓSITO EPITERMAL MINAS DO SEIVAL (Cu-
Ag), RS**

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Geociências
e Meio Ambiente.

Orientador: César Augusto Moreira

Rio Claro – SP
2026

G635r Gonçalves, Hernâni dos Santos
Resposta magnética e radiométrica da porção sul do
depósito epitermal Minas do Seival (Cu-Ag), RS / Hernâni
dos Santos Gonçalves. -- Rio Claro, 2026
77 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro

Orientador: César Augusto Moreira

1. Geociências. 2. Geofísica. 3. Prospeção. 4. Minas e
recursos minerais. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente trabalho utiliza métodos geofísicos aplicados à pesquisa mineral, com potencial contribuição para a identificação de novos depósitos e para o subsídio a futuras operações de mineração. Por se tratar de uma metodologia indireta de investigação, tende a apresentar custo relativamente reduzido e menor impacto ambiental quando comparada a métodos exploratórios mais invasivos. Os bens minerais são indispensáveis às cadeias produtivas em escala mundial e desempenham papel estratégico em diversos setores da economia. Nesse contexto, esta pesquisa contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente o ODS 8, Trabalho decente e crescimento econômico; o ODS 9, Indústria, inovação e infraestrutura, ao estimular o desenvolvimento de técnicas aplicadas à prospecção mineral e à exploração de minerais críticos; e o ODS 13, Ação contra a mudança global do clima, uma vez que minerais críticos, como o cobre, são fundamentais para tecnologias associadas à transição energética e à redução das emissões de gases de efeito estufa.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study uses geophysical methods applied to mineral exploration, with potential contributions to the identification of new deposits and to supporting future mining operations. As an indirect investigation methodology, it tends to present relatively low costs and lower environmental impact when compared with more invasive exploration methods. Mineral resources are essential to global production chains and play a strategic role in several sectors of the economy. In this context, this research contributes to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 8, Decent Work and Economic Growth; SDG 9, Industry, Innovation and Infrastructure, by encouraging the development of techniques applied to mineral prospecting and the exploration of critical minerals; and SDG 13, Climate Action, since critical minerals, such as copper, are fundamental to technologies associated with the energy transition and the reduction of greenhouse gas emissions.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

HERNÂNI DOS
SANTOS GONÇALVES

RESPOSTA MAGNÉTICA E RADIOMÉTRICA DA PORÇÃO SUL DO DEPÓSITO EPITERMAL MINAS DO SEIVAL (Cu-Ag), RS

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Geociências
e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO MOREIRA
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. DIONÍSIO UENDRO CARLOS
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. EMERSON RODRIGO ALMEIDA
IGESC / UFU/Monte Carmelo (MG)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 25 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2023/04732-8. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pelas oportunidades que me foram dadas, pela confiança depositada em mim ao longo desta trajetória e pelas valiosas contribuições científicas para o desenvolvimento deste trabalho. Sou igualmente grato pelas conversas e orientações, que ampliaram minha perspectiva sobre os caminhos futuros na carreira.

Agradeço ao Dr. Lenon e à Isabela pela colaboração nas etapas de aquisição e processamento dos dados. À Dona Lila e ao Sr. Edson, registro meu sincero agradecimento pela acolhida, hospitalidade e apoio durante os trabalhos de campo. Agradeço também ao Prof. Dr. Dionísio Uendro Carlos pela grande colaboração no processamento dos dados geofísicos, ensinamentos sobre a geofísica e as contribuições na dissertação, estendo meus agradecimentos ao Prof. Dr. Emerson Rodrigo Almeida pelos ensinamentos em geofísica durante a graduação e os apontamentos na defesa.

Agradeço à minha família pelo apoio constante ao meu crescimento acadêmico e profissional, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo permanente ao longo desta caminhada. Em especial, agradeço à minha amada Mayra, por estar ao meu lado em todos os momentos, pelo cuidado, pelo carinho e pelo amor presentes tanto nos dias mais felizes quanto nos mais desafiadores. Obrigado por acreditar no meu potencial, incentivar meus sonhos e compartilhar a vida comigo.

Agradeço, igualmente, aos amigos que fiz na UFU durante a graduação e na UNESP na pós-graduação, por toda colaboração e parceria que tivemos, em especial os amigos e agregados da República Acasalar. Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho, cujo apoio, incentivo e compartilhamento de conhecimentos foram fundamentais para o meu crescimento profissional ao longo desta trajetória.

RESUMO

A área de estudo localiza-se entre os municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul, no distrito das Minas do Seival, inserida na Bacia do Camaquã. As mineralizações ocorrem em rochas vulcanoclásticas da Formação Hilário, Grupo Bom Jardim, estruturalmente controladas por sistemas de falhas com direções preferenciais NE-SW e NW-SE. A região apresenta histórico de exploração de cobre e prata entre as décadas de 1930 e 1960, com recursos estimados em aproximadamente 70.000 toneladas de minério, teores médios de 0,83 % Cu e 16 ppm Ag. Esta dissertação tem como objetivo integrar dados de magnetometria e gamaespectrometria terrestre visando identificar assinaturas geofísicas associadas à mineralização hidrotermal e subsidiar a prospecção de novos alvos na porção sul do depósito. Os dados foram processados e interpretados com base no modelo hidrotermal epitermal, considerando o forte controle estrutural regional das mineralizações. A análise integrada dos produtos magnetométricos e radiométricos permitiu identificar feições lineares associadas a falhas, fraturas e veios mineralizados, além de zonas correlacionadas ao sistema estrutural da Mina Alcides. Observam-se ainda anomalias magnéticas localizadas e aproximadamente circulares, interpretadas como possivelmente relacionadas à presença de diques subvulcânicos verticais e subverticais. Entre os produtos magnetométricos, a amplitude do sinal analítico mostrou-se o mais eficiente para o realce estrutural da área. Os dados gamaespectrométricos de equivalente tório (eTh), equivalente urânio (eU) e potássio (K) permitiram reconhecer zonas anômalas espacialmente associadas às áreas mineralizadas e às principais estruturas regionais. Os resultados demonstram que a integração entre dados geofísicos e geológicos é adequada para o reconhecimento de zonas hidrotermalizadas e definição de vetores prospectivos em sistemas do tipo pórfiro-epitermal, contribuindo para o aprimoramento de estratégias exploratórias em contextos geológicos semelhantes.

Palavras-chave: Mineralização sulfetada; magnetometria terrestre; gamaespectrometria terrestre

ABSTRACT

The study area is located between the municipalities of Caçapava do Sul and Lavras do Sul, in the Minas do Seival district, within the Camaquã Basin. Mineralization occurs in volcanoclastic rocks of the Hilário Formation, Bom Jardim Group, and is structurally controlled by fault systems with preferential NE-SW and NW-SE orientations. The region has a history of copper and silver exploration between the 1930s and 1960s, with historical estimates of approximately 70,000 tonnes of ore, with average grades of 0.83% Cu and 16 ppm Ag. This dissertation aims to integrate ground magnetometry and gamma-ray spectrometry data to identify geophysical signatures associated with hydrothermal mineralization and to support the identification of new exploration targets in the southern portion of the deposit. The data were processed and interpreted based on an epithermal hydrothermal system model, taking into account the strong regional structural control on mineralization. The integrated analysis of magnetometric and radiometric products allowed the identification of linear features associated with faults, fractures, and mineralized veins, as well as zones correlated with the structural framework of the Alcides Mine. Localized and approximately circular magnetic anomalies were also identified and interpreted as possibly related to the presence of vertical and subvertical subvolcanic dikes. Among the magnetometric products, the amplitude of the analytic signal (ASA) proved to be the most effective for structural enhancement of the study area. Gamma-ray spectrometric data for equivalent thorium (eTh), equivalent uranium (eU), and potassium (K) enabled the identification of anomalous zones spatially associated with mineralized areas and the main regional structures. The results demonstrate that the integration of geophysical and geological data is suitable for identifying hydrothermally altered zones and defining exploration vectors in porphyry–epithermal systems, contributing to the improvement of exploration strategies in similar geological settings.

Keywords: Sulphide mineralization; ground magnetometry; ground gamma-ray spectrometry

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização da área de estudos	16
Figura 2 Mapa da área do Gondwana Ocidental com a indicação dos crátons (área em azul) e das faixas móveis (em itálico na figura).....	19
Figura 3 Divisão geológica esquemática do Escudo Sul-rio-grandense com os 4 blocos tectônicos e localização da Bacia do Camaquã	21
Figura 4 Coluna estratigráfica simplificada da Bacia do Camaquã – Sequências vulcano-sedimentares Ediacaranas a Cabrianas. Coluna baseada nas referências a seguir: Almeida <i>et al.</i> , 2012; Leite <i>et al.</i> , 1995; Remus <i>et al.</i> , 2000a; Gastal <i>et al.</i> , 2006; Janikian <i>et al.</i> , 2012; Sommer <i>et al.</i> , 2005; Maraschin <i>et al.</i> , 2010; Gastal <i>et al.</i> , 2015; Chemale <i>et al.</i> , 2000; Matté <i>et al.</i> , 2016.	24
Figura 5 Localização das principais minas de Cu, Au-Cu e Pb-Zn na Bacia do Camaquã	25
Figura 6 Mapa geológico e de anomalias geoquímicas de cobre da região do Seival	27
Figura 7 Mapa geológico da porção sul das Minas do Seival	29
Figura 8 Esquema ilustrativo dos sistemas hidrotermais vulcânicos caracterizado como sistemas epitermais, com localização de ocorrência dos tipos <i>low-</i> e <i>high-sulfidation</i> , com indicações de evolução da temperatura e do fluido	31
Figura 9 Seção sintética geológica e seção transversal do Distrito Aurífero de Lavras do Sul e Minas do Seival. Referências: Phe = fenita; I/S = illita-esmectita; Ch = clorita; Co = corrensitita; C/S = clorita-esmectita; IA = alteração argílica intermediária; P = alteração propilítica; Ph = alteração filítica; Py = pirita; Ccp = calcopirita; Bn = bornita; Cc = calcocita; Cv = covelita (modificado de Fontana, 2016).	36
Figura 10 Componentes geomagnéticas	38
Figura 11 A) magnetômetro de precessão de prótons (GSM-19). B) RS-332 <i>Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer</i>	45
Figura 12 Malha regular para a aquisição dos dados de magnetometria e gamaespectrometria	46
Figura 13 A) Vista panorâmica da Mina Alcides; B) Malaquita em lapilli-tufo.....	53
Figura 14 Mapa do Campo Magnético Total Reduzido ao Polo (RTP).....	55
Figura 15 Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).....	56
Figura 16 Mapa da Derivada Horizontal em Y (Dy)	57
Figura 17 Mapa da Derivada Horizontal em X (Dx)	58
Figura 18 Mapa da Derivada vertical (Dz)	59
Figura 19 Mapa do Gradiente Horizontal Total (THDR)	60
Figura 20 Mapa de concentração de potássio (K)	61
Figura 21 Mapa de concentração de equivalente urânio (U).....	62
Figura 22 Mapa de concentração de equivalente tório (Th).....	63
Figura 23 Mapa de razão eTh/K.....	64

Figura 24 A) Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) com interpretações da área. B) Mapa da primeira derivada vertical (Dz) interpretado. C) Mapa de Redução ao Polo (RTP) interpretado. D) Mapa do Gradiente Horizontal Total (THDR) interpretado. As linhas tracejadas em branco ressaltam descontinuidades magnéticas interpretadas, enquanto os polígonos circulares indicam anomalias magnéticas localizadas compatíveis com possíveis corpos vulcânicos ou subvulcânicos verticais a subverticais.....66

Figura 25 A) Mapa da concentração de potássio com as anomalias delimitadas. B) Mapa da concentração de tório com as anomalias delimitadas. C) Mapa de concentração de urânio. D) Mapa da razão Th/K com zonas anômalas. 68

Figura 26 Mapa de integração dos dados de magnetometria e gamaespectrometria e amostra de lapili-tufo evidenciando a ocorrência de malaquita. 69

Lista de Tabelas

Tabela 1 Principais ocorrências mineradas nas Minas do Seival	17
Tabela 2 Relações entre níveis de sulfetação dos ambientes formadores de minério, magmatismo e ambiente tectônico.....	32
Tabela 3 Controles morfológicos sobre permeabilidade e corpos de minério epitermais.....	33
Tabela 4 Principais janelas espectrais utilizadas em gamaespectrometria	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS	15
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	16
3.1 Localização e vias de acesso	16
4 CONTEXTUALIZAÇÃO TECTÔNICA REGIONAL.....	19
4.1 Escudo Sul-Rio-Grandense.....	19
4.2 Bacia do Camaquã	20
4.3 Estruturação da Bacia do Camaquã	21
4.4 Estratigrafia da Bacia do Camaquã	22
4.5 Ocorrências e depósitos na Bacia do Camaquã	25
5 GEOLOGIA DAS MINAS DO SEIVAL	26
5.1 Controle Estrutural das Minas do Seival	26
5.2 Alteração Hidrotermal.....	28
5.3 Geologia da Mina Alcides	28
6 METALOGÊNESE.....	30
6.1 Depósitos Epitermais	30
6.2 Metalogênese das Mineralizações nas Minas do Seival	34
7 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
7.1 Referencial teórico do método de Magnetometria	37
7.1.1 Campo Magnético Terrestre	37
7.1.2 Propriedades Magnéticas das Rochas e Minerais	39
7.1.3 Diamagnetismo	40
7.1.4 Paramagnetismo	40

7.1.5 Ferromagnetismo	40
7.2 Referencial teórico do método de Gamaespectrometria	41
7.2.2 Aplicabilidade da gamaespectrometria na prospecção mineral	43
7.3 Assinaturas Geofísicas de Depósitos Epitermais.....	44
7.4 Levantamento geofísico terrestre	44
7.5 Processamento e Tratamento dos Dados	46
7.5.1 Processamento da magnetometria	47
7.5.2 Correção da variação diurna	47
7.5.3 Redução ao Pólo Magnético	48
7.5.4 Derivadas do Campo Magnético	48
7.5.5 Amplitude do Sinal Analítico	50
7.5.6 Gradiente Horizontal Total (THDR)	50
7.6 Processamento Gamaespectrometria	51
7.6.1 Razão Th/K.....	52
8 RESULTADOS	53
8.1 Geologia Local.....	53
8.2 Magnetometria.....	54
8.3 Gamaespectrometria.....	60
8.4 Discussão integrada dos dados	64
8.5 Integração dos dados.....	68
9 CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O cobre é um dos minerais críticos para o desenvolvimento tecnológico e a transição energética global, graças às suas propriedades físicas e químicas únicas. A demanda por esse metal cresce aceleradamente, impulsionada pela expansão de tecnologias de baixo carbono, com aplicações essenciais em painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de transmissão elétrica, veículos elétricos e baterias (IEA, 2021). Nesse cenário, a Resolução nº 02/2021 do Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME) e o programa Pró-Minerais Estratégicos classificaram o cobre, junto a outros 16 minerais, no eixo “bens minerais importantes por sua aplicação em produtos de processos de alta tecnologia” (inciso II). O Plano Nacional de Mineração (PNM) 2050 reforça a relevância desse conjunto de minerais para o desenvolvimento sustentável do país (MME, 2022).

O Brasil possui aproximadamente 79 milhões de toneladas de reservas de cobre, correspondendo a cerca de 7,7% das reservas mundiais e ocupando a sexta posição no ranking global. O país apresenta elevado potencial geológico para a expansão da produção, especialmente nas províncias minerais de Carajás (PA), Goiás e Bahia (SGB, 2026). A Bacia do Camaquã e as rochas graníticas neoproterozóicas associadas concentram depósitos significativos de ouro, cobre, prata, chumbo e zinco (REMUS *et al.*, 2000; BONGIOLO *et al.*, 2011; RENAC *et al.*, 2014). Na porção centro-oeste da bacia, as rochas vulcanogênicas da Formação Hilário abrigam seis minas inativas de cobre-prata, incluso as Minas do Seival (REISCHL, 1978; LOPES, 2018; FONTANA *et al.*, 2017). A reserva da mina foi estimada em cerca de 0,20 Mt de rocha mineralizada com teor médio de 1,40 % de Cu (REISCHL, 1978). Os sulfetos ricos em cobre ocorrem associados a interestratificações clorita/esmectita, disseminados na porosidade de rochas como lapilli-tufos e aglomerados vulcânicos, além de formarem redes de stockwork e veios ao longo de planos de falha e fratura (LOPES, 2018).

Com a maioria dos grandes depósitos aflorantes explorados, os métodos geofísicos terrestres são essenciais para a descoberta de alvos cegos e mais profundos, bem como para a reavaliação de depósitos conhecidos. Esses métodos permitem mapear áreas extensas de forma eficiente e econômica, na detecção de contrastes de propriedades físico-químicas entre os depósitos minerais e as rochas hospedeiras (DENTITH & MUDGE, 2014; KEAREY *et al.*, 2002; MILSOM, 2003; MUSSETT & KHAN, 2000). A integração da magnetometria e da gamaespectrometria possibilita a identificação de estruturas subverticais, bordas de corpos intrusivos e zonas de alteração hidrotermal, respectivamente (ALHUMIMIDI *et al.*, 2021).

Localmente, métodos geofísicos são utilizados em pesquisas na Bacia do Camaquã, com destaque para magnetometria, eletromagnetismo, radiometria e polarização induzida (IP)

(CORTES *et al.*, 2019; MOREIRA *et al.*, 2019; PEREIRA, 2021; ALVES *et al.*, 2025; OLIVEIRA *et al.*, 2025). A análise geofísica, por sua natureza quantitativa, deve ser integrada a investigações complementares, como geologia de superfície, dados estruturais e conhecimento metalogenético, para maior confiabilidade na interpretação (KEAREY *et al.*, 2002). Assim, o presente estudo visa avaliar o potencial para descoberta e reavaliação de ocorrências sulfetadas de cobre na porção sul da Mina do Seival, sul do Brasil, por meio da integração de reconhecimento geológico de campo, levantamentos geofísicos terrestres de magnetometria e gamaespectrometria, e interpretação de lineamentos geofísicos. Essa abordagem destaca alvos com potencial significativo para retomada de projetos de exploração mineral na região.

2 OBJETIVOS

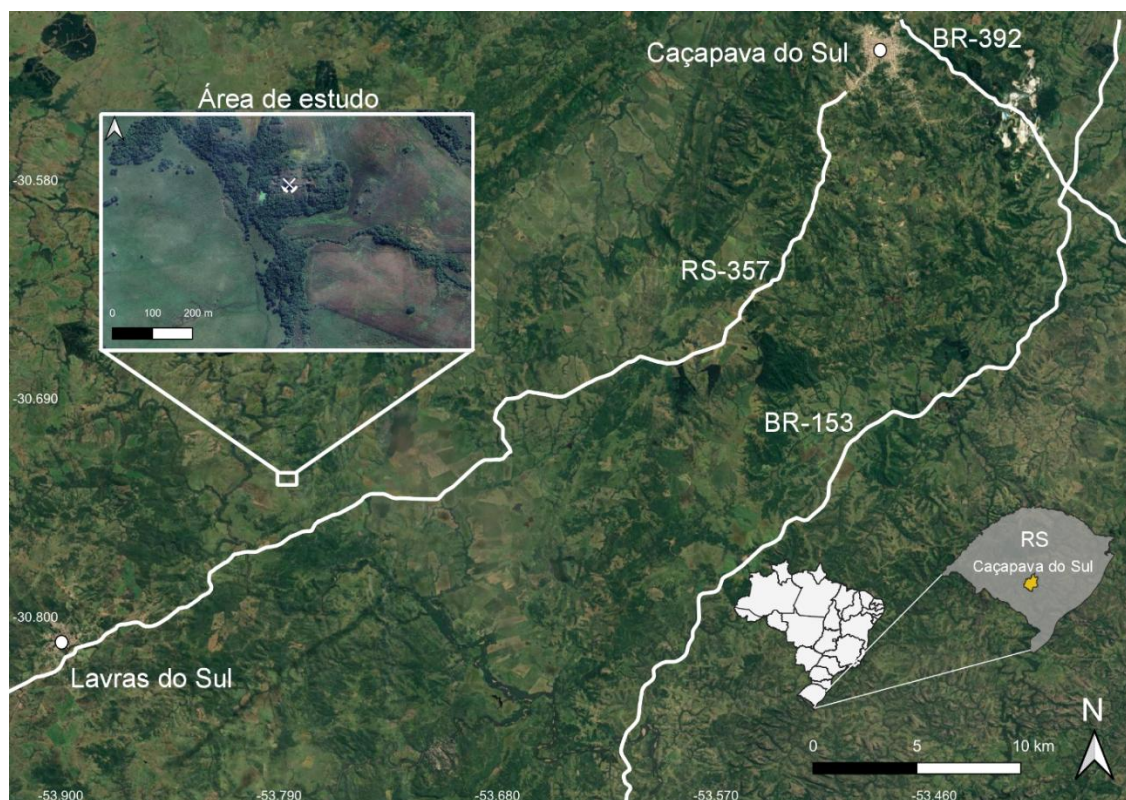
Realizar a integração e interpretação de dados de magnetometria e gamaespectrometria terrestre em uma área de mina de cobre desativada nas Minas do Seival (RS), com o objetivo de identificar assinaturas geofísicas relacionadas à mineralização e gerar guias prospectivos para a descoberta de novos alvos na região.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1 Localização e vias de acesso

A área de estudo está inserida na região das Minas do Seival, localizada entre os municípios de Caçapava do Sul e Lavras do Sul, no sul do Rio Grande do Sul. O acesso a partir de Porto Alegre ocorre pelas rodovias BR-290, BR-392 e RS-357, sendo o trecho final realizado por estrada não pavimentada (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudos



Fonte: Google Earth, 2025

3.2 Histórico de Exploração das Minas do Seival

As primeiras pesquisas sistemáticas na região das Minas do Seival ocorreram entre 1901 e 1931, realizadas por companhias particulares e estatais. Em 1931, a Companhia Estrada de Ferro e Minas de São Jerônimo realizou escavações rasas. Em 1937, uma companhia de Porto Alegre avaliou teor médio de 4,7% Cu em uma das minas.

Entre 1939 e 1942, a Companhia Indústria Eletro-Química S/A assumiu a exploração. De 1935 a 1962, a área foi lavrada de forma intermitente, com produção de cobre eletrolítico e sulfato de cobre. Entre 1955 e 1962, a produção atingiu aproximadamente 1.000 toneladas de minério por mês, com teor médio de 1,6% Cu total (cerca de 1,0% Cu sulfetado).

A Mina da Barita foi a principal ocorrência, com produção de cerca de 64.000 toneladas de minério entre 1942 e 1964, com teor médio de 1,71% Cu e 70 ppm Ag. A Mina João Dahne foi explorada em 1957 por meio de trincheiras. Parte da produção da Mina Alcides foi destinada à extração de sulfatos para correção de solos agrícolas. Por fim, entre 1977 e 1978, a Companhia Brasileira do Cobre (CBC) realizou campanhas de pesquisa na região, com sondagens (Reischl, 1978; Lopes, 2018).

3.2.1 Descrição das Principais Ocorrências

De acordo com Reischl (1978), as principais ocorrências mineralizadas da área estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 Principais ocorrências mineradas nas Minas do Seival

Mina / Ocorrência	Tipo de Mineralização	Controle Estrutural	Observações Principais
Mina da Barita	Calcocita em bolsões irregulares	Falhas (direção NE-SW)	Corpo lenticular, mergulho 50° NW. Reserva estimada: 64.000 t @ 1,7% Cu e 70 ppm Ag. Barita como principal ganga.
Mina João Dahne	Mineralização de baixo teor	Direção NE-SW	Explorada em 1957 por trincheiras de dezenas de metros. Mergulho acentuado.
Mina do Morcego	Calcocita e malaquita finamente disseminadas	Zonas fraturadas (N-S a NE-SW)	~70% óxidos. Considerada antieconômica.
Mina do Meio	Concentrações irregulares de malaquita	Faturamento (N-S a NE-SW)	Hospedada em tufo andesítico.
Mina da Cruzeta	Calcocita em veios	Fraturas (NE-SW e NW-SE)	Raramente disseminada. Hospedada em lava andesítica porfirítica.
Mina Alcides	Bolsões de calcocita finamente disseminada	Falhas N-S	Hospedada em lapilli-tufo. Ganga de barita.
Lagoa do Jacaré e Vila do Torrão	Malaquita superficial e calcocita disseminada	Fraturamento	Concentrações irregulares. Ganga de barita e calcita.

Fonte: Adaptado de Reischl (1978).

A área das Minas do Seival apresenta um histórico de exploração mineral desde o início do século XX, com as ocorrências de cobre intimamente associadas ao fraturamento e às falhas das rochas hospedeiras. A partir dos anos 2000, a região voltou a atrair o interesse de empresas multinacionais, embora as atividades de pesquisa tenham permanecido limitadas (LOPES, 2018).

Esse histórico evidencia que, apesar do reconhecimento prévio das ocorrências cupríferas e de sua exploração ao longo do século XX, ainda há um limitado nível de investigação sistemática sob a ótica de métodos geofísicos modernos. As atividades pretéritas foram concentradas principalmente em evidências superficiais e em trabalhos de lavra e prospecção direta, com pouca integração entre dados geológicos e geofísicos.

Nesse contexto, a aplicação integrada de métodos geofísicos é fundamental para complementar as informações obtidas em superfície, permitindo inferir a continuidade de estruturas em profundidade e identificar potenciais alvos exploratórios associados à mineralização cuprífera na região.

4 CONTEXTUALIZAÇÃO TECTÔNICA REGIONAL

A área de estudo está localizada geotectonicamente na Bacia do Camaquã (BC), inserida no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), porção meridional da Província Mantiqueira (Hasui et al., 1975; Almeida et al., 1981). Nesse contexto, será apresentada uma contextualização geotectônica do ESRG, bem como a estruturação e a evolução estratigráfica da Bacia do Camaquã.

4.1 Escudo Sul-Rio-Grandense

Conforme Almeida e Hasui (1984), essa região corresponde à porção meridional da Província Mantiqueira, cuja formação está relacionada ao evento colisional entre os crátons de La Plata e Kalahari durante o Neoproterozoico. Essa colisão resultou na geração de um extenso sistema de cinturões orogênicos, com destaque para o Cinturão de Cisalhamento Dom Feliciano, que, no Estado do Rio Grande do Sul, é regionalmente denominado como Escudo Sul-Rio-Grandense (Figura 2).

Figura 2 Mapa da área do Gondwana Ocidental com a indicação dos crátons (área em azul) e das faixas móveis (em *itálico* na figura)



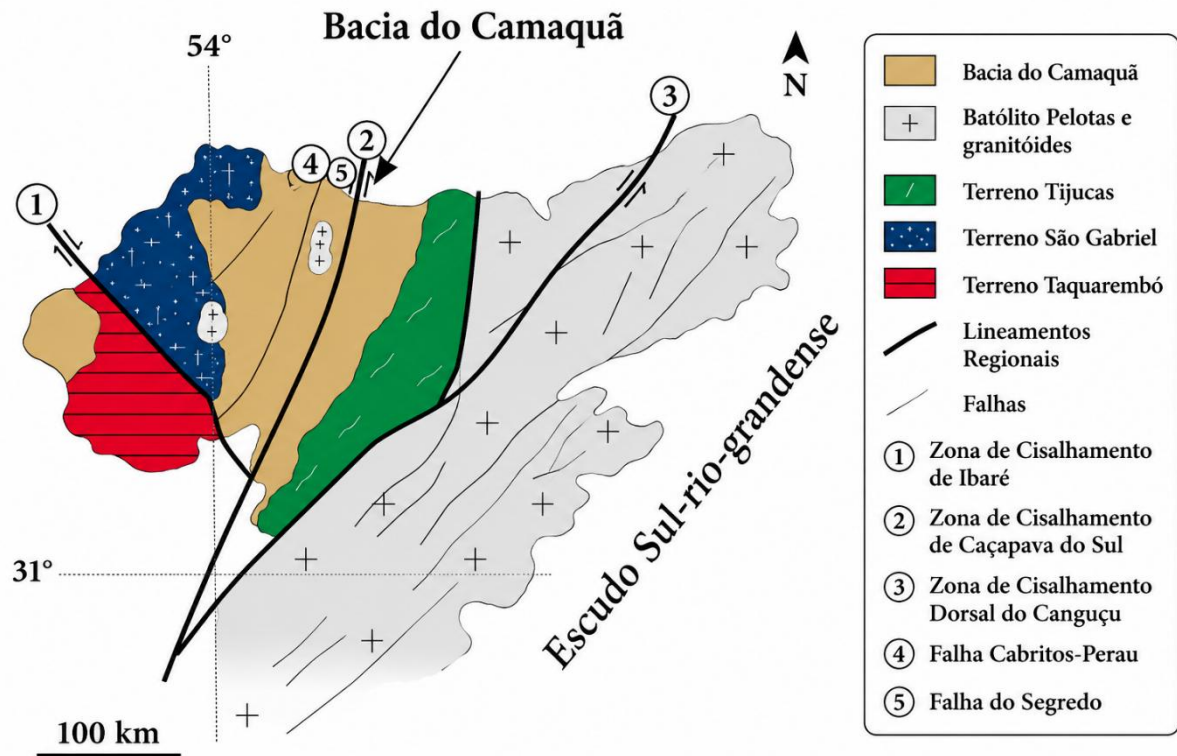
Fonte: Lopes (2018), adaptado de Almeida e Hasui (1984).

O Escudo Sul-Rio-Grandense compreende os Terrenos Taquarembó, São Gabriel, Tijucas e o Batólito Pelotas (CHEMALE, 2000; HARTMANN *et al.*, 2007). Os terrenos tectonoestruturais que compõem o Escudo Sul-Rio-Grandense são compartimentados por três zonas de cisalhamento principais: Zona de Cisalhamento Ibaré, Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul e Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu. O Terreno São Gabriel está limitado ao sudoeste pela Zona de Cisalhamento Ibaré (orientação NW–SE), que o separa do Terreno Taquarembó, e ao leste pela Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul (orientação NE–SW), que o separa do Terreno Tijucas (SAALMANN *et al.*, 2005; HARTMANN *et al.*, 2007). As principais estruturas deformacionais no interior do Terreno São Gabriel apresentam orientação NE–SW, denotadas principalmente pelas zonas de falha Cabritos–Perau e Segredo.

4.2 Bacia do Camaquã

A Bacia do Camaquã é uma bacia de idade neoproterozoica-cambriana, com elongação NE-SW, e é compartimentada pelas sequências vulcanossedimentares tardi-orogênicas que recobrem parcialmente os Terrenos Tijucas, São Gabriel e seus contatos estruturais, constituem o registro da evolução deposicional que culminou na formação da Bacia do Camaquã. Essas unidades foram acumuladas em lócus deposicionais interconectados, cuja gênese está associada à dinâmica pós-colisional que sucedeu a amalgamação dos terrenos tectônicos do Escudo Sul-Rio-Grandense (Fragoso Cesar *et al.*, 2000; Paim *et al.*, 2000, 2014).

Figura 3 Divisão geológica esquemática do Escudo Sul-rio-grandense com os 4 blocos tectônicos e localização da Bacia do Camaquã



Fonte: Adaptado de Hartmann et al. (2007) por Lopes (2018).

4.3 Estruturação da Bacia do Camaquã

A distribuição do preenchimento da Bacia do Camaquã é delimitada por depressões alongadas orientadas na direção NE–SW, separadas por altos do embasamento, representados pelos domos Santana da Boa Vista e Vigia, pelo Antiforme de Capané e pelos altos de Caçapava do Sul e Lavras do Sul. A alternância entre domos e bacias alongadas (do tipo pull-apart), associada a zonas de cisalhamento transcorrentes e oblíquas de alto ângulo, tem sido interpretada como o resultado de processos deformacionais compressivos que dominaram a fase final da evolução do Cinturão Dom Feliciano (CHEMALE, 2000; SILVA *et al.*, 2005; SAALMANN *et al.*, 2011; PHILIPP *et al.*, 2016).

Esses processos estão associados à colisão entre os crátons do Rio de La Plata e Kalahari durante a construção da porção sudoeste do paleocontinente Gondwana (SAALMANN *et al.*, 2011; PHILIPP *et al.*, 2016; HUECK *et al.*, 2018). A evolução desse sistema colisional originou processos de escape tectônico, que distribuíram a deformação por meio da alternância entre faixas com regimes transpressionais (domos) e transtensionais (bacias alongadas) (FERNANDES *et al.*, 1992; PHILIPP *et al.*, 2016).

Esses altos do embasamento são limitados por zonas de falha de mergulho íngreme, orientadas NE–SW, referidas como Sistema de Falhas do Irapuá por Ribeiro *et al.* (1966). Os mesmos autores também destacaram a ocorrência de zonas de falha com mergulho íngreme e orientação NW–SE, denominadas Sistema de Falhas do Cerro da Vigia.

Com base na análise estratigráfica dos diferentes grupos sedimentares e vulcânicos da Bacia do Camaquã, pesquisas anteriores (FRAGOSO-CESAR *et al.*, 2000; PAIM *et al.*, 2000; JANIKIAN *et al.*, 2003, 2005; FAMBRINI *et al.*, 2005, 2007; BORBA *et al.*, 2006; LIMA *et al.*, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2010, 2012) demonstraram a influência das falhas sin-sedimentares nas bordas da bacia e sua importância para a evolução da arquitetura das fácies.

A maioria desses pesquisadores destacou a ocorrência de grandes falhas transcorrentes dentro dos limites de cada grande ciclo deposicional. A arquitetura de fácies da maior parte dos grupos estratigráficos indicou deposição em sistemas de leques aluviais e rios trançados, que fluíam em direção ao centro da bacia. Essas características sugerem que a cinemática das falhas estava associada a movimentos simultâneos de transcorrência e extensão.

A ocorrência de sucessões vulcânicas nos Grupos Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas da Bacia do Camaquã, juntamente com os granitos associados, indica uma relação entre o alto gradiente térmico da crosta e os principais sistemas de falhas transcorrentes. A composição isotópica e geoquímica dessas associações vulcânicas sugere um magmatismo relacionado à ascensão do manto, ocorrida ao longo de cerca de 50 milhões de anos (LIMA e NARDI, 1998; WILDNER *et al.*, 2002; SOMMER *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2007).

A importância da cinemática extensional e transcorrente é descrita durante a fase pós-colisional da Orogênese Dom Feliciano, associada aos últimos movimentos de escape das principais zonas de cisalhamento que afetaram o Cinturão Dom Feliciano e geraram a Bacia do Camaquã (FERNANDES *et al.*, 1992; CEMALE, 2000; PAIM *et al.*, 2000, 2014; PHILIPP *et al.*, 2016).

4.4 Estratigrafia da Bacia do Camaquã

O Grupo Maricá é representado exclusivamente pela Formação Maricá, interpretada como uma sequência sedimentar composta predominantemente por clastos vulcânicos, com espessura estimada em aproximadamente 4.000 metros (PAIM *et al.*, 2000), organizados em três pacotes sedimentares distintos (BORBA *et al.*, 2006; BORBA *et al.*, 2008).

Neste trabalho, o Complexo Intrusivo de Lavras do Sul é considerado correlato ao Grupo Bom Jardim, ambos integrantes da chamada Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, conforme proposto por Lima e Nardi (1998). O Grupo Bom Jardim é constituído por uma sequência de cerca de 2.000 metros de espessura (JANIKIAN *et al.*, 2003), composta por rochas

vulcano-sedimentares da Formação Hilário, com predominância de derrames andesíticos de fluxo (NARDI & LIMA, 1985) e rochas piroclásticas (LOPES, 2018), além de ocorrências de rochas lamprofíricas (LIMA & NARDI, 1998) e intercaladas com unidades sedimentares na porção central e ocidental da bacia.

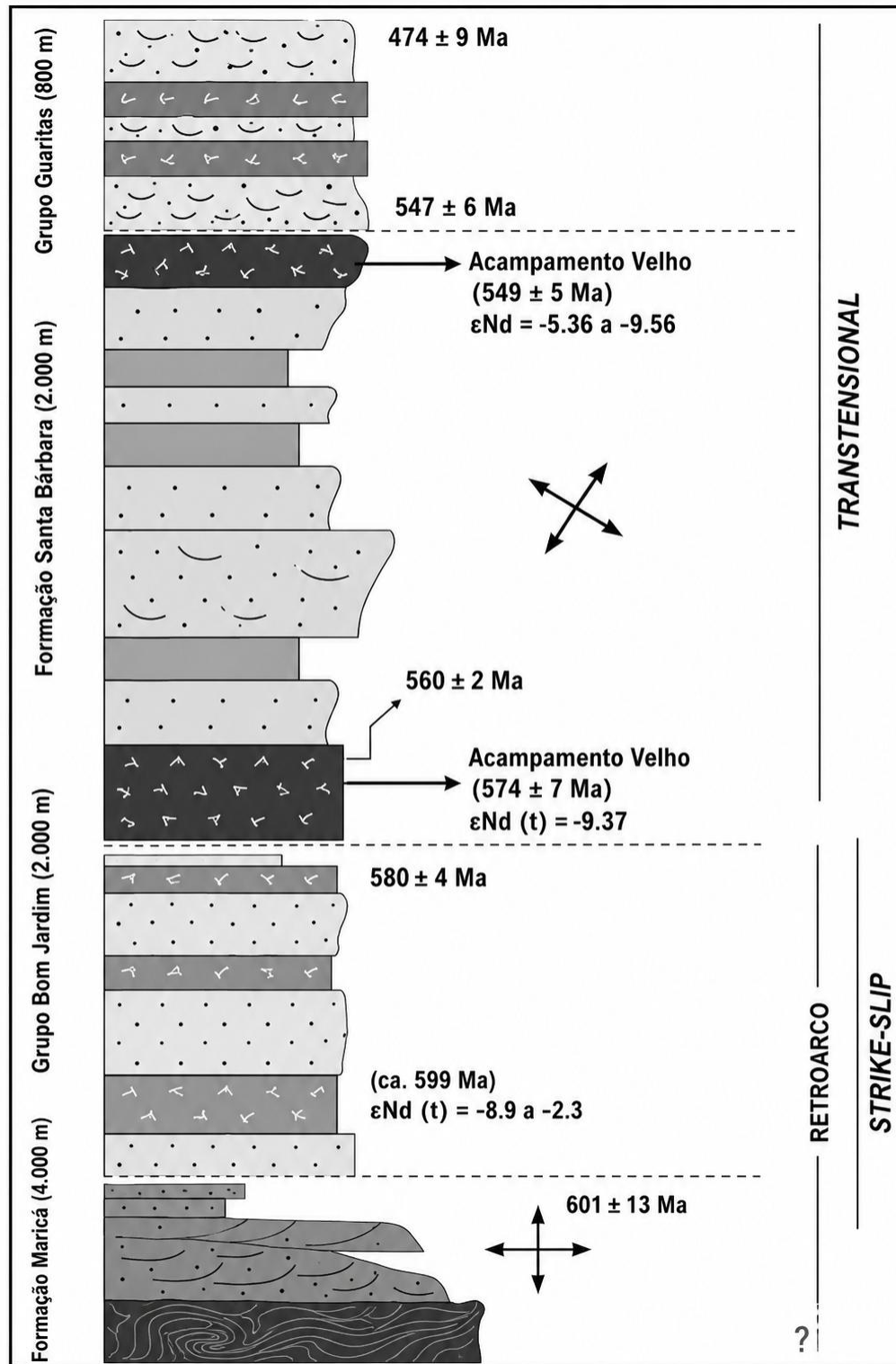
O Complexo Intrusivo de Lavras do Sul é constituído por um núcleo de fase plutônica central (NARDI, 1984; RAPOSO & GASTAL, 2009; GASTAL *et al.*, 2015), além de intrusões subvulcânicas monzoníticas, com distribuição predominante na margem nordeste do complexo (NARDI, 1984; GASTAL *et al.*, 2006).

O Grupo Santa Bárbara compreende três formações principais: as rochas vulcano-sedimentares da Formação Santa Fé, as rochas sedimentares da Formação Santa Bárbara (Bicca *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014) e as rochas vulcânicas bimodais da Formação Acampamento Velho (SOMMER *et al.*, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2012), esta última representa uma importante fase vulcânica pós-orogênica.

Por fim, o Grupo Guaritas é composto pelas rochas vulcânicas da Formação Rodeio Velho e pelos pacotes sedimentares das Formações Pedra Pintada e Guaritas, os quais representam os estágios finais de preenchimento da Bacia do Camaquã (ALMEIDA *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

A Figura 4 representa um perfil estratigráfico simplificado da Bacia do Camaquã com uma breve contextualização de sua geocronologia.

Figura 4 Coluna estratigráfica simplificada da Bacia do Camaquã – Sequências vulcano-sedimentares Ediacaranas a Cabrianas. Coluna baseada nas referências a seguir: Almeida *et al.*, 2012; Leite *et al.*, 1995; Remus *et al.*, 2000a; Gastal *et al.*, 2006; Janikian *et al.*, 2012; Sommer *et al.*, 2005; Maraschin *et al.*, 2010; Gastal *et al.*, 2015; Chemale *et al.*, 2000; Matté *et al.*, 2016.

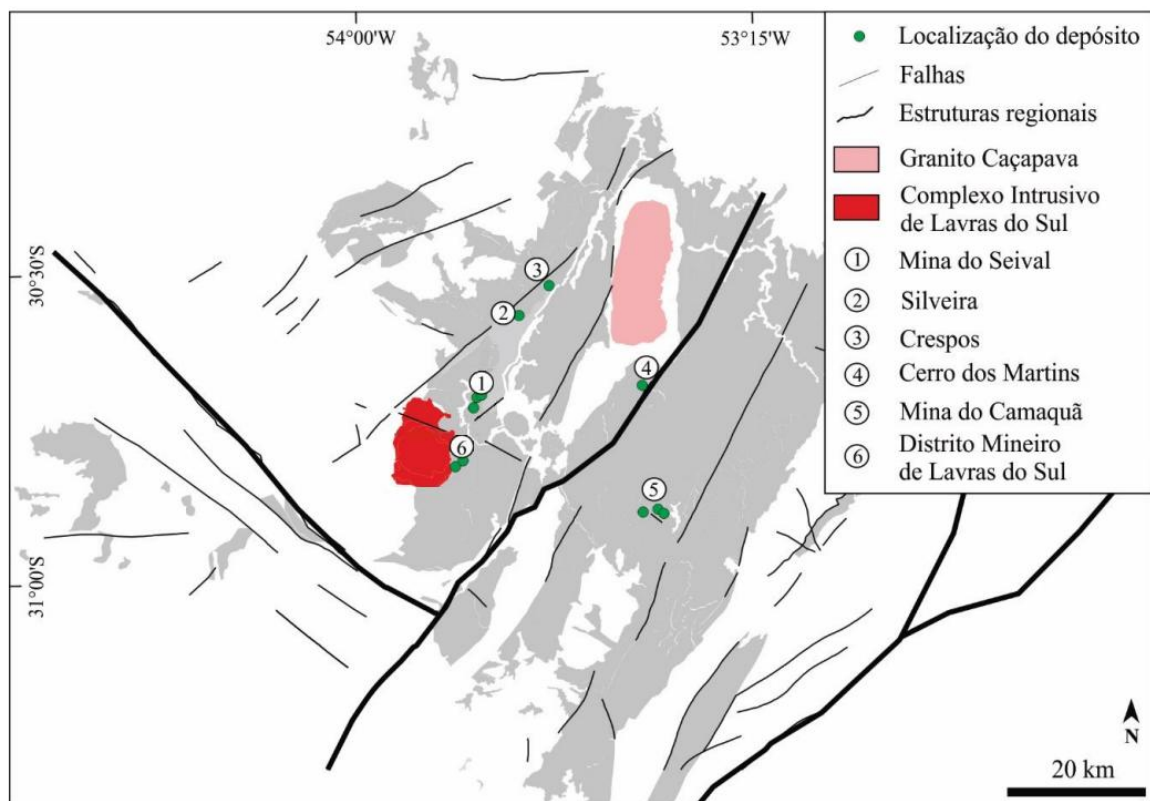


Fonte: Fontana (2016)

4.5 Ocorrências e depósitos na Bacia do Camaquã

Na Bacia de Camaquã, as jazidas mais significativas são as Minas do Camaquã, que possuem o maior volume de minério (REMUS *et al.*, 2000; LAUX *et al.*, 2005; RENAC *et al.*, 2014), que compreende as minas Uruguai, São Luiz Cu-(Au, Ag) e o depósito Santa Maria Pb/Zn-(Cu, Ag). Outro importante depósito de cobre é o Cerro dos Martins, hospedado em rochas vulcanogênicas e sedimentares do Grupo Bom Jardim (REMUS *et al.*, 2000; TONIOLO *et al.*, 2004), localizado na região de Caçapava do Sul (Figura 5). As minas Crespos e Silveira ocorrem associadas ao magmatismo Acampamento Velho, ao norte da Mina do Seival.

Figura 5 Localização das principais minas de Cu, Au-Cu e Pb-Zn na Bacia do Camaquã



Fonte: Lopes (2018), modificado de Toniolo et al. (2007).

5 GEOLOGIA DAS MINAS DO SEIVAL

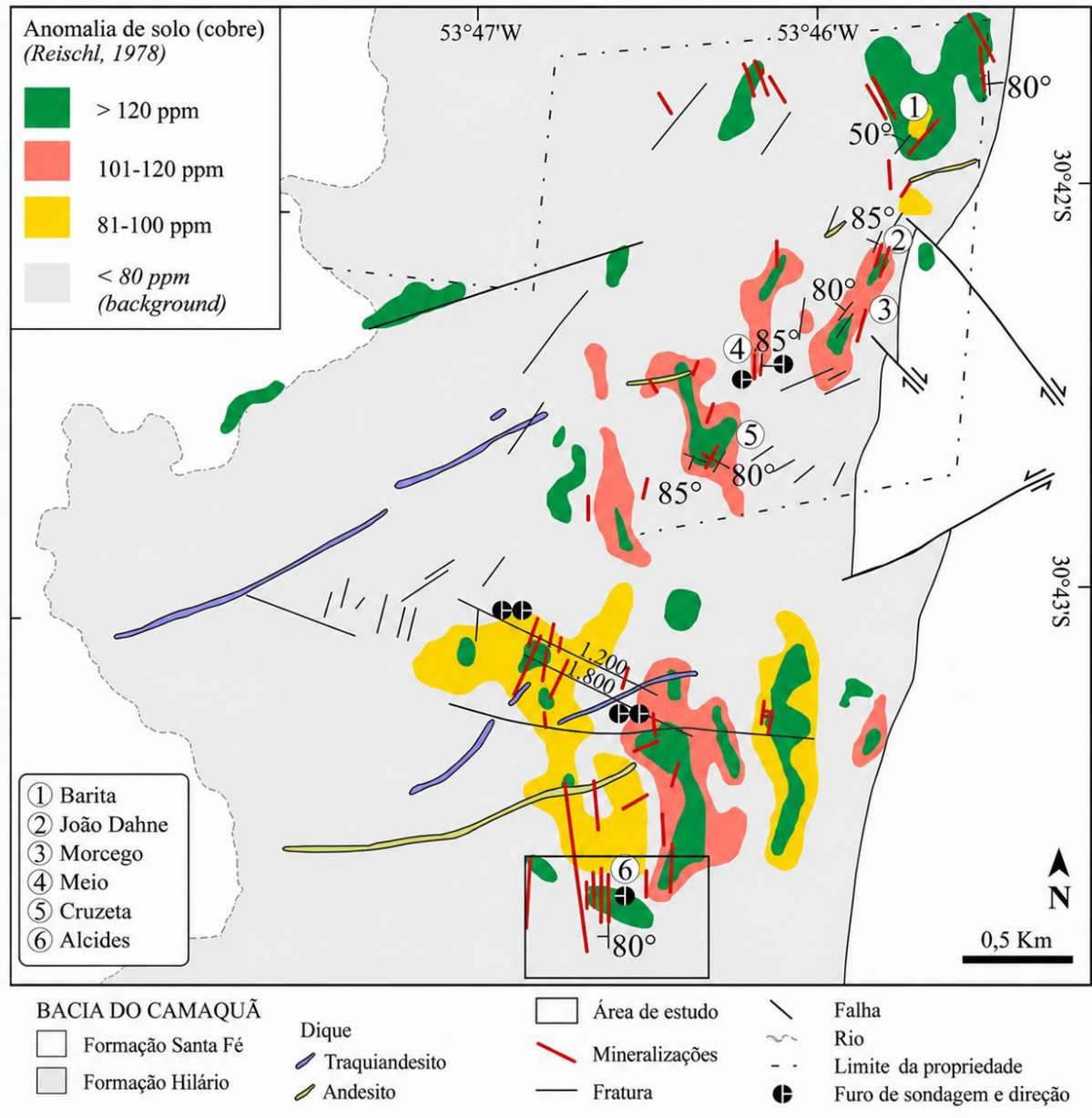
As rochas da Formação Hilário apresentam composição predominantemente intermediária, com afinidade cálcio-alcalina de alto potássio a shoshonítica. A unidade abrange uma ampla gama composicional, desde termos básicos até ácidos, representada por rochas efusivas, hipabissais e depósitos vulcanoclásticos subaéreos subordinados (Nardi & Lima, 1985; Lima *et al.*, 2007). Os níveis basais são mais máficos, enquanto as rochas de composição intermediária constituem os litotipos predominantes da Formação Hilário na região das Minas do Seival. São comuns olivina-basaltos, traquibasaltos e traquiandesitos, associados a intrusões hipabissais monzoníticas, quartzomonzoníticas e lamprofíricas. Os depósitos vulcanoclásticos incluem tufos finos a grossos, ignimbritos ricos em púmices e cristaloclastos, além de brechas vulcânicas. Esses depósitos foram gerados em ambiente vulcânico continental de moderada explosividade (Lima *et al.*, 2007; Paim *et al.*, 2014). Localmente ocorrem depósitos conglomeráticos imaturos oligomíticos, interpretados como colapsos do edifício vulcânico, e camadas retrabalhadas ricas em clastos vulcanogênicos, possivelmente lahars. Idades U-Pb e Ar-Ar obtidas em andesitos da Formação Hilário estão situadas entre 585 e 591 Ma (Janikian *et al.*, 2008, 2012), posicionada no Ediacarano tardio. Esse magmatismo é interpretado como pós-colisional, associado ao estágio final do Ciclo Brasileiro no Cinturão Dom Feliciano. O Grupo Bom Jardim, em sua área-tipo (Caçapava do Sul), compreende sucessões sedimentares e vulcânicas com contato erosivo/discordante sobre o Grupo Maricá. Atualmente é subdividido em três formações: Cerro da Angélica, Hilário e Picada das Graças (Janikian *et al.*, 2003; Paim *et al.*, 2014).

5.1 Controle Estrutural das Minas do Seival

As rochas vulcanogênicas das Minas do Seival apresentam fraturamento intenso, característico de deformação rúptil dominante, com fraturas subverticais de direção NE-SW (principal) e NW-SE (subordinada). Essas estruturas rúpteis resultam, em grande parte, da reativação de zonas de cisalhamento regionais durante eventos tectônicos tardios que afetaram o Escudo Sul-Rio-Grandense (LOPES *et al.*, 2018, 2019; FONTANA *et al.*, 2019). O sistema de falhas NW-SE é correlacionável ao Lineamento de Ibaré, localizado a oeste da área. A orientação dessas falhas reflete a influência dos campos tensionais principais no estágio pós-colisional do Cinturão Dom Feliciano (PAIM *et al.*, 2014; GASTAL *et al.*, 2015). A unidade não exhibe feições deformacionais dúcteis, afetada exclusivamente por falhas e fraturas subverticais, que atuaram como vias preferenciais para a circulação de fluidos mineralizantes

de Cu, que exibe anomalias geoquímicas de solo de cobre próximas às zonas de maior controle estrutural (Figura 6) (LOPES *et al.*, 2018; FONTANA *et al.*, 2017).

Figura 6 Mapa geológico e de anomalias geoquímicas de cobre da região do Seival



Fonte: Modificado de Lopes (2018).

5.2 Alteração Hidrotermal

A alteração hidrotermal foi dividida em dois episódios: propilitização e argílica intermediária. A propilitização ocorreu por ação de um fluido magmático a tardi-magmático e pode ser subdividida em duas etapas: uma de temperatura mais alta (350 a 250°C) caracterizada pela assembleia de clorita, quartzo, calcita e pirita com calcopirita, e pela albitização do plagioclásio; e uma etapa de temperatura mais baixa (250 a 150°C) caracterizada pela assembleia de clorita, interestratificado clorita/ esmectita, calcita, titanita, quartzo e hematita, com sulfetos ricos em cobre (bornita e calcocita). Assim, o enriquecimento de cobre foi associado ao estágio de propilitização, com a transformação de calcopirita em bornita e calcocita (FONTANA *et al.*, 2017, 2019).

A alteração argílica intermediária é de temperatura ainda mais baixa (<157°C) e ocorreu com uma influência maior de água meteórica. Esta alteração foi caracterizada pelas assembleias de esmectita e cristobalita (quartzo), e de barita, calcita, hematita e quartzo (FONTANA *et al.*, 2017; LOPES *et al.*, 2019). Malaquita e azurita ocorrem como produtos supergênicos (<50°C) devido à oxidação dos minerais ricos em cobre.

5.3 Geologia da Mina Alcides

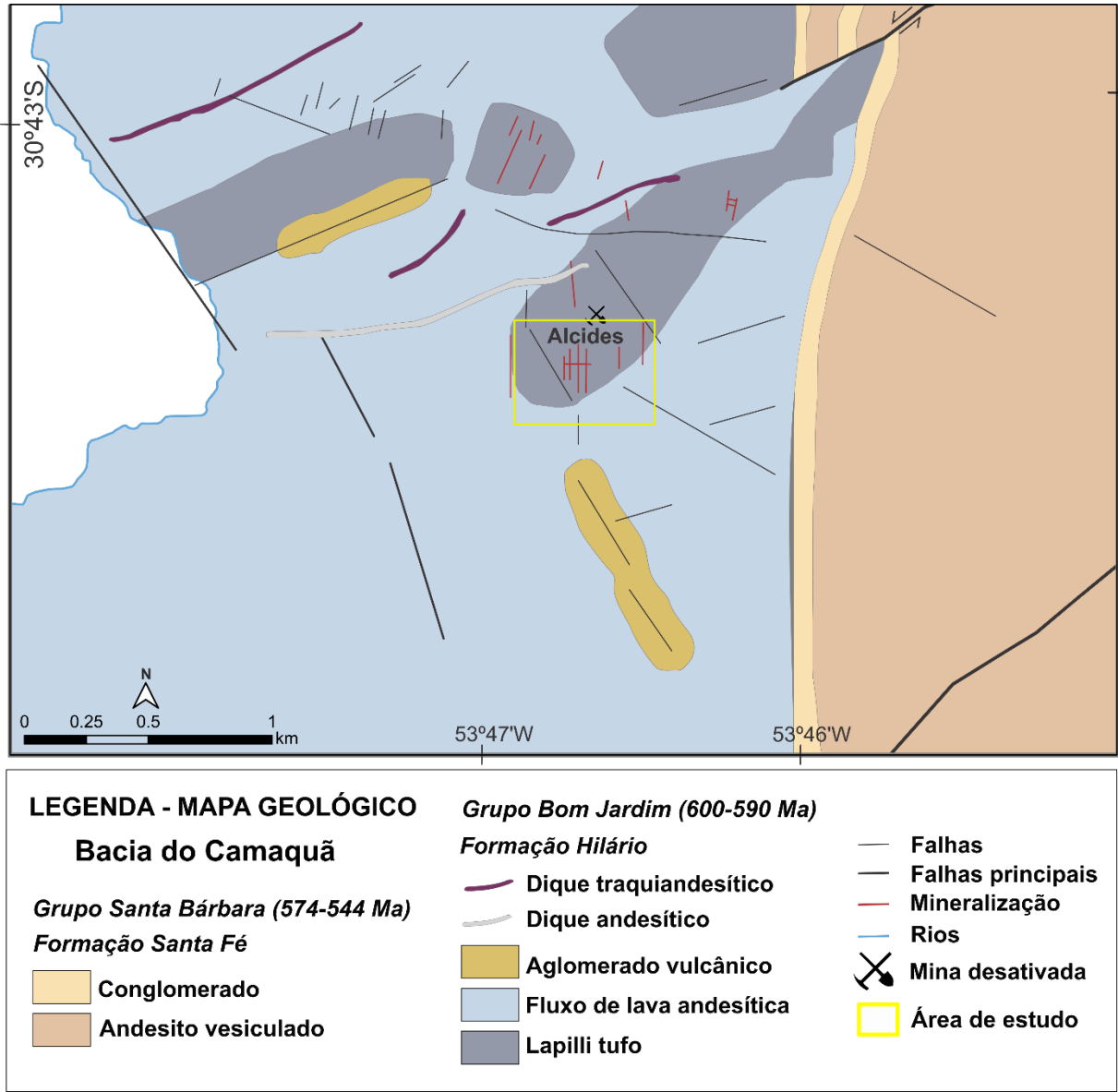
A Mina Alcides, localizada na porção sul das Minas do Seival, integra o conjunto de ocorrências mineralizadas associadas às rochas vulcanogênicas da Formação Hilário, Bacia do Camaquã. A rocha hospedeira consiste predominantemente em lapilli-tufos e brechas tufáceas, com clastos andesíticos (0,5–7 cm) de textura porfírica e amigdaloidal imersos em matriz fina intensamente alterada. A alteração hidrotermal é dominada por cloritização, com substituição parcial de plagioclásio e minerais máficos por clorita, carbonatos e fases secundárias, com tonalidades amarronzadas a esverdeadas (Lopes, 2013).

O principal controle da mineralização é estrutural, caracterizado por intenso fraturamento subvertical que hospeda múltiplas gerações de veios e brechas hidrotermais preenchidos por calcita, barita, quartzo (localmente vuggy), hematita, malaquita e azurita.

A evolução do sistema hidrotermal segue um modelo epitermal de baixa sulfidação com interação entre fluidos magmáticos e meteóricos (Lopes *et al.*, 2018, 2019). Estágios iniciais de maior temperatura favoreceram a deposição de sulfetos primários (pirita, calcopirita e bornita), associados a processos de albitização e cloritização. Nos estágios tardios, o influxo crescente de águas meteóricas provocou resfriamento do sistema (geralmente < 300 °C, com estágios finais < 150 °C), aumento do pH e oxidação de espécies sulfurosas, com precipitação de barita e carbonatos.

A intensa oxidação supergênica resultou na transformação dos sulfetos primários em calcocita secundária e minerais oxidados de cobre (malaquita e azurita). A ocorrência localizada de quartzo *vuggy* sugere episódios pontuais de fluidos mais ácidos ao longo do sistema.

Figura 7 Mapa geológico da porção sul das Minas do Seival



Fonte: Modificado de Lopes et al. (2018).

6 METALOGÊNESE

A revisão metalogenética deste trabalho está fundamentada em contribuições clássicas sobre sistemas pórfiro-epitermais, como Sillitoe & Hedenquist (2003) e Simmons *et al.* (2005), que oferecem sínteses abrangentes sobre o arcabouço tectônico, processos hidrotermais e características dos depósitos. Em escala de depósito, com ênfase nos processos mineralizantes locais e nas alterações hidrotermais, com destaque para estudos específicos da região de Seival, como Fontana *et al.* (2017, 2019) e Lopes *et al.* (2018, 2019).

6.1 Depósitos Epitermais

O termo epitermal descreve mineralizações formadas em ambientes hidrotermais rasos, sob condições de baixa temperatura e pressão, predominantemente em contextos subaéreos. A baixa pressão está associada a pequenas profundidades crustais, enquanto a temperatura de formação é limitada pela curva de ponto de ebulição da água em função da profundidade (boiling point-depth curve). A precipitação mineral ocorre tipicamente entre 150 °C e 300 °C, em profundidades que variam de aproximadamente 50 a 1.500 metros abaixo do nível freático (Simmons *et al.*, 2005).

A deposição dos metais resulta de mudanças físico-químicas nos fluidos hidrotermais, especialmente variações abruptas de temperatura e pressão, ebulição (boiling), mistura com águas meteóricas e interação fluido-rocha. Embora as condições físicas sejam determinantes na definição do sistema, a composição química dos fluidos exerce papel fundamental no transporte e na precipitação dos metais. Apesar de apresentarem mineralogia de ganga frequentemente similar (quartzo, carbonatos, barita e adularia), os depósitos epitermais exibem grande variabilidade na assembleia metálica, com diferentes proporções de Au, Ag, metais base e elementos como Hg, Sb, Te e Se (Simmons *et al.*, 2005).

Os sistemas epitermais são comumente associados a ambientes magmáticos e representados por modelos conceituais que integram a circulação de fluidos de origem magmática e meteórica. Esses modelos destacam a distribuição espacial dos diferentes estilos de mineralização em relação a intrusões porfíricas, bem como os processos de ebulição, neutralização e controle estrutural (Figura 8).

Entretanto, depósitos como os das Minas do Seival, na Bacia do Camaquã, apresentam características que destoam dos modelos clássicos, com indicação de ocorrência de sistemas hidrotermais mais complexos, com possivelmente múltiplos episódios de interação fluido-rocha e diferentes contribuições de fluidos magmáticos e meteóricos.

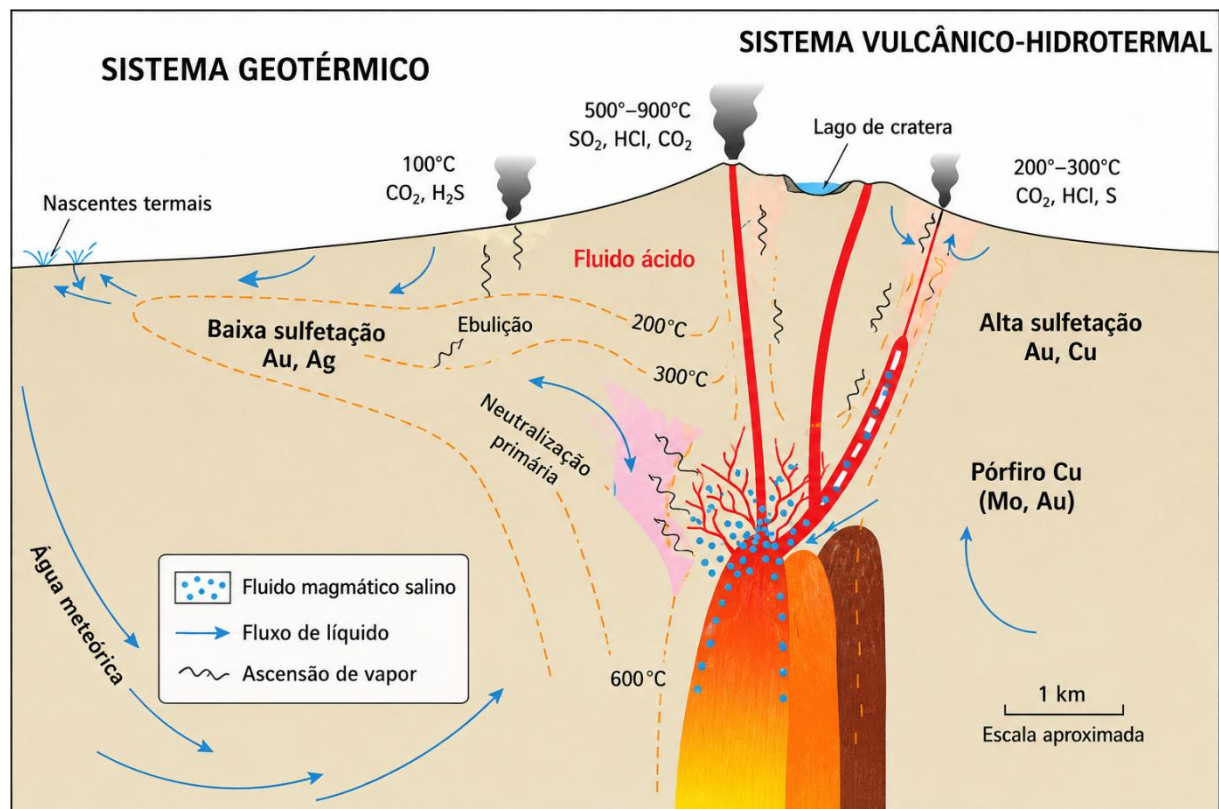
Diversos esquemas classificatórios foram propostos para os depósitos epitermais, baseados na mineralogia do minério e da ganga, bem como nas condições físico-químicas dos

fluidos (pH, Eh e estado de oxidação). Dentre eles, é possível destacar a classificação segundo o estado de sulfetação (sulfidation state), que reflete a fugacidade do enxofre (fS_2) e a estabilidade dos sulfetos (John *et al.*, 1999; Sillitoe & Hedenquist, 2003). Essa classificação divide os sistemas epitermais em três tipos principais:

- *Low-sulfidation (LS)* – Baixa sulfetação
- *Intermediate-sulfidation (IS)* – Sulfetação intermediária
- *High-sulfidation (HS)* – Alta sulfetação

Essa divisão está diretamente relacionada às características químicas dos fluidos, especialmente pH e Eh.

Figura 8 Esquema ilustrativo dos sistemas hidrotermais vulcânicos caracterizado como sistemas epitermais, com localização de ocorrência dos tipos *low-* e *high-sulfidation*, com indicações de evolução da temperatura e do fluido



Fonte: Adaptado de Hedenquist (1995).

O sistema *low-sulfidation* tem como característica fluidos redutores (H₂S) e pH neutro levemente alcalino. As mineralizações ocorrem como *stockworks*, veios e brechas e apresentam associação de pirita, arsenopirita, ouro, galena, adulária, calcita, illita, barita e quartzo (PIRAJNO, 2009).

O sistema *high-sulfidation* é caracterizado por fluidos de acidez elevada, com como HCl, SO₂ e H₂S provenientes do magma, o que provoca lixiviações intensas das rochas encaixantes. As mineralizações ocorrem disseminadas, em veios e em stockworks, com associações de caolinita, alunita, dickita, pirofilita, barita, pirita, enargita e diásporo. Outra característica dos sistemas epitermais high- sulfidation é a presença de capas de sílica (silica cap) com *vuggy* sílica, produto da lixiviação do fluido ácido percolante nas rochas.

O sistema *intermediate-sulfidation* resulta de fluidos com Eh e pH intermediários entre os anteriores, com participação de fluidos meteóricos e magmáticos. A característica especial do sistema epitermal *intermediate-sulfidation* é a associação polimetálica com Pb–Zn–Cu e a presença de carbonatos com manganês, principalmente de calcita manganesífera ou rodocrosita. Neste sistema são comuns sulfetos de Cu, Pb, Zn, juntamente com sericita. Minerais presentes nos depósitos *intermediate-sulfidation* são quartzo, carbonatos, illita, esmectita e, por vezes adulária em menor volume (HEDENQUIST *et al.*, 2000)

O estado de sulfetação pode variar em resposta às mudanças químicas no tempo ou espaço (EINAUDI *et al.*, 2005). Estas variações, associadas às modificações da mineralogia do minério, podem estar relacionadas aos processos do ambiente epitermal, assim como à composição das rochas ígneas e ambiente tectônico (JOHN *et al.*, 1999; SILLITOE & HEDENQUIST, 2003). A Tabela 1 sumariza as relações entre o estado de sulfetação dos ambientes epitermais, composição das rochas ígneas geneticamente relacionadas ao sistema epitermal (temporal e espacialmente) e o ambiente tectônico.

Tabela 2 Relações entre níveis de sulfetação dos ambientes formadores de minério, magmatismo e ambiente tectônico

Sulfetação	Associação Magmática	Regime Tectônico
Alta	Cálcico – alcalina Andesito – dacito	Arco magmático associado a um regime tectônico predominantemente neutro, com tendência a extensões moderadas Eventos de compressão são incomuns
Intermediária	Cálcico – alcalina Andesito – riolito	Arco magmático associado a um regime tectônico predominantemente neutro, com tendência a extensões moderadas Eventos deformacionais de compressão raros
Baixa	Cálcico – alcalina Alcalina Toleítica bimodal: basalto – riolito	Arco magmático associado ao rifteamento Rifte pós-colisional

Fonte: Adaptado de Sillitoe & Hedenquist (2003)

Os depósitos epitermais são formados por minério epigenético, geralmente hospedado em rochas vulcânicas contemporâneas e/ou mais antigas ou do embasamento, raramente em intrusões subvulcânicas. Os depósitos abrangem desde áreas menores que 10 km² até áreas maiores que 100 km². A geometria dos corpos de minério é variável, controlada por aspectos litológicos e estruturais e representam zonas de paleopermeabilidade em porções rasas de sistemas hidrotermais. Os corpos de minério em veios com mergulho acentuado, formados por dilatação e extensão são os mais comuns. Alguns são hospedados em falhas de grande porte, mas é mais comum que a mineralização ocorra em estruturas de segundo ou terceira ordem com deslocamentos inferiores a dez metros. A litologia é igualmente importante no controle do minério, especialmente em locais onde as diferenças de porosidade e permeabilidade direcionam o fluxo dos fluidos para contatos entre unidades ou rochas com maior permeabilidade. As características da rocha hospedeira pode ser originais ou produto da alteração hidrotermal e dissolução química ou brechação hidrotermal (SILLITOE, 1993). Desse modo, as falhas e fraturas, assim como brechas e rochas clásticas grosseiras representam as principais estruturas e rochas hospedeiras para minérios disseminados relacionados a veios, com continuidade por centenas a milhares de metros linearmente e dezenas a centenas de metros verticalmente. Na maioria dos casos, a ganga principal é o quartzo, que torna o minério resistente ao intemperismo. A Tabela 2 sumariza as características a respeito dos controles, morfologia e controle de permeabilidade para as mineralizações.

Tabela 3 Controles morfológicos sobre permeabilidade e corpos de minério epitermais

Controle	Morfologia do corpo de minério	Controle de permeabilidade
Estrutural: Condicional pela presença de falhas e fraturas, que orientam e facilitam o fluxo dos fluidos	Veios com alto mergulho Enxames de veios Stockworks Intersecções de falhas	Estruturas de segunda e terceira ordem Juntas de dilatação Estruturas transtensionais Fraturamento de caráter rúptil
Hidrotermal: Relacionado à dinâmica de pressões e reatividade dos fluidos	Brechas hidrotermais Diatremas Quartzo vuggy residual	Fraturamento hidráulico Erupções hidrotermais Lixiviação ácida intensa
Litológico: Influenciado pelas características físicas das rochas	Disseminações concordantes aos estratos	Ignimbritos ou unidades sedimentares grosseiras Contatos entre unidades permeáveis e impermeáveis

Fonte: Modificado de Sillitoe (1993) e Simmons (2005).

6.2 Metalogênese das Mineralizações nas Minas do Seival

Estudos recentes indicam que a evolução hidrotermal nas Minas do Seival segue um padrão análogo a sistemas de transição pórfiro-epitermal, marcado pela contribuição progressiva de fluidos magmáticos para meteóricos (BONGIOLO *et al.*, 2011; FONTANA *et al.*, 2017, 2019; LOPES *et al.*, 2018, 2019). O enriquecimento em cobre (Seival) e ouro (Lavras do Sul) está intimamente ligado a pulsos subvulcânicos tardios, nos quais fluidos magmáticos interagiram com sistemas de fraturas NE-SW, algo que favorece a deposição de sulfetos (Fontana *et al.*, 2019) (Figura 9). O Complexo Intrusivo de Lavras do Sul emplacou em pulsos sucessivos, após o vulcanismo Hilário, com colapso de caldeira e justaposição plutônico-vulcânica (GASTAL *et al.*, 2015).

Nesse contexto, os diques andesíticos a traquiandesíticos assumem papel fundamental como fontes prováveis de calor, fluidos magmáticos e elementos mineralizantes (Cu, Au, Ag). De acordo com Lopes *et al.* (2018), os diques orientados N40–60°E/70–88°N W na área de Seival são provavelmente a origem primária da mineralização, atuantes não apenas como condutos preferenciais alinhados às estruturas frágeis, mas também como gatilhos térmicos e químicos para o sistema hidrotermal. Essa interpretação é reforçada pela associação espacial entre diques, fraturas mineralizadas e halos de alteração (Lopes *et al.*, 2018, 2019; Fontana *et al.*, 2017). Embora ainda não haja modelo genético formal que defina o estado de sulfetação (*low-*, *intermediate-* ou *high-sulfidation*), as paragêneses minerais albita, clorita, camadas mistas clorita/esmectita, calcocita–bornita, barita, calcita, hematita e quartzo, são típicas de depósitos epitermais (SILLITOE, 2010), que sugere características predominantemente *intermediate-sulfidation* com possíveis traços de alta sulfetação em porções rasas ou erodidas. Essas feições posicionam Seival como a porção superficial de um sistema pórfiro-epitermal maior, possivelmente relacionado ao complexo de Lavras do Sul (MEXIAS *et al.*, 2007; BONGIOLO *et al.*, 2011).

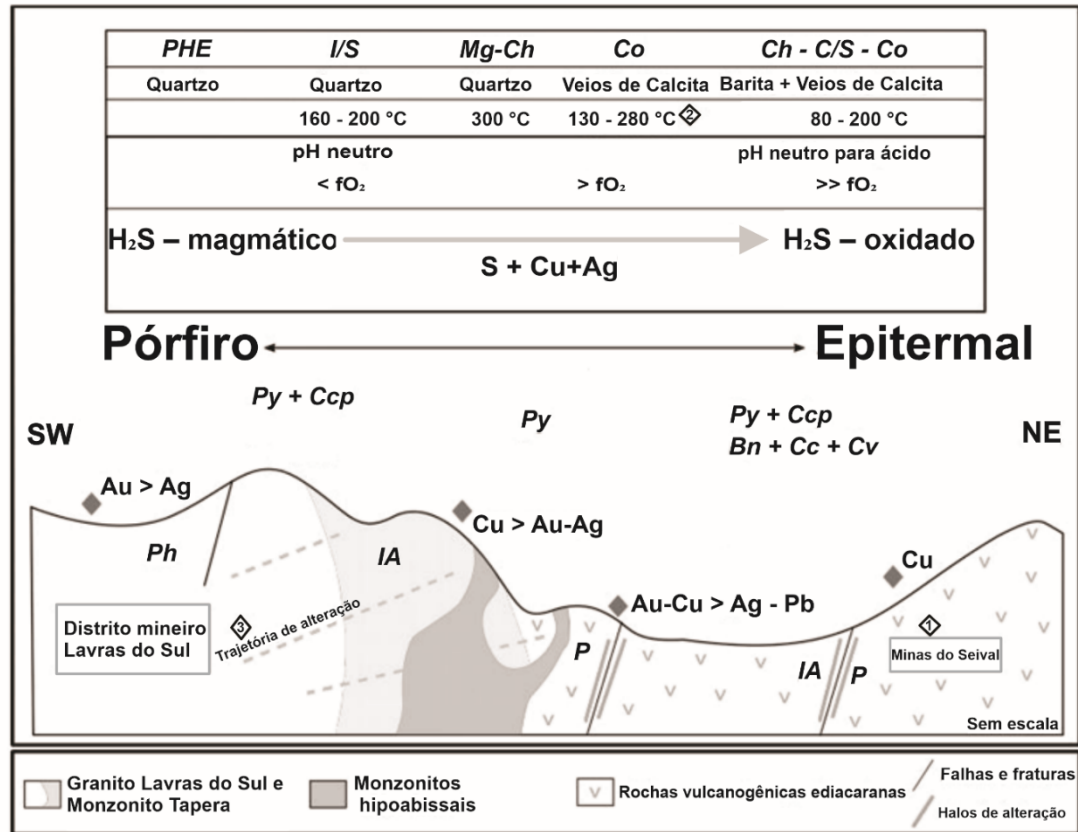
O controle principal da mineralização nas Minas do Seival e na região da Mina Alcides é estrutural, com as estruturas mineralizadas consideradas contemporâneas com base na mineralogia e no tipo de alteração. O campo de esforço compressivo máximo NW–SE está associado ao desenvolvimento da Zona de Cisalhamento de Caçapava do Sul e à geração de falhas como Cabritos–Perau, Segredo e Palma–Jacques. A análise da tectônica frágil revela que as mineralizações Au–Cu estão associadas a falhas normais e transcorrentes NE–SW e NW–SE, além de fraturas extensionais tipo veio. As áreas mineralizadas estão relacionadas diretamente à ascensão e emplacamento de diques monzoníticos e andesíticos a traquiandesíticos e atuaram como condutos para fontes de fluidos (LOPES *et al.*, 2018).

As duas áreas estudadas sofreram compressão NW–SE principal; contudo, as rochas vulcanogênicas da Mina Seival registram estruturas adicionais geradas sob tensões NE–SW. A Falha Palma–Jacques (N70°W) domina o Distrito Mineiro de Lavras do Sul, enquanto Cabritos–Perau (N50°E) e Segredo (N20°E) estão relacionadas diretamente ao Seival, e as zonas de cisalhamento Ibaré e Caçapava do Sul, respectivamente. A cronologia relativa indica que a compressão NW–SE e as fraturas mineralizadas estão relacionadas a movimentos transcorrentes pós-colisionais no Cinturão Dom Feliciano, com atividade tectônica de escape no Ediacarano Médio a Tardio, incluso o magmatismo do Grupo Bom Jardim e intensa circulação de fluidos ligada aos diques andesíticos (GASTAL *et al.*, 2006; JANIKIAN *et al.*, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2012).

Apesar da variação estrutural, Lopes *et al.* (2019) destaca a dificuldade em definir um modelo estrutural único, com as estruturas provavelmente formadas entre 600 e 580 Ma., os mesmos autores associam o mesmo campo tensional regional às zonas de cisalhamento e áreas mineralizadas, que confirma as ocorrências Cu–Ag em Seival localizadas adjacentes à Falha Palma–Jacques. As estruturas mineralizadas controlaram a inserção de diques e percolação de fluidos hidrotermais, responsáveis pela efusão das rochas da Formação Hilário (LOPES *et al.*, 2019; FONTANA *et al.*, 2017). Pelo menos duas outras ocorrências de cobre estão associadas a essas estruturas (TEIXEIRA, 1937; TONIOLO *et al.*, 2007).

Embora os diques andesíticos sejam portadores iniciais de elementos mineralizantes e forneçam a energia térmica essencial para o sistema hidrotermal (Lopes *et al.*, 2018), a concentração efetiva do minério resulta de episódios tectônicos que remobilizam e depositam os metais em zonas rúpteis. A alteração hidrotermal é caracterizada como epitermal, com estágios propilítico (clorita + epidoto + calcita) e argílico intermediário, favorecidos pela porosidade das rochas explosivas e presença de fraturas/falhas. As mineralizações ocorrem principalmente em zonas rúpteis N-NE e NW, com redução de teores de Cu profundidade (REISCHL, 1978), indicativo de ligação com diques (LOPES, 2018).

Figura 9 Seção sintética geológica e seção transversal do Distrito Aurífero de Lavras do Sul e Minas do Seival. Referências: Phe = fenita; I/S = illita-esmectita; Ch = clorita; Co = corrensitita; C/S = clorita-esmectita; IA = alteração argílica intermediária; P = alteração propilítica; Ph = alteração filítica; Py = pirita; Ccp = calcopirita; Bn = bornita; Cc = calcocita; Cv = covelita (modificado de Fontana, 2016).



Fonte: Modificado de Fontana (2016).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho empregou técnicas de prospecção e pesquisa mineral, com ênfase nos métodos geofísicos de magnetometria (campo potencial) e gamaespectrometria (método radiométrico). A descrição dessas técnicas foi organizada em quatro etapas, conforme apresentado a seguir.

Neste capítulo serão abordados os conceitos e fundamentações teóricas a respeito da magnetometria e gamaespectrometria, além de aplicações na exploração mineral para metais base e sulfetos em contextos semelhantes.

7.1 Referencial teórico do método de Magnetometria

A aplicação da magnetometria neste estudo está baseada na capacidade de discriminação de variações nas propriedades magnéticas associadas a diferentes domínios geológicos. No contexto da Formação Hilário, a presença de intrusões hipabissais, representadas por diques de composição andesítica a traquiandesítica, introduz heterogeneidades adicionais no campo magnético local. Essas condições tornam a magnetometria uma ferramenta eficaz para a investigação da arquitetura estrutural e da distribuição das unidades litológicas associadas ao sistema mineralizado, mesmo em escala de maior detalhe. O contraste entre domínios geológicos permite delinear bordas de corpos e lineamentos com maior precisão.

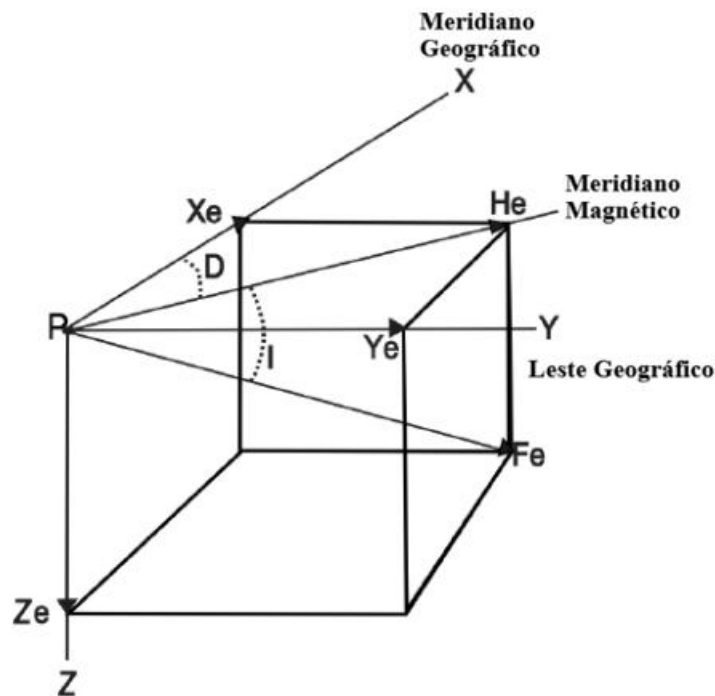
7.1.1 Campo Magnético Terrestre

O campo magnético da Terra resulta de um sistema dinâmico controlado por diferentes processos físicos que atuam em distintas escalas espaciais e temporais. Sua manifestação na superfície apresenta variações sistemáticas e irregulares de intensidade e direção, condicionadas tanto pela posição geográfica quanto por flutuações temporais associadas a fenômenos internos e externos ao planeta (TELFORD *et al.*, 1990; LOWRIE, 2007). Em termos observacionais, esse campo pode ser descrito como um vetor físico responsável pela orientação de materiais magnetizados, cuja direção e inclinação variam conforme a localização sobre o globo.

A caracterização quantitativa do campo magnético terrestre está baseada na decomposição do vetor campo total (F) em componentes ortogonais. A componente vertical (Z) expressa a parcela do campo perpendicular à superfície, enquanto a componente horizontal (H) representa sua projeção no plano horizontal, orientada em direção ao norte magnético. Dois parâmetros angulares descrevem a orientação desse vetor: a inclinação magnética (I), definida pelo ângulo entre F e o plano horizontal, e a declinação magnética (D), correspondente ao desvio angular entre o norte magnético e o norte geográfico (Figura 10). A intensidade do

campo total apresenta variações globais bem estabelecidas, com valores médios da ordem de 25.000 nT em baixas latitudes e superiores a 70.000 nT nas regiões polares (KEAREY, BROOKS & HILL, 2002).

Figura 10 Componentes geomagnéticas



Fonte: Modificado de Kearey *et al.* (2009).

Do ponto de vista teórico, o comportamento de primeira ordem do campo magnético terrestre pode ser aproximado por um modelo de dipolo magnético situado próximo ao centro da Terra. Esse dipolo está inclinado em relação ao eixo de rotação do planeta, com um ângulo próximo de $11,5^\circ$, o que explica a não coincidência entre os polos geomagnéticos e os polos geográficos. Nos polos magnéticos propriamente ditos, definidos pelas regiões onde o vetor campo apresenta inclinação vertical, e o equador geomagnético, que não coincide nem é paralelo ao equador geográfico, embora também estabeleça a divisão do planeta em hemisférios geomagnéticos (BLAKELY, 1996).

Em termos geofísicos, o campo magnético medido em superfície corresponde à soma de diferentes contribuições de origem distinta. A componente dominante, denominada campo magnético principal, é gerada pelos movimentos do material condutor no núcleo externo terrestre. Estão superpostas a essa contribuição variações associadas a correntes elétricas desenvolvidos na ionosfera e na magnetosfera, conhecidas como campo externo. Por fim, anomalias de menor comprimento de onda espacial refletem a influência das propriedades

magnéticas das rochas da crosta terrestre e localmente do manto superior, e constituem o chamado campo crustal, que é o principal alvo de investigações magnetométricas aplicadas à geologia e à prospecção mineral (TELFORD *et al.*, 1990).

7.1.2 Propriedades Magnéticas das Rochas e Minerais

Cada rocha contém uma pequena quantidade de minerais magnéticos, capazes de adquirir magnetização permanente durante sua formação ou por processos posteriores. A magnetização remanente (M_r) está relacionada ao campo geomagnético do passado geológico, enquanto a magnetização induzida (M_i) é adquirida pela influência do campo atual. Como as direções de M_r e M_i geralmente diferem, a magnetização total (M_t) resulta da soma vetorial das duas componentes.

A magnetização de cada rocha depende de sua susceptibilidade magnética, determinada pela quantidade e distribuição dos minerais magnéticos presentes. Esses minerais geram distorções locais no campo magnético terrestre, detectáveis e capazes de fornecer informações sobre a subsuperfície, inclusive ocorrências minerais potencialmente econômicas (MUSSETT & KHAN, 2000). Os principais minerais magnéticos são magnetita, pirrotita e ilmenita, que podem indicar a distribuição de minerais não magnéticos de interesse econômico, como calcopirita, galena e calcocita.

O campo magnético H é definido como a intensidade associada a um polo magnético devido à presença de outro polo posicionado no espaço. Quando um material é submetido ao efeito de H , adquire uma magnetização M proporcional ao campo, dada pela equação (7.1):

$$M = \chi H \quad (7.1)$$

onde:

M = magnetização induzida (A/m);

χ = susceptibilidade magnética (adimensional);

H = intensidade do campo magnético aplicado (A/m).

onde k representa a susceptibilidade magnética do material (Lowrie, 2007).

A indução magnética B é relacionada ao campo H pela equação (7.2):

$$B = \mu H = \mu_0(1 + k)H \quad (7.2)$$

sendo $\mu = \mu_0(1 + k)$ a permeabilidade magnética do material e μ_0 a permeabilidade do vácuo (Lowrie, 2007).

7.1.3 Diamagnetismo

Os materiais diamagnéticos são caracterizados por apresentar susceptibilidade magnética baixa e negativa, o que resulta em uma magnetização induzida orientada no sentido oposto ao campo magnético externo aplicado. Ao remover o campo externo, a magnetização retorna imediatamente a zero, uma propriedade típica de átomos cujas camadas eletrônicas estão completamente preenchidas (TELFORD *et al.*, 1990). Esse tipo de magnetismo é reversível, de intensidade fraca e independente da temperatura.

Entre os minerais mais comuns nas rochas que exibem comportamento diamagnético merecem destaque o quartzo e a calcita, com valores de susceptibilidade magnética em torno de -10^{-6} em unidades do Sistema Internacional (SI) (LOWRIE, 2007). O diamagnetismo, embora fraco, contribui de forma sutil para as respostas magnéticas observadas em rochas, geralmente sobreposto por efeitos paramagnéticos ou ferrimagnéticos mais intensos em minerais portadores de ferro.

7.1.4 Paramagnetismo

Materiais paramagnéticos apresentam susceptibilidade magnética positiva de baixa magnitude, que reflete uma resposta fraca ao campo magnético aplicado. Nesses materiais, a magnetização induzida é linearmente dependente da intensidade do campo externo e ocorre paralelamente à sua direção, cessado completamente com a remoção do campo. Um comportamento magnético reversível e de pequena intensidade.

Uma característica fundamental do paramagnetismo é a dependência inversa da suscetibilidade magnética com a temperatura, descrita aproximadamente pela Lei de Curie ($\chi \propto 1/T$). Dessa forma, o aumento da temperatura resulta na diminuição da suscetibilidade magnética. No contexto geológico, diversos silicatos ferromagnesianos, como olivinas, piroxênios e anfibólios contendo ferro em suas estruturas cristalinas, apresentam comportamento predominantemente paramagnético. Embora esses minerais sejam amplamente distribuídos em rochas ígneas e metamórficas, sua contribuição para a resposta magnética total das rochas é geralmente limitada, sendo frequentemente mascarada pela presença de minerais ferrimagnéticos e ferromagnéticos. (TELFORD *et al.*, 1990; LOWRIE, 2007).

7.1.5 Ferromagnetismo

O ferromagnetismo é caracterizado por susceptibilidades magnéticas elevadas e positivas, associadas à forte interação entre momentos magnéticos atômicos. Essa interação,

conhecida como interação de troca, promove o alinhamento paralelo dos momentos magnéticos, que resulta na geração de magnetização espontânea mesmo na ausência de um campo externo aplicado. À medida que a intensidade do campo aumenta, a magnetização cresce até atingir um estado de saturação.

Outra propriedade marcante dos materiais ferromagnéticos é a capacidade de reter parte da magnetização após a remoção do campo externo, fenômeno conhecido como magnetização remanente. Esse comportamento persiste até que a temperatura atinja um valor crítico, denominado temperatura de Curie, acima do qual o ordenamento magnético é destruído e o material passa a exibir comportamento paramagnético (LOWRIE, 2007; TELFORD *et al.*, 1990).

Os minerais como a magnetita e pirrotita apresentam comportamento ferrimagnético, uma forma particular de ferromagnetismo, e constituem os principais responsáveis pelas anomalias magnéticas observadas em rochas ígneas, metamórficas e em diversos tipos de mineralizações.

7.2 Referencial teórico do método de Gamaespectrometria

A gamaespectrometria aerogeofísica e terrestre é um método geofísico baseado na detecção e quantificação dos radioelementos naturais Potássio (^{40}K), Urânio (^{238}U) e Tório (^{232}Th) presentes nas rochas e no solo. Esses elementos emitem radiação gama durante sua desintegração radioativa, a qual pode ser detectada por espectrômetros de cristal cintilador (geralmente NaI(Tl)) ou semicondutores. O potássio ocorre principalmente em minerais como feldspatos alcalinos (ortoclásio, microclina), micas (biotita e muscovita) e argilominerais (ilita). Já o urânio e o tório são incompatíveis e ocorrem preferencialmente em minerais acessórios (zircão, monazita, apatita, xenotima) ou podem ser mobilizados durante processos hidrotermais e intempéricos (DENTITH & MUDGE, 2014; IAEA, 2003). A profundidade efetiva de investigação da gamaespectrometria é limitada, sendo da ordem de 30 cm em rochas e solos, embora possa variar em função da densidade, composição e condições de umidade do material (MINTY, 1997). Diferentes litologias apresentam assinaturas radioativas distintas, fator que permite sua utilização no mapeamento geológico, identificação de alterações hidrotermais, mapeamento de falhas e prospecção mineral (Moxham, 1963; Dickson & Scott, 1997; Wilford *et al.*, 1997).

Os principais picos espectrais utilizados na gamaespectrometria são apresentados na Tabela X. Esses picos permitem a separação espectral e o cálculo das concentrações de potássio (K%), urânio equivalente (eU ppm) e tório equivalente (eTh ppm).

Tabela 4 Principais janelas espectrais utilizadas em gamaespectrometria

Radioelemento	Nuclídeo utilizado	Energia (MeV)
Potássio (K)	^{40}K	1,46
Urânio (eU)	^{214}Bi (série do ^{238}U)	1,76
Tório (eTh)	^{208}Tl (série do ^{232}Th)	2,62

Fonte: Adaptado de IAEA (2003).

7.2.1 Comportamento Geoquímico dos Radioelementos nas Rochas

Para melhor interpretar os padrões observados nos dados gamaespectrométricos, é apresentada a seguir uma síntese do comportamento geoquímico dos radioelementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th) na crosta terrestre. Essa revisão estabelece os fundamentos necessários para a análise e discussão dos resultados obtidos na área de estudo. No contexto de levantamentos gamaespectrométricos, os elementos urânio e tório são representados como concentrações equivalentes (eU e eTh), estimadas a partir da radiação gama emitida pelos radionuclídeos ^{214}Bi e ^{208}Tl , pertencentes às séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th , respectivamente.

O potássio figura entre os elementos mais abundantes da crosta continental, com teores médios superiores a 2 %, concentrando-se principalmente em feldspatos potássicos e micas. Em menor extensão, integra argilominerais secundários formados por diagênese ou alteração hidrotermal, como a illita, que pode apresentar teores de K_2O próximos de 7,5 %, e, de forma subordinada, plagioclásios sódicos, geralmente com teores inferiores a 0,5 % de K_2O (DICKSON & SCOTT, 1997; DEER *et al.*, 1992). Esses minerais predominam em rochas félsicas, como granitos, riolitos e dacitos, e em certos sedimentos clásticos, como arcósios, lamitos, folhelhos e argilitos ricos em illita ou em interestratificados illita/esmectita (I/S), além de evaporitos potássicos, como carnalita e silvinita. Minerais como quartzo, olivina, clorita e carbonatos praticamente não contêm potássio, enquanto piroxênios e anfibólios exibem apenas traços. Segundo Ulbrich *et al.* (2009), a crosta continental apresenta média de 1,50 % K (1,81 % K_2O), com enriquecimento acentuado na crosta superior (2,32 % K; 2,80 % K_2O) e depleção na inferior (0,51 % K; 0,61 % K_2O). Elemento litófilo incompatível e volátil, o potássio integra o grupo dos cátions LIL (*large ion lithophile*) e LFS (*low field strength*) e exibe elevada

mobilidade em processos hidrotermais e de intemperismo em climas tropicais e subtropicais (ROLLINSON, 1994; WILFORD *et al.*, 1997).

O urânio apresenta abundância média de 1,3 ppm na crosta continental, com maior concentração na crosta superior (2,7 ppm) e depleção na inferior (0,2 ppm). O tório, por sua vez, exibe teor médio de 5,6 ppm, enriquecido na crosta superior (10,5 ppm) e reduzido na inferior (1,2 ppm). Ambos ocorrem predominantemente em minerais acessórios de rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas, com maior diversidade em granitoides evoluídos (BEA, 1996; ULBRICH *et al.*, 2009). Em rochas ígneas e metamórficas, U e Th apresentam comportamento semelhante; contudo, em ambientes sedimentares e no manto de intemperismo, a mobilidade do tório é substancialmente inferior à do urânio. Sob condições oxidantes, o urânio é altamente móvel, que pode ser transportado a longas distâncias, enquanto em condições redutoras tende a ser imobilizado. Os principais controles da mobilidade do urânio incluem o potencial redox, o pH e a presença de adsorventes e complexantes orgânicos (QUEIROZ, 1975; GODOY, 2010). A razão Th/U nas rochas varia tipicamente entre 2,7 e 6, que pode indicar processos de intemperismo em presença de valores elevados.

7.2.2 Aplicabilidade da gamaespectrometria na prospecção mineral

A gamaespectrometria é uma técnica geofísica amplamente utilizada na prospecção mineral, especialmente em depósitos hidrotermais, devido à sua sensibilidade às variações nas concentrações de potássio (K), urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh) nas rochas encaixantes (DICKSON; SCOTT, 1997). Diferentemente de outros métodos geofísicos, essa técnica permite o mapeamento de halos de alteração hidrotermal para além do corpo mineralizado.

O potássio apresenta alta mobilidade em fluidos hidrotermais, frequentemente mobilizado durante processos como sericitização, adularização, cloritização e carbonatação (DICKSON; SCOTT, 1997). O urânio equivalente (eU) reflete a mobilidade do U em ambientes hidrotermais e supergênicos, enquanto o tório equivalente (eTh), devido à baixa mobilidade do Th, atua como elemento de referência geoquímico (WILFORD *et al.*, 1997). Em função dessas características, razões como Th/K, K/eU e Th/eU constituem ferramentas exploratórias eficazes na identificação de zonas alteradas (DICKSON; SCOTT, 1997; WILFORD *et al.*, 1997).

A distribuição dos radioelementos em superfície resulta da interação entre composição litológica, intemperismo, pedogênese e processos geomorfológicos (WILFORD *et al.*, 1997). Em climas úmidos, como no sul do Brasil, frequentemente ocorre lixiviação de K,

enriquecimento relativo de eTh e remobilização de eU, com contrastes espectrométricos em relação ao *background* regional (WILFORD *et al.*, 1997).

Dessa forma, a gamaespectrometria terrestre constitui um método complementar eficiente no mapeamento de estruturas e zonas de alteração hidrotermal, especialmente quando integrada a dados geológicos e geofísicos (SHIVES *et al.*, 2000).

7.3 Assinaturas Geofísicas de Depósitos Epitermais

Estruturas regionais que controlam o posicionamento de magmas férteis ou que favorecem a percolação de fluidos mineralizantes são frequentemente detectadas com maior clareza por meio da análise integrada de dados magnéticos e gamaespectrométricos. A compreensão desses controles estruturais em escala regional constitui um elemento essencial para estratégias de prospecção mineral, uma vez que as interseções de lineamentos apresentam maior favorabilidade para a localização de mineralizações associadas a intrusões magmáticas e à circulação de fluidos hidrotermais.

Nesse sentido, sistemas hidrotermais podem gerar assinaturas magnéticas heterogêneas, incluso tanto baixos magnéticos (decorrentes da destruição de magnetita por processos de alteração ou variações litológicas), quanto altos magnéticos, quando a magnetita é preservada ou formada secundariamente (IRVINE e SMITH, 1990; CLARK, 2014). Essa dualidade é particularmente característica de ambientes epitermais, onde temperaturas relativamente baixas (geralmente inferiores a 350 °C) resultam em respostas magnéticas não uniformes. Dessa forma, a combinação de baixos lineares associados a zonas de alteração hidrotermal e altos cônicos localizados relacionados a intrusões subvulcânicas representa uma assinatura típica e esperada para processos hidrotermais nesse tipo de depósito.

Complementarmente, a gamaespectrometria merece destaque como ferramenta eficaz para o mapeamento de zonas de enriquecimento potássico em superfície, que frequentemente correspondem a alterações hidrotermais potássicas (propilítica ou argílica) ligadas à circulação de fluidos. A integração desses métodos, magnético para identificação de estruturas profundas e bordas de corpos intrusivos, e gamaespectrométrico para assinatura superficial de alteração, oferece uma abordagem metodológica robusta e adequada à prospecção em contextos epitermais e de transição pórfiro-epitermal.

7.4 Levantamento geofísico terrestre

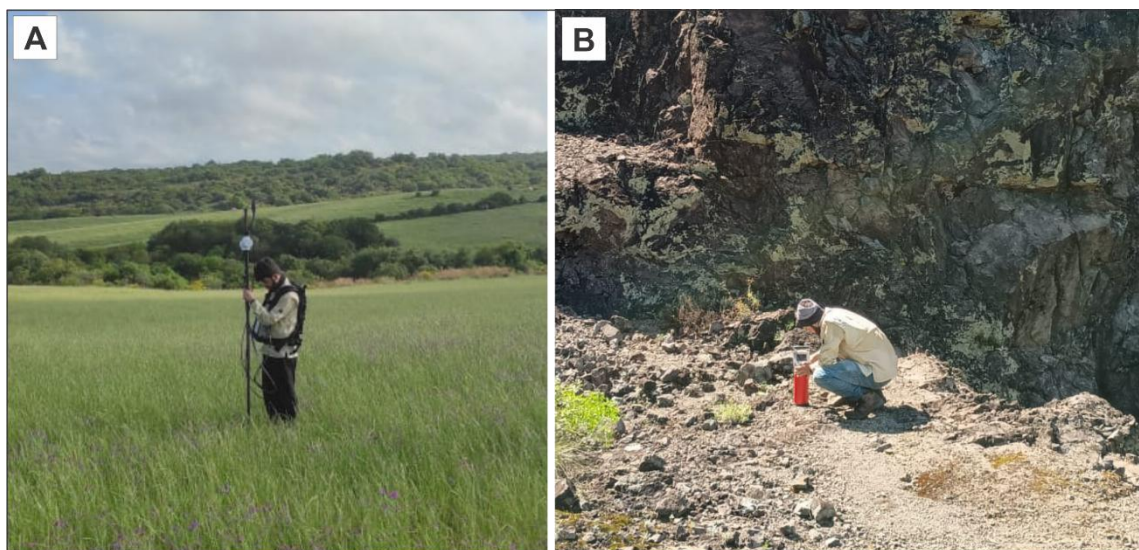
Embora as plataformas aéreas de aquisição de dados geofísicos sejam as mais difundidas na literatura, em razão da disponibilidade de levantamentos regionais executados por serviços

geológicos e da elevada cobertura espacial proporcionada por esse tipo de levantamento, os métodos terrestres são mais adequados à investigação de depósitos de menor escala. A maior densidade amostral das malhas de aquisição possibilita melhor detalhamento das características geométricas e morfológicas dos alvos mineralizados.

O levantamento geofísico foi realizado com equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Geofísica do Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), por meio de magnetômetros de precessão de prótons modelo GSM-19 da GEM Systems Inc. Para a gamaespectrometria, foi empregado o equipamento RS-332 *Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer System* da Radiation Solutions Inc., equipado com detector de óxido de germanato de bismuto de alta sensibilidade, proteção térmica e GPS interno (Radiation Solutions Inc., 2017) (Figura 11). O georreferenciamento das coordenadas dos pontos de leitura geofísica foi realizado por meio de GPS diferencial, complementado por um DGPS S860 Stonex (precisão de 0,5 m). Os dados foram referenciados ao sistema WGS 84 e projetados no sistema de coordenadas UTM, zona 22 Sul.

A área selecionada para a aquisição abrange aproximadamente 55 hectares, caracterizada predominantemente por vegetação rasteira e mata restrita às drenagens, com pontos isolados de rocha aflorante. As medições foram realizadas em contato direto do equipamento com a superfície, em condições de solo seco, com baixo risco de atenuação por umidade.

Figura 11 A) magnetômetro de precessão de prótons (GSM-19). B) RS-332 *Multipurpose Gamma-Ray Spectrometer*.



Fonte: autoria própria (2025).

Foram coletados 575 pontos de leitura, distribuídos em malha regular com espaçamento de 25 metros entre estações (Figura 12). A orientação dos perfis foi conduzida em campo por meio de DGPS, com acompanhamento em tempo real via tela de localização. O espaçamento adotado de 25 metros foi baseado em possíveis semelhanças com depósitos previamente conhecidos na região da Bacia do Camaquã e no Escudo Sul-Rio-Grandense, nos quais os corpos hospedeiros de mineralização tendem a apresentar dimensões inferiores à malha de aquisição (MOREIRA *et al.*, 2019; LENHARE & MOREIRA, 2020; ALVES, 2025).

Figura 12 Malha regular para a aquisição dos dados de magnetometria e gamaespectrometria



Fonte: autoria própria (2025).

7.5 Processamento e Tratamento dos Dados

Esta etapa compreendeu o conjunto de procedimentos aplicados aos dados adquiridos em campo, incluso correções, processamento, tratamento e interpolação por meio de software especializado. Foi utilizado o Geosoft® Oasis montaj®, plataforma amplamente reconhecida para o processamento de dados geofísicos, que possibilitou a preparação adequada do conjunto de dados para análises e interpretações geofísicas subsequentes.

O processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos teve como objetivo principal aprimorar a qualidade e a representação dos dados geofísicos, mais

adequados à interpretação geológica. Esse procedimento envolveu a aplicação de filtros, que são operações matemáticas destinadas a realçar características específicas dos dados, conforme a necessidade interpretativa. Os filtros permitem destacar anomalias sutis, delimitar bordas anômalas com maior precisão ou identificar picos de anomalias. Não existe regra fixa para sua aplicação, pois são operações matemáticas flexíveis, que podem ser combinados de diversas formas para ressaltar feições geológicas de interesse.

7.5.1 Processamento da magnetometria

Neste trabalho, os dados magnetométricos foram processados na plataforma Oasis montaj® (Seequent/Geosoft). O mapa de Campo Magnético Total (CMT), obtido a partir dos dados de campo, constituiu o produto base para a aplicação dos filtros e transformações utilizados na geração dos mapas derivados empregados na interpretação geológica e estrutural. Os processamentos foram realizados com o auxílio da extensão MAGMAP.

7.5.2 Correção da variação diurna

A estação base consistiu em uma unidade fixa, responsável por registrar as variações do campo magnético circundante ao longo do período de aquisição. Essas variações decorrem principalmente da variação diurna do campo geomagnético, acrescida de eventuais ruídos antrópicos locais. Já as leituras da estação itinerante são influenciadas tanto pela variação diurna quanto pelas anomalias magnéticas locais, originadas das fontes geológicas presentes na área de levantamento.

A correção diurna tem como objetivo eliminar a influência temporal da variação diurna, para isolar apenas as anomalias relacionadas às fontes geológicas (rochas). Esse procedimento é realizado por subtração dos valores registrados na estação base dos dados coletados pelo magnetômetro itinerante, ajustados conforme o horário de aquisição. Em seguida, os dados corrigidos são somados ao valor de referência do campo magnético total para a região, obtido a partir do modelo IGRF (disponível em www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm). Para o período de aquisição, compreendido entre 30 de outubro e 2 de novembro de 2024, o valor de referência do campo magnético total foi de 22 521,2 nT. Após a aplicação da correção diurna, é obtido o campo magnético corrigido, que constitui a base para as etapas subsequentes de geração de mapas, aplicação de filtros e interpretações geofísicas.

A equação a seguir mostra os elementos para o cálculo da correção da variação diurna:

$$MAGcorr = Rover - Base + Datum \quad (7.3)$$

No qual: MAGcorr – campo magnético total corrigido;

Rover – valor do campo magnético de acordo com o magnetômetro itinerante;

Base – valor do campo magnético de acordo com o magnetômetro base;

Datum - valor do campo magnético terrestre, previamente conhecido do campo magnético da área de estudo

7.5.3 Redução ao Pólo Magnético

A Redução ao Polo Magnético (RTP) consiste em uma transformação aplicada aos dados magnetométricos com o objetivo de minimizar os efeitos da inclinação e declinação do campo geomagnético sobre a geometria das anomalias magnéticas. Essa transformação simula a resposta magnética sob condições equivalentes às observadas nos polos magnéticos, onde o campo induzido apresenta orientação aproximadamente vertical (TELFORD et al., 1990).

Como resultado, anomalias originalmente dipolares tendem a assumir configuração aproximadamente monopolar, posicionando seus máximos magnéticos mais próximos das fontes causadoras. Dessa forma, a RTP facilita a correlação espacial entre as anomalias magnéticas e os corpos geológicos responsáveis pela magnetização.

Para a geração dos grids magnetométricos, utilizou-se a rotina de interpolação bidirecional disponível no software Oasis montaj, permitindo a interpolação dos dados em malhas regulares de geometria quadrada e assegurando compatibilidade entre os diferentes produtos derivados do campo magnético anômalo.

Embora não tenham sido realizados estudos específicos de magnetização remanente, como medidas de susceptibilidade e magnetização natural remanente (NRM), não foram observadas distorções significativas nos produtos RTP que indicassem forte influência de remanência magnética. Dessa forma, assumiu-se que a magnetização induzida constitui a componente dominante para fins de interpretação regional.

7.5.4 Derivadas do Campo Magnético

A derivada vertical do campo magnético anômalo corresponde à variação do campo em relação à direção vertical e é amplamente empregada como um filtro passa-alta. Esse atributo intensifica a resposta de fontes rasas e destaca limites abruptos entre unidades com diferentes propriedades magnéticas, são especialmente eficaz na identificação de contatos litológicos e estruturas superficiais (COOPER & COWAN, 2008).

Por enfatizar componentes de curto comprimento de onda, frequentemente associadas a fontes rasas, a derivada vertical também amplifica ruídos de alta frequência. Assim, sua interpretação deve ser realizada de forma integrada com outros produtos magnetométricos.

As derivadas horizontais do campo magnético anômalo, representadas por D_x e D_y , correspondem às variações do campo nas direções ortogonais x e y , normalmente associadas aos eixos leste-oeste e norte-sul do sistema de coordenadas adotado. Esses atributos são utilizados para realçar descontinuidades laterais do campo magnético, particularmente sensíveis a contatos geológicos, falhas e limites entre corpos com diferentes propriedades magnéticas (COOPER & COWAN, 2008).

A derivada D_x realça variações do campo ao longo da direção x , enquanto a derivada D_y destaca mudanças ao longo da direção y . Dessa forma, cada derivada pode evidenciar feições estruturais preferencialmente orientadas perpendicularmente à direção de cálculo, que permite a identificação de anisotropias estruturais e tendências dominantes no arcabouço geológico (COOPER & COWAN, 2008).

Por apresentarem sensibilidade direcional, as derivadas horizontais são frequentemente analisadas de forma integrada, uma vez que feições geológicas reais tendem a ocorrerem em ambas as direções. Em comparação à derivada vertical, D_x e D_y mostram menor amplificação de ruídos de alta frequência, embora também sejam influenciadas pela profundidade das fontes magnéticas.

Essas derivadas constituem a base para o cálculo de filtros mais robustos, como o Gradiente Horizontal Total (THDR), no qual as contribuições de D_x e D_y são combinadas para fornecer uma medida escalar da variação lateral do campo magnético, independente da orientação das estruturas.

Derivada Vertical (D_z)

$$D_z = \frac{\partial T}{\partial z}$$

Derivada Horizontal em X

$$D_x = \frac{\partial T}{\partial x}$$

Derivada Horizontal em Y

$$D_y = \frac{\partial T}{\partial y}$$

7.5.5 Amplitude do Sinal Analítico

A Amplitude do Sinal Analítico (ASA), também denominada Amplitude do Gradiente Total (AGT), foi originalmente introduzida por Nabighian (1972, 1974) para corpos magnéticos bidimensionais e posteriormente estendida para a interpretação tridimensional por Roest, Verhoef e Pilkington (1992). Esse atributo corresponde à magnitude do vetor gradiente tridimensional do campo magnético. Esse atributo é calculado pela combinação quadrática das derivadas horizontal e vertical do campo magnético total, conforme a Equação 7.4:

$$AGT = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (7.4)$$

em que T representa o campo magnético total, enquanto $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$ e $\partial T/\partial z$ correspondem às derivadas do campo magnético nas direções leste-oeste, norte-sul e vertical, respectivamente. A ASA é utilizada para realçar gradientes associados às bordas de fontes magnetizadas, possibilitando a delimitação de corpos e estruturas geológicas, inclusive em regiões de baixa latitude magnética ou com influência de magnetização remanente (NABIGHIAN, 1974; LI, 2006). De modo geral, fontes mais rasas tendem a produzir máximos mais localizados, enquanto fontes mais profundas apresentam respostas mais amplas e suavizadas.

7.5.6 Gradiente Horizontal Total (THDR)

O Gradiente Horizontal Total (Total Horizontal Derivative – THDR) é um filtro amplamente utilizado na detecção de bordas de corpos anômalos em dados de campos potenciais (COOPER & COWAN, 2008). Esse atributo avalia a magnitude das variações laterais do campo magnético, particularmente sensível a mudanças abruptas de susceptibilidade magnética associadas a contatos geológicos e estruturas tectônicas.

Quando aplicado a dados magnetométricos, o THDR posiciona os máximos de resposta próximos às bordas dos corpos magnetizados, enquanto as regiões centrais tendem a apresentar valores mais baixos. A intensidade do gradiente diminui com o aumento da profundidade da fonte, o que torna esse método mais eficiente na identificação de estruturas rasas (FERREIRA *et al.*, 2013). O gradiente horizontal total é calculado a partir das derivadas horizontais do campo magnético anômalo, conforme a equação 7.5, descrita por Blakely (1996).

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (7.5)$$

onde:

- T é o campo magnético anômalo;
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ é a derivada na direção leste-oeste;
- $\frac{\partial T}{\partial y}$ é a derivada na direção norte-sul.

O THDR corresponde à magnitude do gradiente horizontal do campo magnético e apresenta máximos próximos às bordas de corpos magnetizados, sendo amplamente empregado na delimitação de contatos geológicos e estruturas tectônicas.

7.6 Processamento Gamaespectrometria

Após a etapa de aquisição, os dados gamaespectrométricos foram submetidos ao processamento e interpolação com o auxílio do software Oasis montaj, a partir de um conjunto de 575 pontos amostrais. Esse procedimento permitiu a geração de mapas contínuos de distribuição espacial das concentrações de potássio (K), urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh).

A radiação gama registrada em ambientes geológicos tem origem predominantemente rasa, associada aos horizontes superficiais do solo, especialmente em regiões tropicais. Na área de estudo, o perfil de solo é pouco desenvolvido, com espessura máxima em torno de 30 cm, além da presença frequente de fragmentos de rocha expostos ou parcialmente intemperizados, observados durante a aquisição dos dados gamaespectrométricos. Essas características favorecem a detecção direta da assinatura radiométrica das rochas subjacentes, com redução de efeitos de atenuação relacionados a solos espessos.

A interpolação dos dados foi realizada por meio do algoritmo de mínima curvatura com tensão, implementado no módulo RANGRID GX. Esse método busca ajustar uma superfície suavizada que minimize oscilações artificiais entre os valores amostrados, ao mesmo tempo em que preserva contrastes locais relevantes, que permite a diferenciação entre variações regionais e anomalias de menor escala.

O algoritmo inicia o processo a partir de uma grade preliminar (*coarse grid*), composta por células aproximadamente dezesseis vezes maiores que as da malha final desejada (parâmetro padrão Starting Coarse Grid). Os valores iniciais dos nós dessa grade são estimados

por meio da média ponderada pelo inverso da distância dos dados contidos em um raio de busca equivalente a quatro vezes o tamanho da célula da grade preliminar. Na ausência de dados nesse raio, é utilizada a média global do conjunto amostral. Em seguida, aplica-se um procedimento iterativo de refinamento, no qual a superfície é progressivamente ajustada aos valores observados mais próximos dos nós da grade (Geosoft, 2010). A cada iteração, o tamanho das células é reduzido pela metade até que seja atingida a resolução final especificada, resultando em uma superfície de curvatura mínima.

Como produtos do processamento, foram obtidos mapas temáticos em escala de cores que representam as concentrações quantitativas dos radioelementos, com o potássio expresso em porcentagem (%) e o urânio e o tório em partes por milhão (ppm). Adicionalmente, foram elaborados mapas de razões entre radioelementos e mapas ternários; contudo, essas representações não forneceram informações adicionais relevantes em relação àquelas já evidenciadas pelos mapas individuais de K, eU e eTh.

A interpretação dos dados gamaespectrométricos foi baseada no pressuposto de que concentrações anômalas de um ou mais radioelementos podem refletir processos geológicos associados à alteração hidrotermal ou à presença de mineralizações (DENTITH & MUDGE, 2014). Dessa forma, a análise esteve concentrada na identificação e caracterização dessas anomalias, para avaliar o significado geológico e potencial como indicadores de áreas favoráveis à mineralização.

7.6.1 Razão Th/K

A razão eTh/K foi utilizada como indicador de alteração hidrotermal devido à mobilidade contrastante entre tório e potássio durante as interações fluido-rocha (Galbraith & Saunders, 1983). Enquanto o tório tende a permanecer relativamente imóvel, o potássio pode ser enriquecido por metassomatismo potássico, resultando na diminuição dos valores de eTh/K. Dessa forma, baixos valores dessa razão são interpretados como indicativos de alteração potássica ou sericítica, ao passo que valores elevados refletem áreas relativamente enriquecidas em tório ou pouco afetadas por enriquecimento potássico (Shives et al., 2000; Ferreira et al., 2009). Como referência, rochas pouco alteradas apresentam razões K/eTh entre 0,17 e 0,20 %/ppm, equivalentes a valores de eTh/K entre 5,0 e 5,9 ppm/% (Hoover & Pierce, 1990). Assim, áreas com eTh/K inferiores a esse intervalo foram consideradas potenciais zonas de enriquecimento potássico e, consequentemente, alvos de alteração hidrotermal (Portnov, 1987).

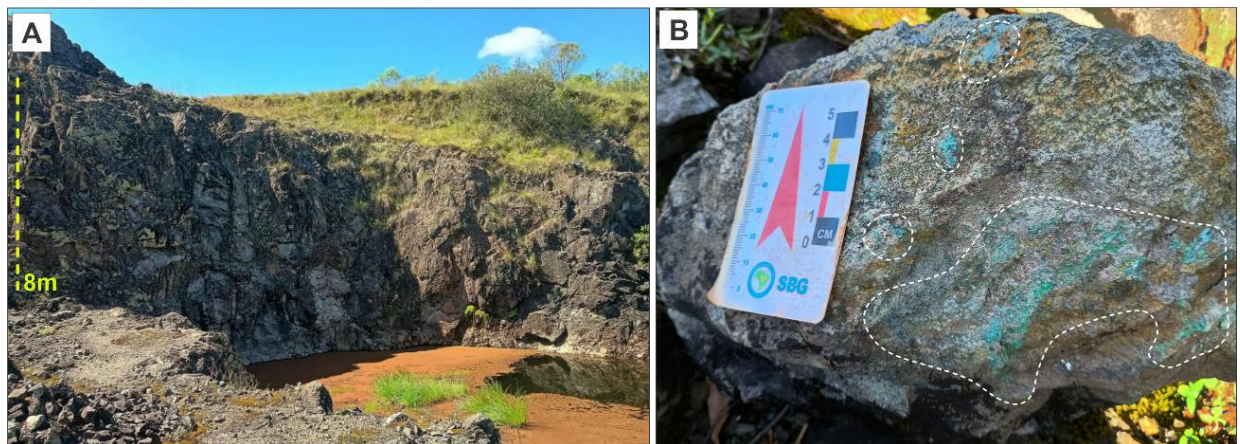
8 RESULTADOS

8.1 Geologia Local

A área de estudo é composta por rochas vulcânicas da Formação Hilário, predominantemente lapilli-tufo e andesito (Figura 13A). Os tufos lapílicos apresentam coloração cinzenta, textura fina maciça, intenso fraturamento e alteração hidrotermal pronunciada. Os andesitos, por sua vez, exibem relevo mais arrasado em comparação aos equivalentes piroclásticos, associado a vegetação mais escassa e esparsa. O lapilli-tufo manifesta vegetação mais densa e geomorfologia caracterizada por áreas de maior elevação, como morrotes e relevos suaves a moderados.

A mineralização ocorre sob controle estrutural marcado, alinhada às orientações NW-SE e NE-SW, predominantemente como óxidos de cobre disseminados (malaquita e azurita) (Figura 13B). A presença de manchas de malaquita nas superfícies rochosas constitui indicador de campo essencial para a identificação de estruturas hidrotermalmente ativas, que evidenciam significativo enriquecimento supergênico sobre a mineralização primária. Essa diferenciação litológica e geomorfológica reflete o contraste na resistência à erosão diferencial entre as unidades, que influenciam diretamente a expressão topográfica e a vegetação na área.

Figura 13 A) Vista panorâmica da Mina Alcides; B) Malaquita em lapilli-tufo.



Fonte: autoria própria (2025).

8.2 Magnetometria

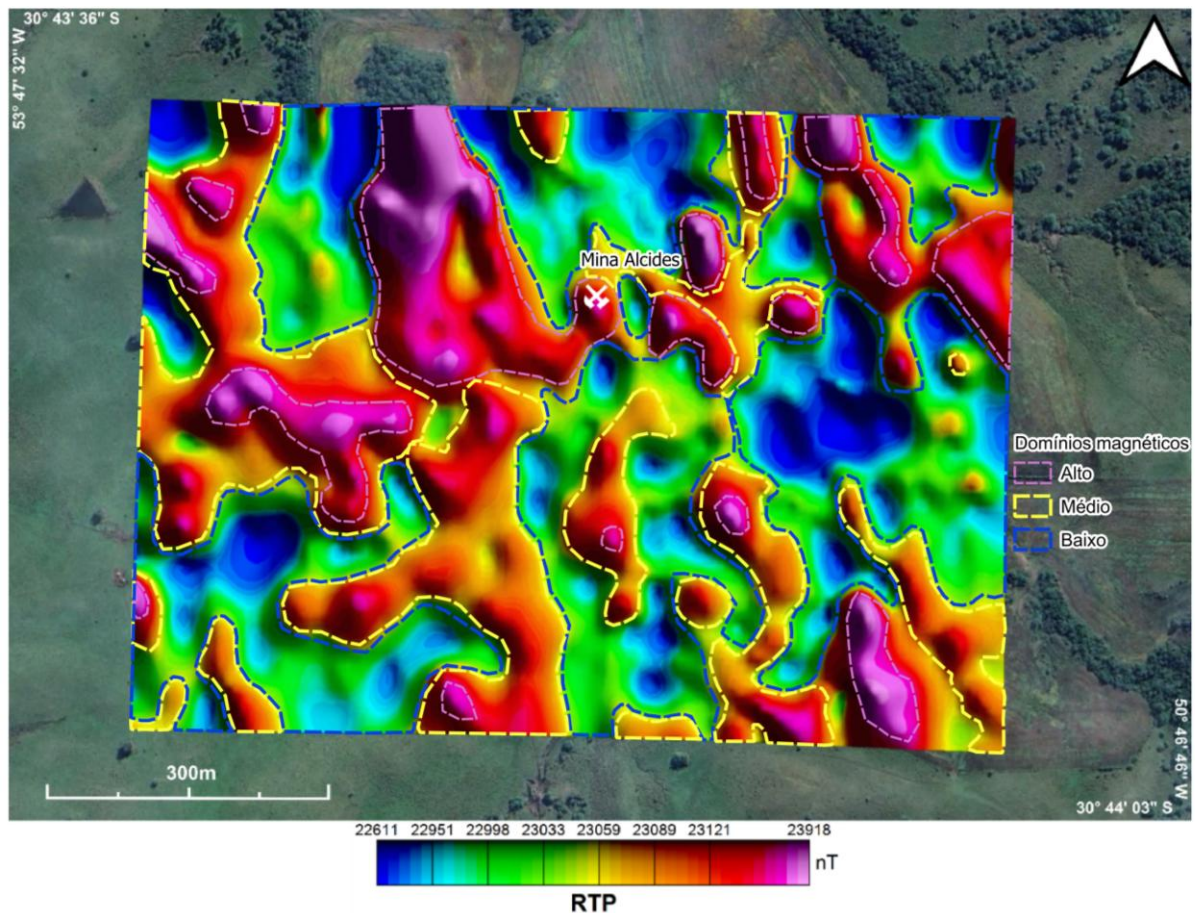
Mapas de filtragens foram desenvolvidos a partir do mapa de campo magnético total (CMT), com o intuito de realçar as características magnetométricas da região. Mapas das derivadas Dz (Derivada vertical em Z), Dx (Derivada horizontal em X) e Dy (Derivada horizontal em Y), posteriormente Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Gradiente Horizontal Total (THDR), foram elaborados para um estudo de domínios magnetométricos e dos lineamentos magnéticos rasos e profundos.

O campo magnético total reduzido ao polo (Figura 14) apresenta valores variando entre 22.611 e 23.918 nT, evidenciando uma distribuição heterogênea das respostas magnéticas na área de estudo. Observam-se domínios de baixa intensidade magnética, com valores entre 22.611 e 23.059 nT, distribuídos predominantemente nas porções leste, norte, sul e sudeste da área da Mina Alcides. Em contraste, os maiores valores magnéticos, compreendidos entre 23.212 e 23.918 nT, concentram-se principalmente na porção central da área e em setores adjacentes à mina.

Os contrastes entre altos e baixos magnéticos definem zonas de gradiente acentuado, refletindo variações nas propriedades magnéticas das rochas aflorantes. Adicionalmente, observa-se uma organização espacial das anomalias com tendência preferencial NE-SW e, subordinadamente, NW-SE, compatível com as principais direções estruturais reconhecidas regionalmente.

As maiores amplitudes magnéticas ocorrem em áreas ocupadas por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Hilário, especialmente lapilli-tufos e brechas vulcânicas, enquanto respostas magnéticas mais baixas são observadas em áreas dominadas por fluxos andesíticos.

Figura 14 Mapa do Campo Magnético Total Reduzido ao Polo (RTP)



Fonte: autoria própria (2025).

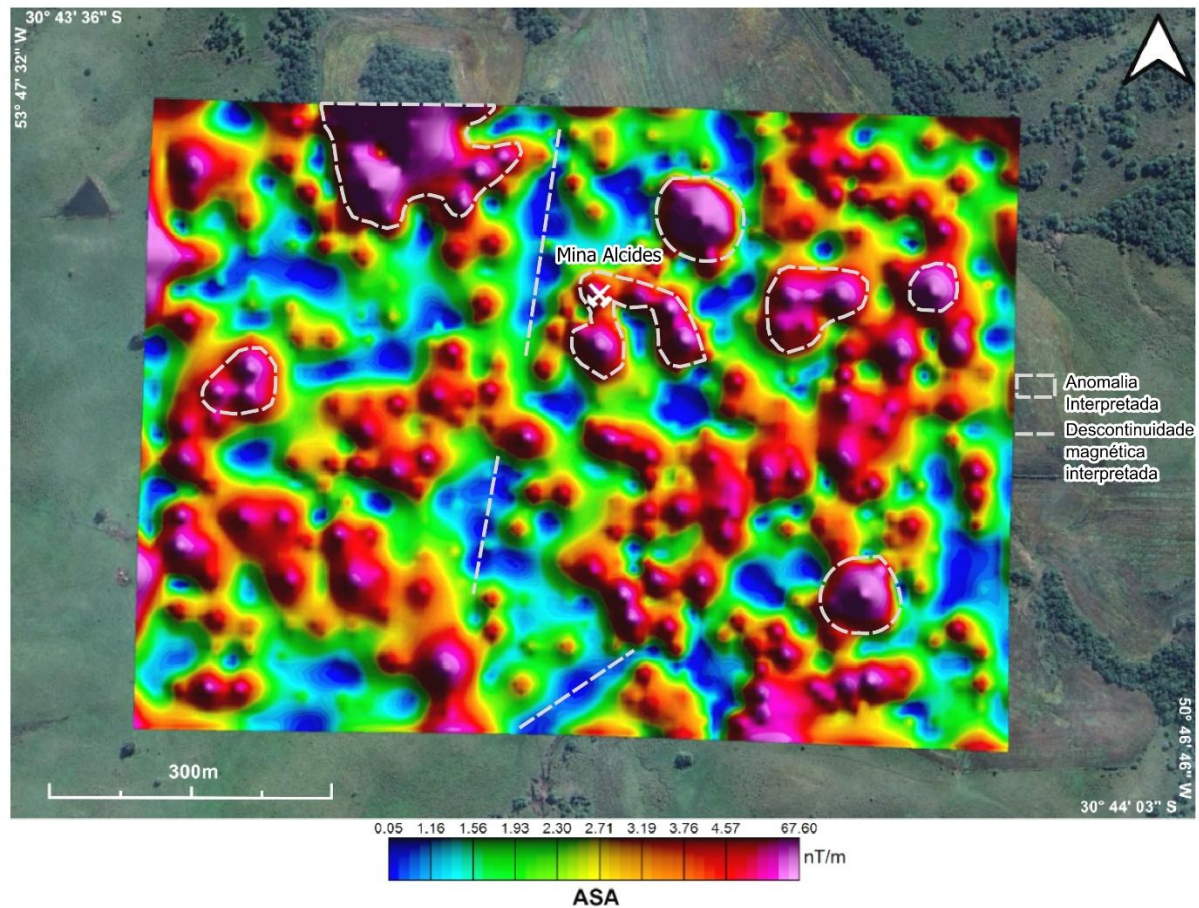
O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) apresenta valores entre 0,05 e 67,60 nT/m (Figura 15), permitindo a distinção de três domínios magnéticos principais. O primeiro domínio, caracterizado por baixas amplitudes entre 0,05 e 1,16 nT/m, apresenta geometria linear e resalta feições orientadas preferencialmente segundo as direções NW-SE e NE-SW. Essas feições são interpretadas como possíveis falhas e fraturas, compatíveis com o arcabouço estrutural regional e com os principais controles descritos para as mineralizações das Minas do Seival.

O segundo domínio, com valores moderados entre 3,19 e 4,57 nT/m, pode estar associado às rochas vulcânicas hospedeiras da Formação Hilário, como andesitos e lapilli-tufos, possivelmente menos afetados por alteração hidrotermal intensa.

Já o terceiro domínio, caracterizado por anomalias de alta amplitude, com valores máximos de até 67,60 nT/m, ocorre no setor noroeste da área de estudo. Essa resposta é compatível com a presença de corpos subvulcânicos ou domínios vulcânicos mais magnéticos e relativamente preservados, possivelmente relacionados a termos monzoníticos ou

traquiandesíticos da Formação Hilário. Contudo, essa interpretação deve ser tratada como hipótese, uma vez que a confirmação da natureza desses corpos requer validação por mapeamento geológico de detalhe, medidas petrofísicas e, preferencialmente, dados diretos de subsuperfície.

Figura 15 Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA)



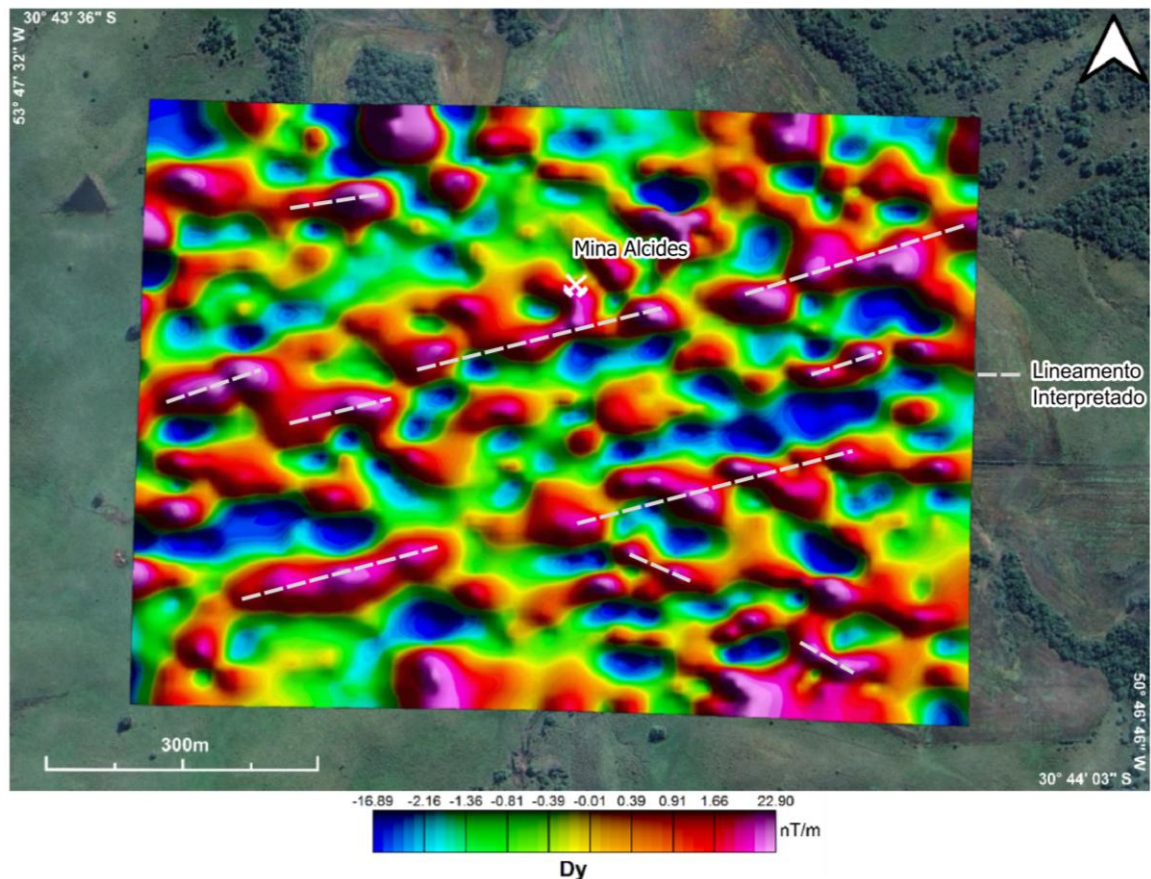
Fonte: autoria própria (2025).

O mapa da derivada horizontal D_y apresenta valores entre -16,89 e 22,90 nT/m (Figura 16). A análise do mapa permite a individualização de dois domínios magnéticos principais: um caracterizado por respostas baixas a negativas (-30,03 a -0,03 nT/m) e outro por respostas positivas mais elevadas (1,16 a 66,09 nT/m). São observadas feições lineares bem definidas, predominantemente orientadas na direção NE-SW, destacadas tanto em zonas de alta quanto de baixa amplitude magnética. Essas feições apresentam continuidade lateral variável e, em alguns casos, configuração segmentada, indicativo de estruturas lineares subsuperficiais.

Adicionalmente, zonas de maior amplitude magnética tendem a coincidir com áreas de relevo mais elevado, indicativo possível influência de efeitos topográficos no realce dos gradientes magnéticos. As estruturas lineares identificadas no mapa D_y mostram

correspondência com os principais *trends* estruturais descritos na área das Minas do Seival, especialmente nas direções NE-SW e subordinadamente N-S, interpretadas como zonas de falhas e fraturamento.

Figura 16 Mapa da Derivada Horizontal em Y (Dy)



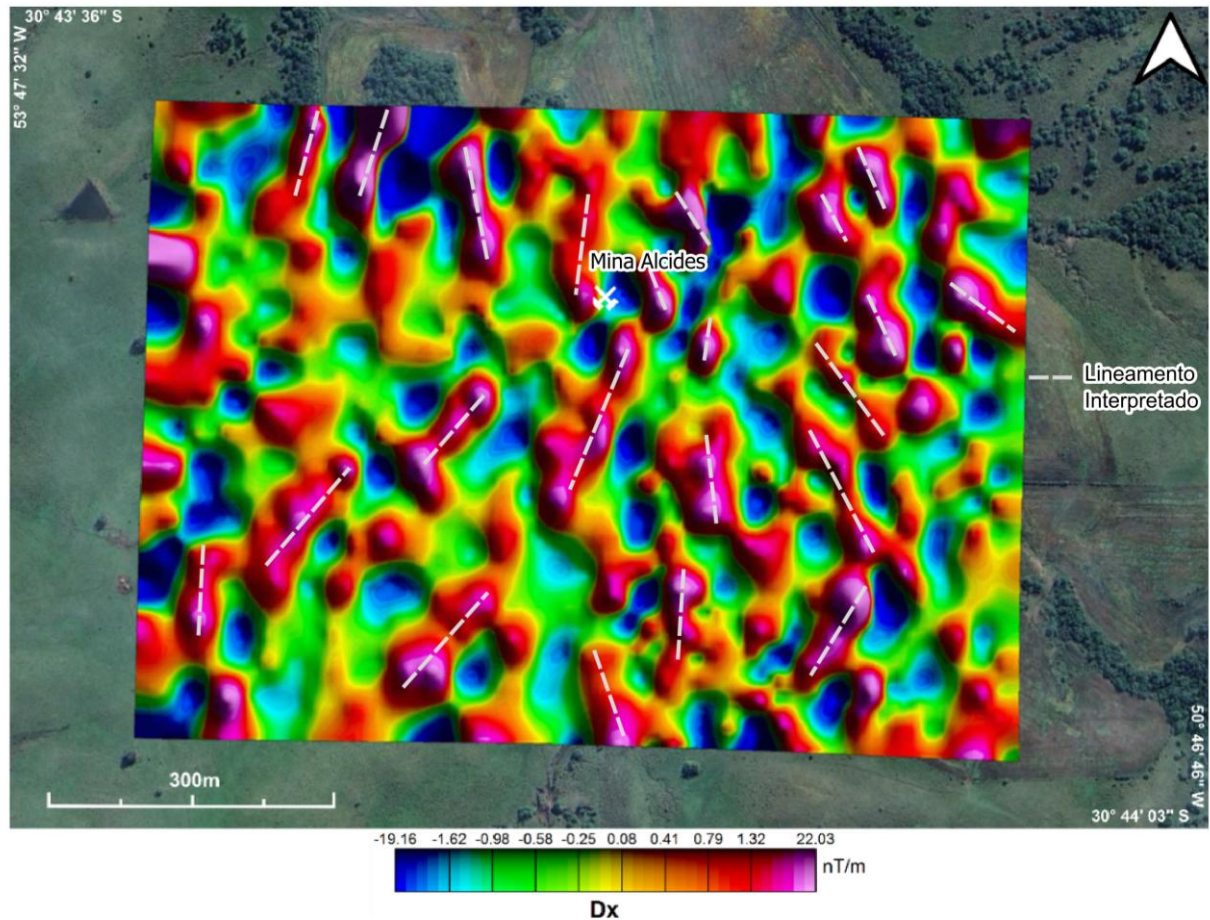
Fonte: autoria própria (2025).

O mapa de derivada horizontal Dx (Figura 17) apresenta valores variando entre -19,16 e 22,03 nT/m. É possível distinguir dois domínios magnéticos principais: um com respostas baixas a negativas (-19,16 a -0,25 nT/m) e outro com respostas positivas (0,05 a 22,90 nT/m).

Feições lineares com direções predominantes N-S e, secundariamente, NW-SE são claramente identificáveis tanto em domínios de baixa quanto de alta amplitude. Essas lineações coincidem com o principal sistema de falhas e fraturas regionais da área, que atuaram como condutos para os processos de mineralização sulfetada nas rochas vulcanogênicas da Formação Hilário.

A derivada horizontal Dx mostrou-se útil para realçar contatos subverticais e estruturas com forte componente vertical, complementando as informações obtidas nos demais mapas de derivadas.

Figura 17 Mapa da Derivada Horizontal em X (Dx)



Fonte: autoria própria (2025).

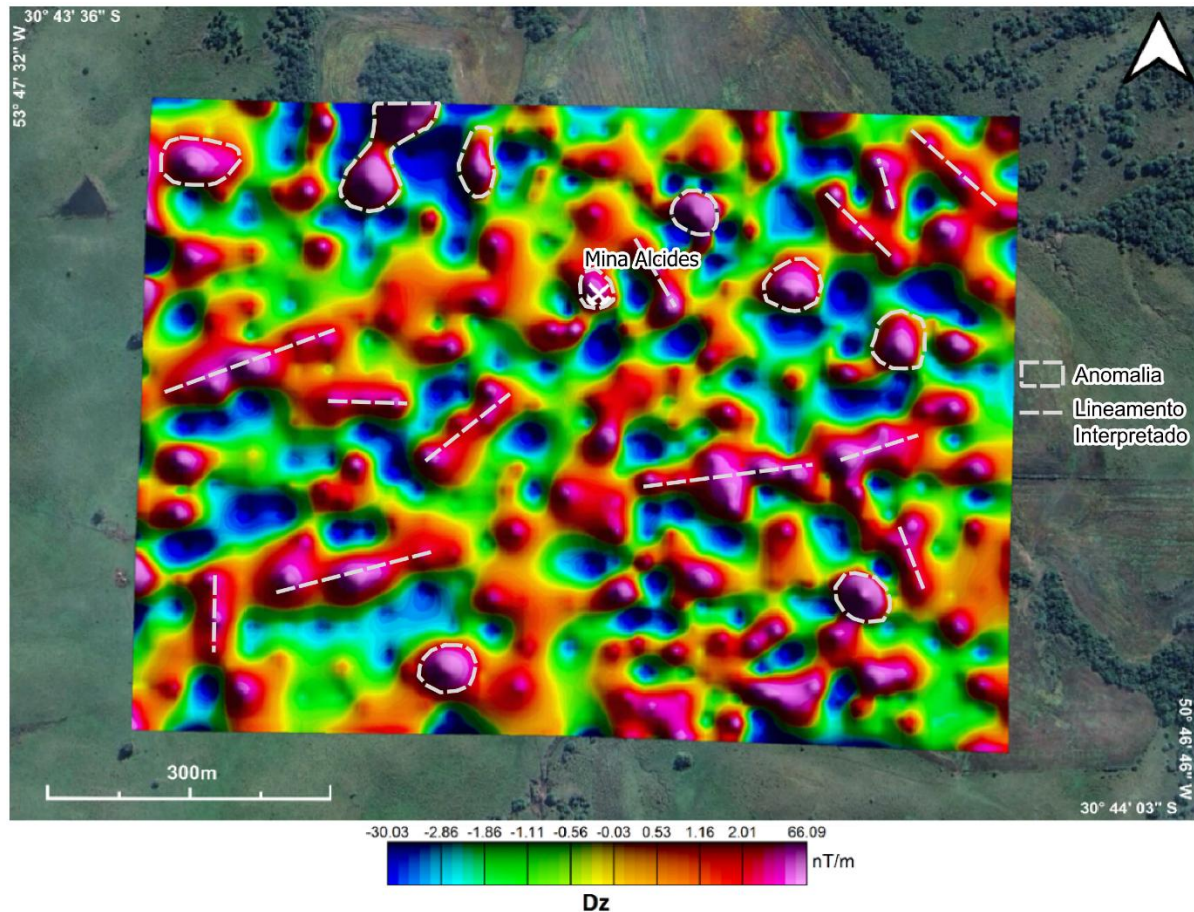
O mapa de derivada vertical Dz apresenta valores entre -30,03 e 66,09 nT/m, com distinção de dois domínios magnéticos principais: respostas negativas a baixas (-30,03 a -0,03 nT/m) e respostas positivas mais elevadas (1,16 a 66,09 nT/m) (Figura 18).

A derivada vertical Dz é particularmente eficaz para realçar contatos laterais, bordas de corpos magnéticos e variações abruptas na suscetibilidade magnética. As feições lineares nas direções NW-SE e NE-SW são claramente visíveis tanto em domínios de baixa quanto de alta amplitude.

Essas feições correspondem ao arcabouço estrutural regional, as quais controlam a circulação de fluidos hidrotermais e a mineralização de cobre nas rochas vulcanoclásticas da Formação Hilário. As anomalias positivas mais intensas no mapa Dz estão associadas a zonas de maior suscetibilidade magnética, provavelmente relacionadas a corpos vulcânicos menos alterados ou a níveis com maior conteúdo de minerais ferromagnesianos preservados na Formação Hilário. Essas respostas positivas contrastam com as áreas mais intensamente

alteradas hidrotermalmente, onde a destruição de minerais magnéticos resulta em respostas mais baixas.

Figura 18 Mapa da Derivada vertical (Dz)



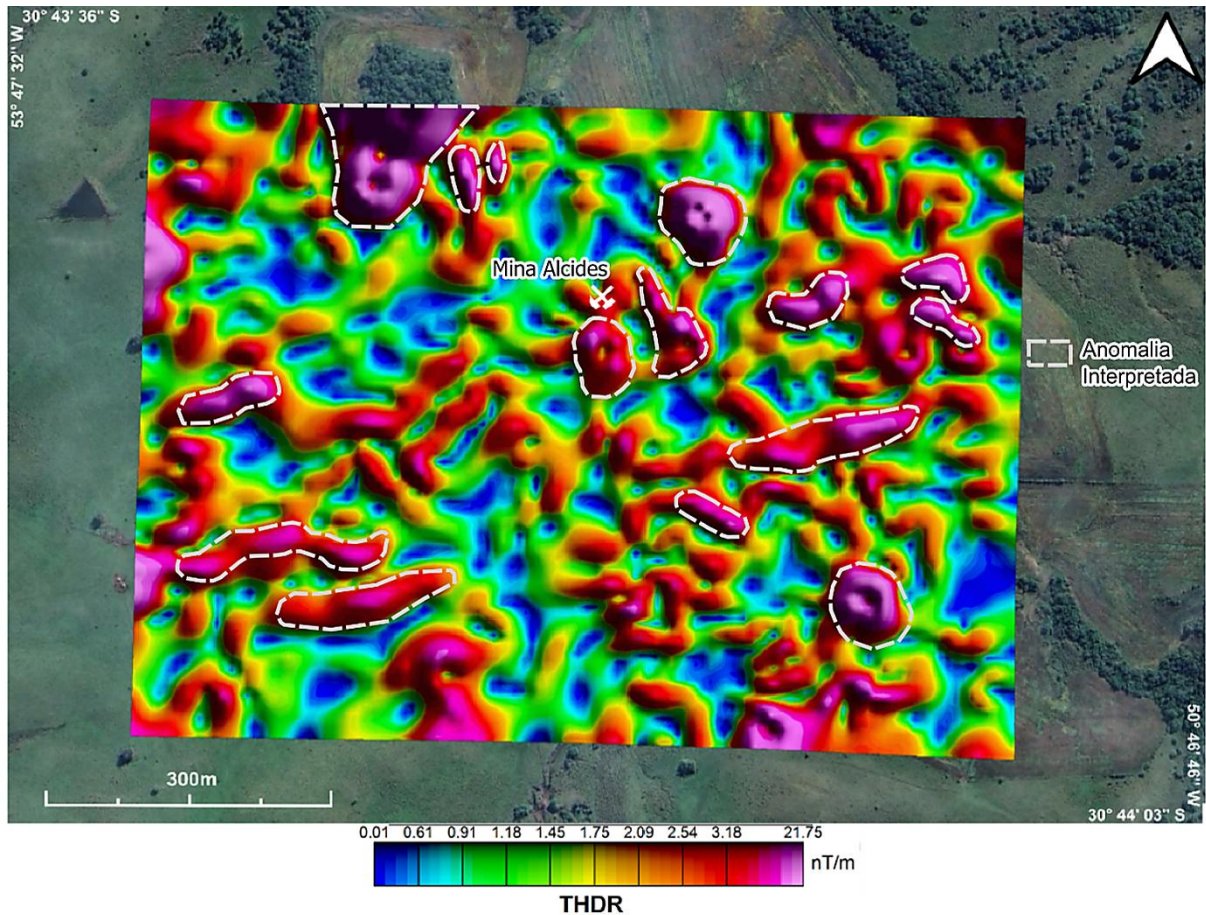
Fonte: autoria própria (2025).

O mapa do Gradiente Horizontal Total (THDR) apresenta valores entre 0,01 e 21,75 nT/m e permite reconhecer dois domínios principais (Figura 19). O primeiro domínio, com valores baixos entre 0,01 e 1,18 nT/m, exibe geometria linear e contínua, destacando feições com direções NW-SE e NE-SW. Essas feições são compatíveis com zonas de falhas e fraturas regionais, que cortam a área da Mina Alcides e possivelmente atuaram como condutos para a circulação de fluidos hidrotermais durante a evolução do sistema mineralizado.

O segundo domínio, com valores entre 3,18 e 21,75 nT/m, ocorre principalmente nas proximidades da mina e em áreas associadas a relevos positivos. Essa resposta pode refletir contrastes de suscetibilidade magnética relacionados a rochas vulcânicas mais preservadas, contatos litológicos ou possíveis corpos subvulcânicos. A associação com diques de composição monzonítica ou traquiandesítica é plausível no contexto geológico da Formação Hilário, mas deve ser considerada uma hipótese interpretativa, pois a assinatura magnética

isolada não permite definir, de forma inequívoca, a litologia ou a geometria dos corpos responsáveis pela anomalia.

Figura 19 Mapa do Gradiente Horizontal Total (THDR)



Fonte: autoria própria (2025).

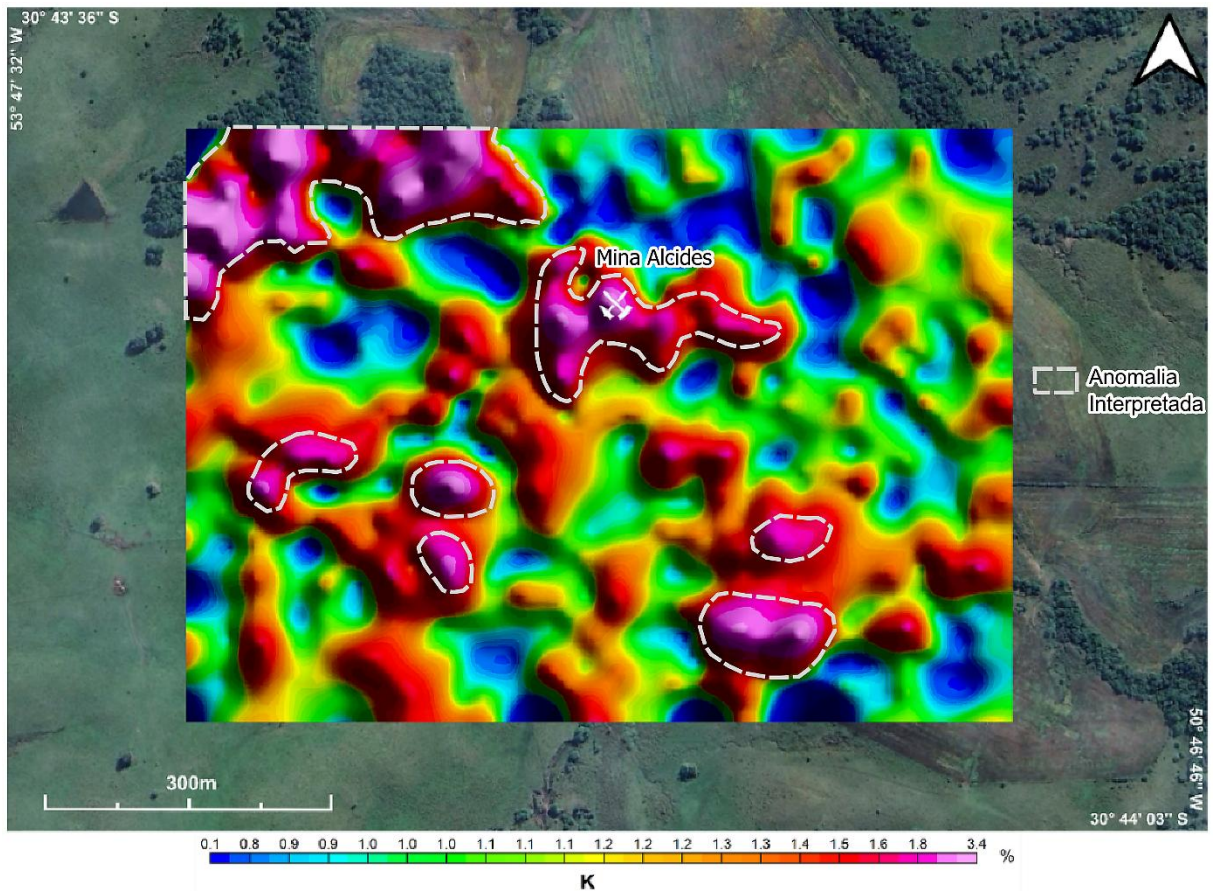
8.3 Gamaespectrometria

A partir dos dados gamaespectrométricos, foram elaborados mapas correspondentes aos canais dos elementos potássio (K), tório equivalente (eTh) e urânio equivalente (eU) (Figuras 20, 21 e 22, respectivamente), bem como mapas de razão, como eTh/K (SHIVES *et al.*, 2000).

As concentrações de potássio (K) variam entre 0,1 e 3,4 %, com zonas anômalas acima de 2,0 % concentradas predominantemente na porção central da área (Figura 20). Essas anomalias apresentam orientação preferencial E-W e NE-SW, coincidente com os principais lineamentos estruturais reconhecidos regionalmente.

Os maiores valores de K ocorrem associados às áreas de afloramento das rochas vulcânicas da Formação Hilário, especialmente nas proximidades das ocorrências mineralizadas das Minas do Seival.

Figura 20 Mapa de concentração de potássio (K)



Fonte: autoria própria (2025).

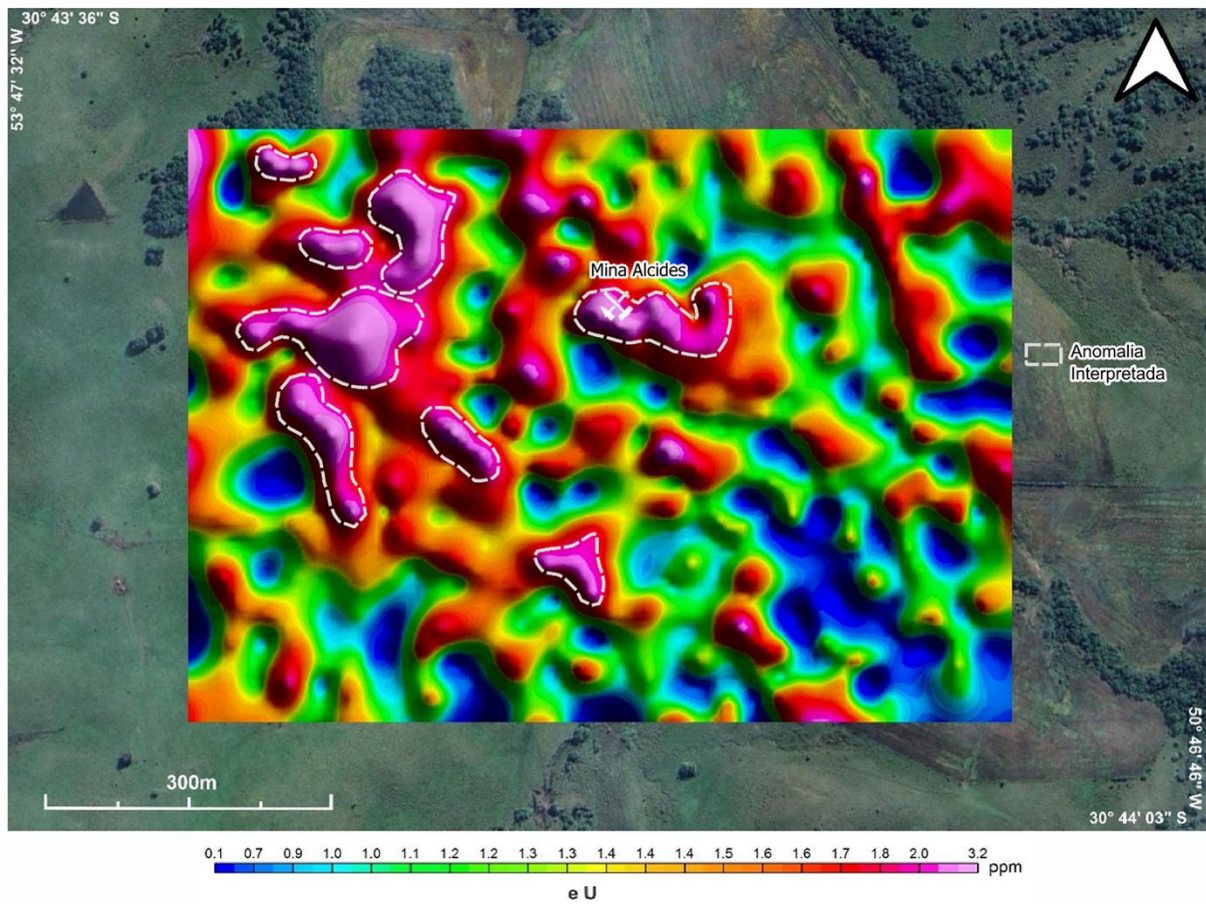
Os valores de concentração de equivalente urânio (eU) variam entre 0,1 e 3,2 ppm na área de estudo, apresentando variações espaciais significativas (Figura 21). As principais anomalias concentram-se predominantemente nas porções oeste e noroeste da área, caracterizadas por distribuição difusa com alguns núcleos localizados de maior intensidade.

As anomalias de eU ocorrem preferencialmente associadas às rochas vulcanoclásticas da Formação Hilário, unidade hospedeira das mineralizações cupríferas das Minas do Seival. Observa-se também correspondência espacial entre parte dessas anomalias e zonas estruturais reconhecidas regionalmente.

Na porção sul da área ocorrem anomalias pontuais de geometria ameboide, caracterizadas por concentrações discretas e distribuição isolada, sem continuidade espacial evidente.

Destaca-se a anomalia de eU localizada no entorno da antiga Mina Alcides, na região central da área, que apresenta geometria irregular, concentrada e pouco difusa. A anomalia ocorre em área caracterizada por intenso fraturamento e alteração hidrotermal previamente descritos na literatura.

Figura 21 Mapa de concentração de equivalente urânio (U)



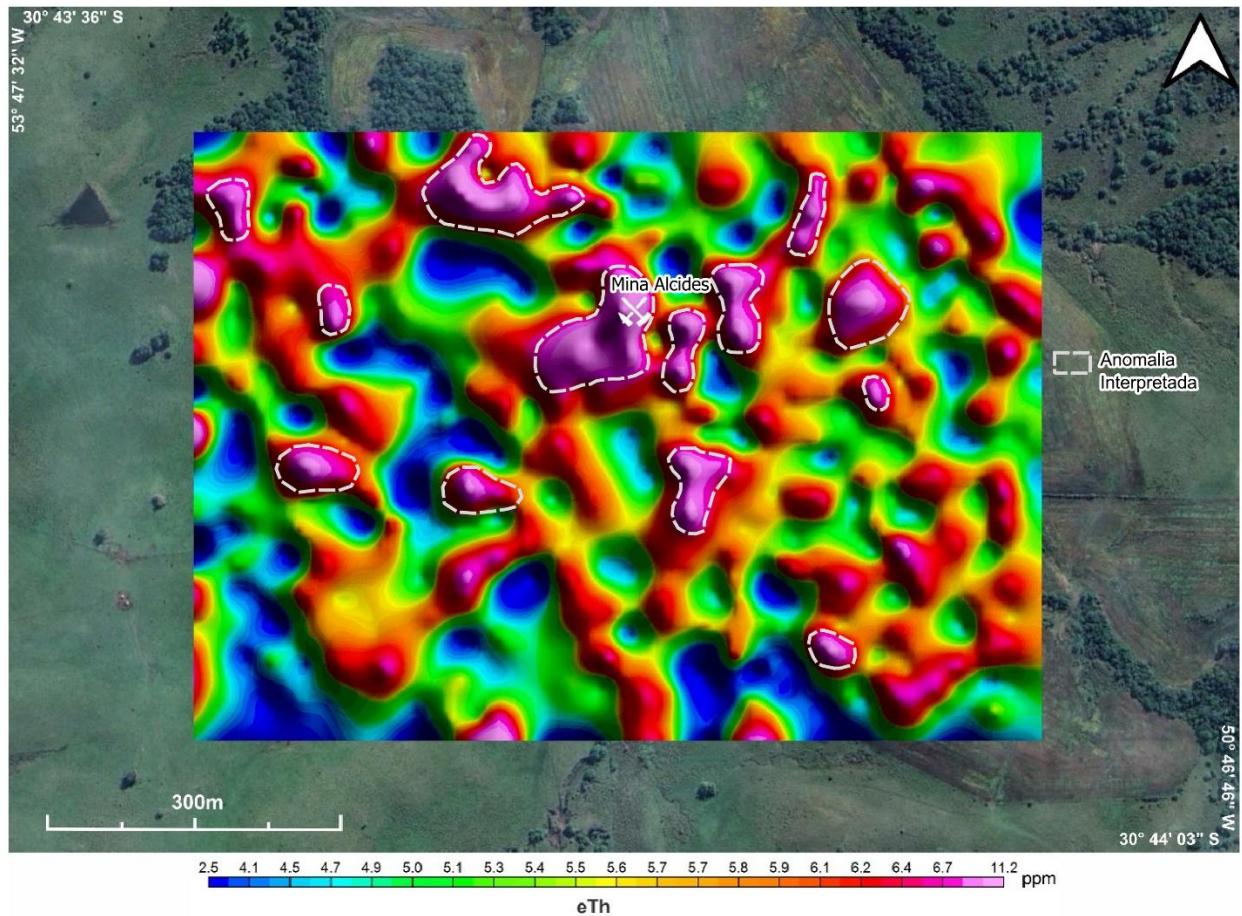
Fonte: autoria própria (2025).

As concentrações de equivalente tório (eTh) variam entre 2,5 e 11,2 ppm na área de estudo (Figura 22). As anomalias mais expressivas, com valores entre 6,4 e 11,2 ppm, concentram-se predominantemente na região central, nas proximidades da Mina Alcides, e no setor noroeste da área. Anomalias de menor intensidade ocorrem de forma isolada nos setores oeste, sul e leste.

Os maiores valores de eTh apresentam correspondência espacial com áreas de ocorrência das rochas vulcanoclásticas da Formação Hilário, especialmente lapilli-tufos, brechas vulcânicas e andesitos associados às mineralizações cupríferas das Minas do Seival.

Observa-se ainda que as anomalias de maior concentração apresentam orientação preferencial NW-SE e NE-SW, coincidente com os principais lineamentos estruturais reconhecidos regionalmente.

Figura 22 Mapa de concentração de equivalente tório (Th)



Fonte: autoria própria (2025).

As anomalias da razão eTh/K apresentam valores variando aproximadamente entre 1,3 e 16,8 na área de estudo (Figura 23). Valores reduzidos da razão, particularmente inferiores a 3, concentram-se nas proximidades da Mina Alcides, definindo feições lineares com orientação preferencial WNW–ESE.

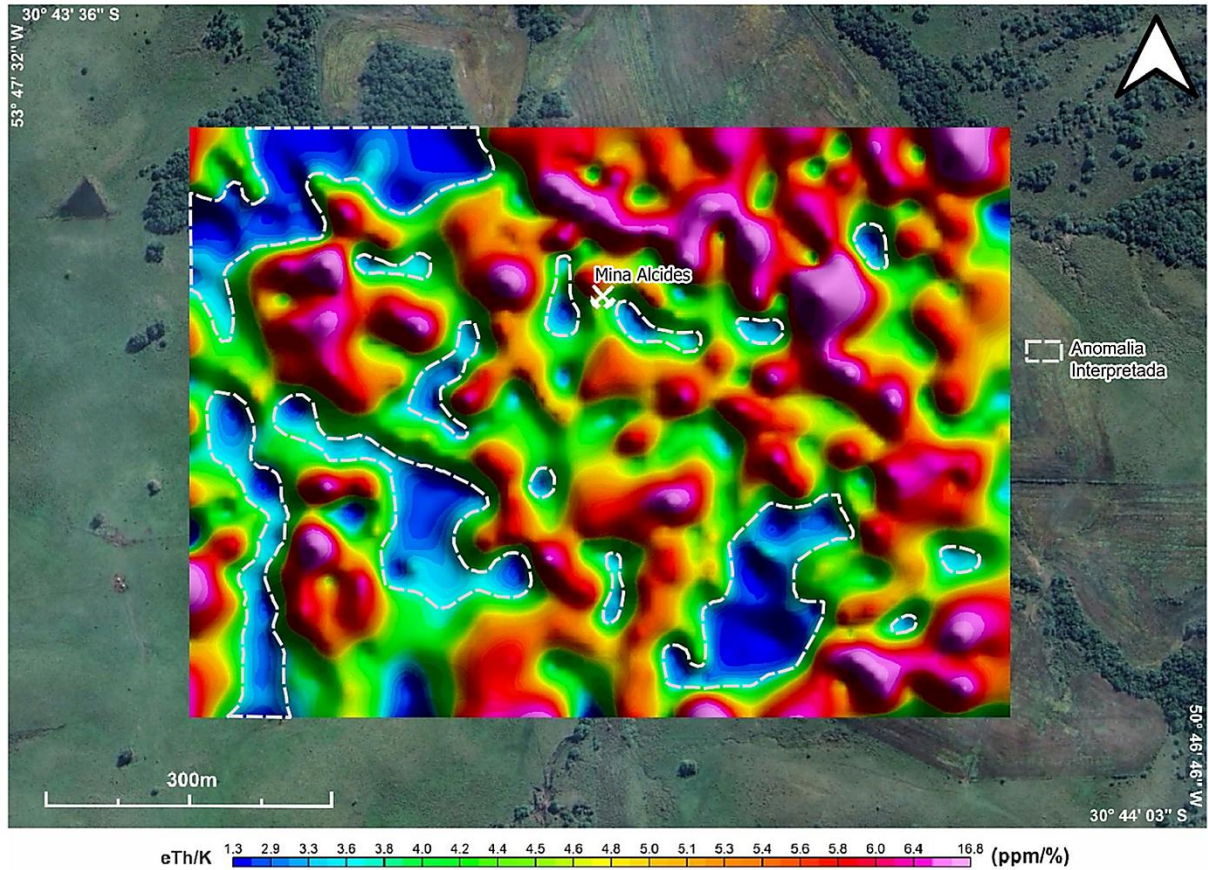
Em contraste, áreas adjacentes caracterizadas por valores intermediários (> 4) a elevados (> 6) distribuem-se predominantemente sobre setores compostos por rochas vulcânicas da Formação Hilário pouco afetadas por fraturamento e alteração hidrotermal descritos regionalmente.

Além do setor da Mina Alcides, destaca-se uma anomalia localizada na porção noroeste da área, caracterizada por valores de eTh/K inferiores a 3 e concentrações de potássio próximas de 3 %, semelhantes às observadas na área mineralizada principal.

No setor sudoeste da área de estudo ocorrem feições lineares e agrupadas com valores de eTh/K iguais ou inferiores a 3,6 e teores de potássio variando entre 1,2 % e 1,6 %. Essas

feições apresentam distribuição espacial descontínua e menor expressão em comparação aos setores central e noroeste.

Figura 23 Mapa de razão eTh/K



Fonte: autoria própria (2025).

8.4 Discussão integrada dos dados

Para a discussão integrada, foram selecionados os produtos geofísicos que apresentaram maior capacidade de realce das feições estruturais, litológicas e hidrotermais interpretadas. Na magnetometria, foram considerados principalmente os mapas de Derivada Vertical (Dz), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Gradiente Horizontal Total (THDR) e Campo Magnético Total Reduzido ao Polo (RTP) (Figura 24). Na gamaespectrometria, foram analisados os mapas de K, eU, eTh e da razão eTh/K (Figura 25). A integração desses produtos buscou reduzir a ambiguidade inerente aos métodos geofísicos indiretos, diferenciando, quando possível, respostas associadas a estruturas rúpteis, variações litológicas, possíveis corpos subvulcânicos e zonas de alteração hidrotermal.

Os mapas magnéticos da área de estudo revelam uma proeminente anomalia linear com tendência NW, acompanhada por uma feição secundária orientada NE, ambas consistentes em

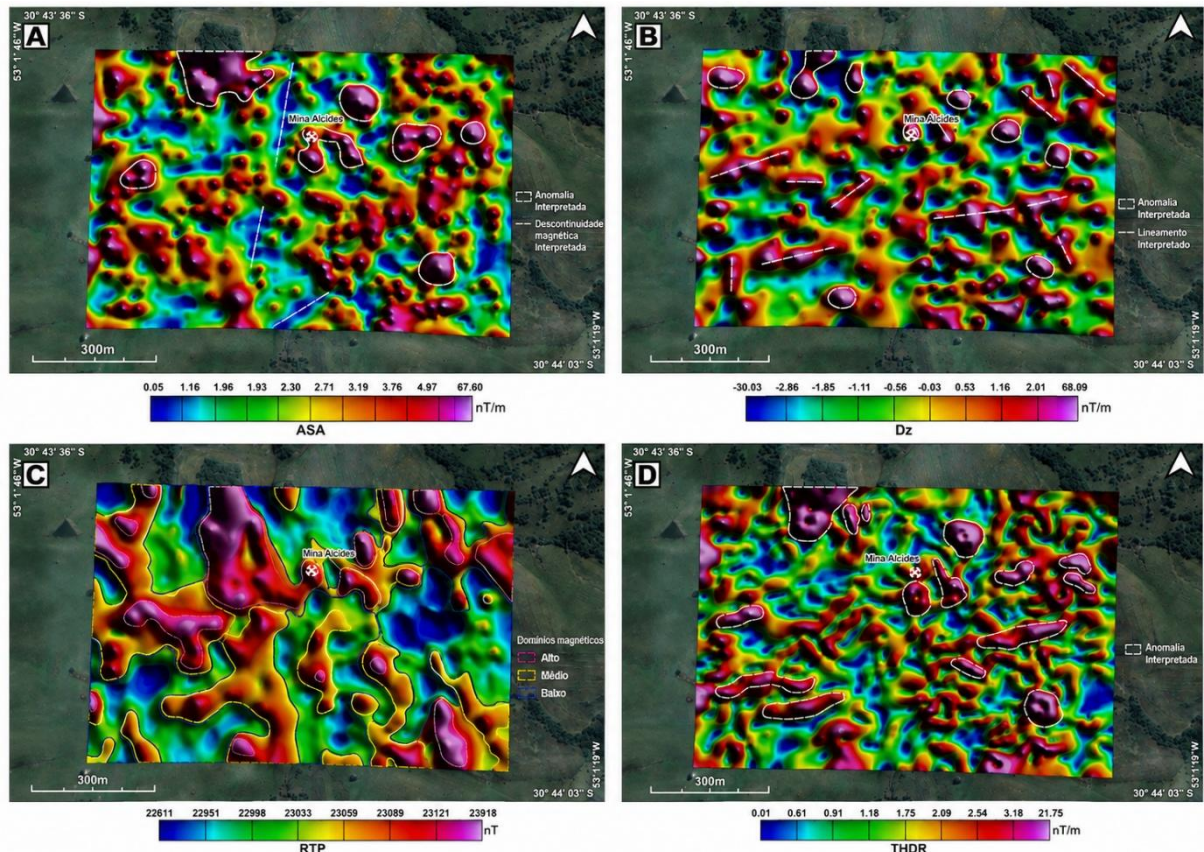
amplitude e geometria com sistemas de falhas e fraturas. Nos mapas de ASA e THDR (derivada), as amplitudes magnéticas mais baixas (0,05–1,16 nT/m) definem anomalias lineares que marcam impressões de alteração hidrotermal alinhadas com essas estruturas.

Essas feições são interpretadas como zonas de falhas ou fraturas, algumas das quais eventualmente utilizadas para ascensão de fluidos mineralizantes, conforme relatado por diversos autores em contextos semelhantes (IRVINE e SMITH, 1990; ALLIS, 1990; HEDENQUIST AND ARRIBAS, 2017). O efeito não magnético da alteração argílica intermediária, comum em sistemas epitermais, realça a visibilidade dos controles estruturais sobre a mineralização. Embora o padrão NW-SE seja secundário no contexto geológico regional, ele exerce grande influência na área de estudo. Nesse sentido, Groves *et al.* (1998) destacaram que estruturas secundárias são de grande importância, pois frequentemente hospedam depósitos minerais. Assim, a resposta magnética na área estudada não deve ser interpretada apenas com base na amplitude absoluta, mas sim em termos de sua correlação espacial com padrões estruturais.

As anomalias de alta amplitude (~67 nT/m) ocorrem no setor noroeste da área de estudo, associadas espacialmente a colinas de baixo relevo com morfologia cônica. Essas anomalias estão relacionadas a diques subvulcânicos de monzonito ou traquiandesito da Formação Hilário (Figura 24), provavelmente atuantes como fontes de calor e fluidos hidrotermais para o sistema, conforme suportado por Lopes *et al.* (2018). Áreas circundantes de magnetização moderada (3,19–4,57 nT/m) correspondem a rochas vulcânicas hospedeiras menos alteradas ou relativamente inalteradas (por exemplo, andesito e lapilli-tufo). Observações semelhantes foram discutidas por Irvine e Smith (1990) e Clark (2014), que enfatizaram que sistemas hidrotermais podem produzir tanto baixos magnéticos, decorrentes da variação litológica e da destruição de magnetita, quanto altos magnéticos, quando a magnetita é preservada ou formada secundariamente.

Esse comportamento dual é particularmente relevante em ambientes epitermais, onde temperaturas relativamente baixas (< 350 °C) resultam em respostas magnéticas heterogêneas. Portanto, a assinatura magnética da área estudada, composta por baixos lineares associados a zonas de alteração e altos cônicos localizados ligados a intrusões subvulcânicas, podem ser relacionadas a processos hidrotermais.

Figura 24 A) Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) com interpretações da área. B) Mapa da primeira derivada vertical (Dz) interpretado. C) Mapa de Redução ao Polo (RTP) interpretado. D) Mapa do Gradiente Horizontal Total (THDR). As linhas tracejadas em branco ressaltam descontinuidades magnéticas interpretadas, enquanto os polígonos circulares indicam anomalias magnéticas localizadas compatíveis com possíveis corpos vulcânicos ou subvulcânicos verticais a subverticais.



Fonte: autoria própria (2025).

Os radioelementos na área apresentam concentrações ligeiramente inferiores às reportadas por De Toni *et al.* (2021) em uma região adjacente, os quais estabeleceram valores médios de K 4,4 %, eU 4,4 ppm e eTh 19,2 ppm para andesitos shoshoníticos. Esta variação pode ser atribuída à presença de rochas alteradas por ação intempérica. As concentrações dos elementos tendem a refletir forte influência das rochas hospedeiras, diante da incipiente cobertura de solo na região.

Os valores de urânio variam de 0,1 a 3,2 ppm, com anomalias mais elevadas ($> 1,7$ ppm) concentradas em aglomerados localizados, particularmente próximos à Mina Alcides desativada (Figura 25). A morfologia ameboide desses aglomerados, associada à ausência de linearidade estrutural bem definida, pode indicar zonas de alteração hidrotermal mais difusas ou pervasivas. Entretanto, essa interpretação deve ser feita com cautela, pois o urânio apresenta

maior mobilidade em ambientes oxidantes e intempéricos, podendo ser redistribuído por processos supergênicos, pedogenéticos ou hidrológicos (DICKSON; SCOTT, 1997; WILFORD et al., 1997; ULBRICH et al., 2009). Assim, as anomalias de eU são interpretadas como indicadores potenciais de modificação geoquímica superficial, possivelmente relacionada à alteração hidrotermal, mas não constituem evidência conclusiva de halos hidrotermais quando analisadas isoladamente.

Os mapas radiométricos revelaram que as rochas hospedeiras das mineralizações de cobre na região da Mina Alcides exibem valores radiométricos mais elevados de K (1,6 – 3,4 %), eTh (6,7 – 11,2 ppm) e eU (1,8 – 3,2 ppm) em comparação ao *background* regional.

A distribuição das anomalias da razão eTh/K, que variam de 1,3 a 16,8, fornece evidências dos controles estruturais sobre a mineralização de Cu–Ag na porção sul de Seival. Nas proximidades da Mina Alcides, as anomalias lineares com tendência WNW–ESE atingem valores localmente $\leq 3,0$ representam a resposta mínima na escala (Figura 25D). Setores adjacentes caracterizados por valores médios (> 4) a altos (> 6) refletem rochas vulcânicas hospedeiras pouco alteradas ou com baixo potencial para mineralizações.

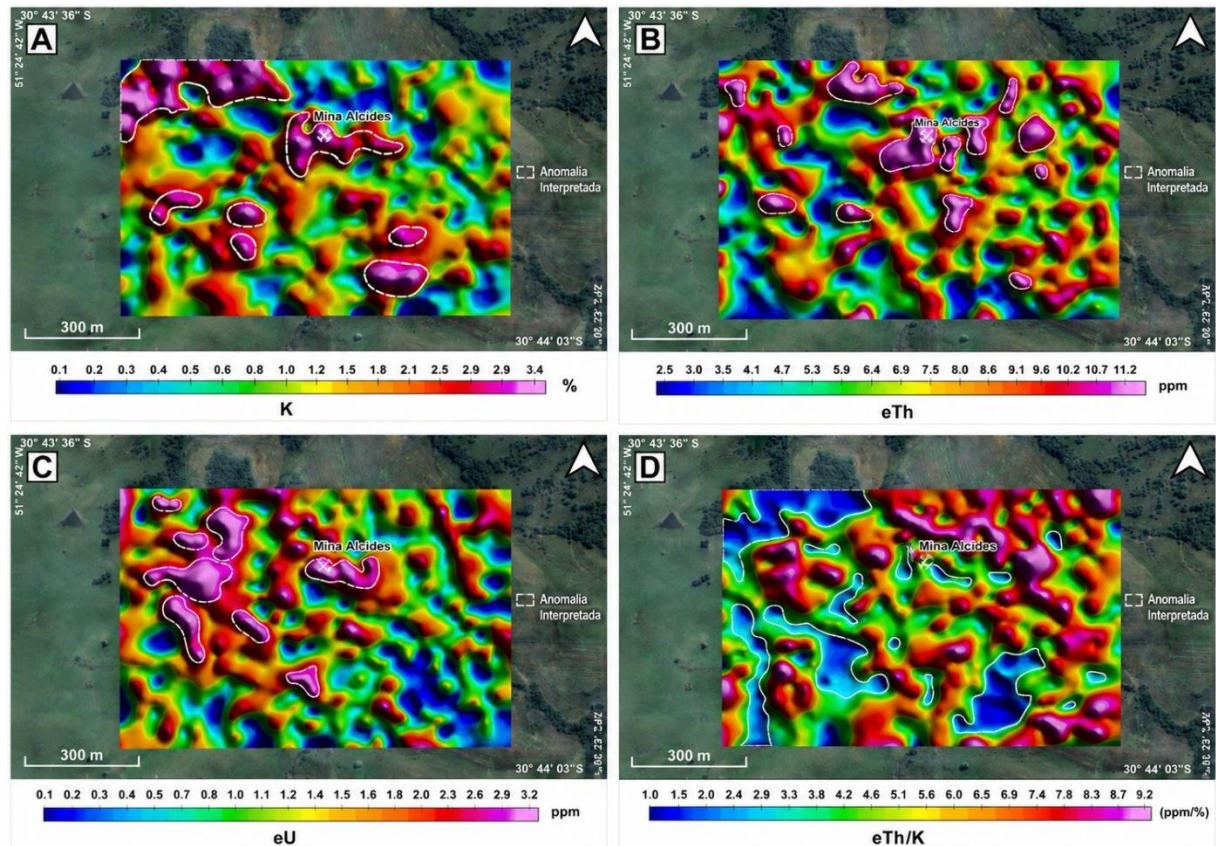
O setor noroeste ocorre o alvo exploratório mais prospectivo além de Alcides. Nessa região, uma anomalia significativa registra valores inferiores a 3 para a razão eTh/K e aproximadamente 3 % de K, comparáveis em magnitude aos observados na Mina Alcides. Essa anomalia delimita uma provável zona de halo hidrotermal com elevado potencial para mineralização de Cu–Ag. A morfologia associada à posição em relevos topográficos preservados, sugere a presença zonas silicificadas associadas a eventos de mineralização.

Na porção sudoeste da área, as anomalias ocorrem como zonas lineares e aglomeradas, com valores de eTh/K $\leq 3,6$ e concentrações de K em torno de 1,2–1,6 %. Embora menos prospectivas como alvos diretos de minério, essas anomalias intermediárias são significativas como assinaturas geofísicas para áreas com potencial para mineralizações.

Importante destacar que, no setor sul, uma anomalia isolada de morfologia ameboide apresenta valores baixos de eTh/K $\leq 3,0$ e concentrações de K em torno de 3,4 %; sua intensidade e combinação a posicionam como a segunda anomalia mais proeminente fora da Mina Alcides.

Essas assinaturas gamaespectrométricas são interpretadas como indicadores enriquecimento por propilitização. Nesse contexto, fluidos hidrotermais ricos em potássio transformam o plagioclásio em minerais secundários como sericita, clorita e albita, com alteração composição do lapilli-tufo e andesito.

Figura 25 A) Mapa da concentração de potássio com as anomalias delimitadas. B) Mapa da concentração de tório com as anomalias delimitadas. C) Mapa de concentração de urânio. D) Mapa da razão Th/K com zonas anômalas.



Fonte: autoria própria (2025).

8.5 Integração dos dados

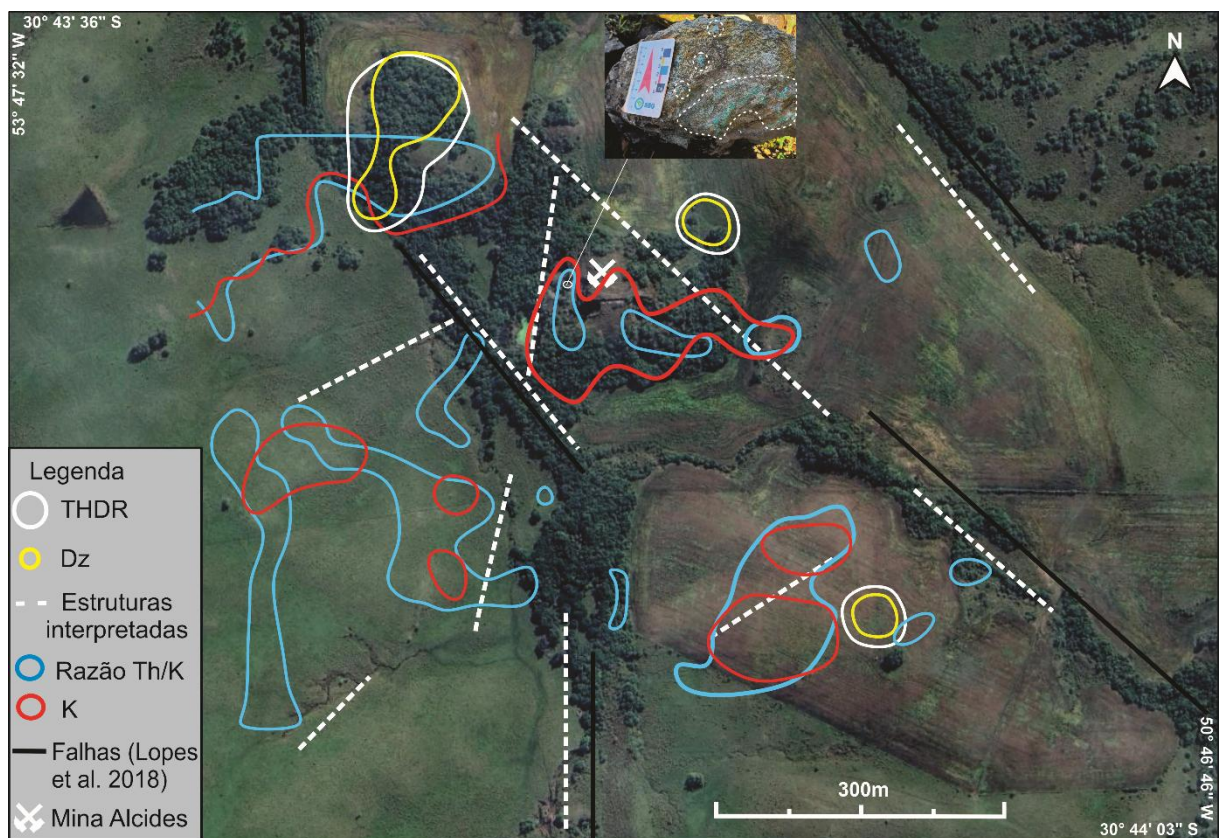
A integração dos dados para a prospecção geofísica nas Minas do Seival requer conjuntos de dados integrados para reduzir a ambiguidade entre assinaturas vulcânicas e hidrotermais, ao mesmo tempo em que estejam alinhados aos controles geológicos conhecidos. Lopes *et al.* (2018) demonstraram que os sistemas de falhas NW-SE e NE-SW exercem controle direto sobre a organização do sistema mineralizado.

O modelo proposto está baseado na sobreposição espacial de três anomalias geofísicas: (1) O mapeamento de falhas e zonas de cisalhamento é otimizado por meio de levantamentos de gradientes magnéticos verticais e horizontais, os quais detectam efetivamente contrastes abruptos de susceptibilidade em contatos litológicos e estruturais, manifestados como descontinuidades magnéticas. (2) As zonas de alteração argílica intermediária, que circundam núcleos propilíticos e servem como indicadores de mineralização, direcionada a anomalias de alto K, baixo eTh/K (3) Alvos de alta prioridade surgem da coincidência espacial de impressões

de alteração potássica (anomalias de alto K) com altos magnéticos fortes associados a diques intrusivos (Figura 26).

Embora a razão eTh/K e a análise magnética orientem a priorização em campo e a classificação de alvos, a confirmação das fácies de alteração exige análises petrográficas, geoquímicas e de testemunhos de sondagem diretas. As anomalias geofísicas definem domínios prospectivos passíveis de comprovação geoquímica.

Figura 26 Mapa de integração dos dados de magnetometria e gamaespectrometria e amostra de lapilito evidenciando a ocorrência de malaquita.



Fonte: autoria própria (2025).

9 CONCLUSÕES

A integração de dados de magnetometria e gamaespectrometria terrestre na região das Minas do Seival permitiu caracterizar assinaturas geofísicas associadas ao controle estrutural e aos processos de alteração hidrotermal que atuam na Formação Hilário, principal unidade hospedeira das mineralizações de cobre da Bacia do Camaquã.

Os resultados obtidos reforçam a interpretação de um condicionamento estrutural dominante da mineralização, com direções principais NE-SW e NW-SE associadas à dinâmica hidrotermal do sistema. A magnetometria, por meio de mapas de derivadas (ASA, THDR, Dx e Dy), revelou feições lineares e zonas de contraste de suscetibilidade magnética consistentes com o sistema de falhas regionais. Complementarmente, a gamaespectrometria contribuiu para a identificação de zonas de alteração hidrotermal, especialmente por meio da razão eTh/K , que se mostrou útil na discriminação de áreas com possível enriquecimento ou lixiviação de potássio.

Dentre os alvos identificados, o setor noroeste destacou-se por apresentar anomalias geoquímicas e geofísicas comparáveis, em magnitude e características, às observadas no entorno da Mina Alcides, configurando-se como área com maior potencial prospectivo relativo. Os dados integrados reforçam o potencial da região para hospedar mineralizações de cobre em profundidade, mesmo em áreas com expressão superficial limitada ou ausente.

Este trabalho demonstra a eficácia da integração de métodos geofísicos indiretos (magnetometria e gamaespectrometria) como ferramentas de apoio na etapa inicial de prospecção em terrenos com cobertura alterada ou vegetada, comum no Escudo Sul-riograndense. Embora os métodos aplicados não substituam a verificação direta em campo, os resultados contribuem para a redução da incerteza geológica e para o direcionamento mais eficiente de recursos exploratórios.

Os achados reforçam a importância de abordagens multimetódicas no estudo de sistemas hidrotermais em contextos pós-colisionais, contribuindo para o melhor entendimento dos controles metalogenéticos da mineralização cuprífera na Bacia do Camaquã.

Os alvos propostos possuem caráter preliminar e requerem validação por métodos diretos, como mapeamento geológico de detalhe, geoquímica de solo e rocha, sondagem e métodos geofísicos complementares, especialmente polarização induzida, técnica particularmente eficaz na detecção de sulfetos disseminados. Essa etapa é fundamental para confirmar a natureza das anomalias e reduzir a ambiguidade inerente aos métodos geofísicos indiretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHUMIMIDI, M. S.; ABOUD, E.; ALQAHTANI, F.; AL-BATTAHIEN, A.; SAUD, R.; ALQAHTANI, H. H.; ALJUHAN, N.; ALYOUSIF, M. M.; ALYOUSEF, K. A. Gamma-ray spectrometric survey for mineral exploration at Baljurashi area, Saudi Arabia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, v. 14, n. 1, p. 82–90, 2021. ISSN 1687-8507.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. 1984. O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo: Edgard Blücher, 378 p.
- ALMEIDA, R. P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L. The Ediacaran to Cambrian rift system of southeastern South America: tectonic implications. *The Journal of Geology*, Chicago, v. 118, n. 2, p. 145–161, 2010.
- ALMEIDA, R. P.; SANTOS, M. G.; FRAGOSO-CESAR, A. R.; JANIKIAN, L.; FAMBRINI, G. L. Recurring extensional and strike-slip tectonics after the Neoproterozoic collisional events in the southern Mantiqueira Province. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 84, p. 347–376, 2012.
- ALLIS, R.G. Geophysical anomalies over epithermal systems. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 36, p. 339–374, 1990.
- ALVES, L. L.; MOREIRA, C. A.; ARAÚJO, A. F. S.; ILHA, L. M.; OLIVEIRA, J. P. P.; KUMAIRA, S.; MASQUELIN, H. Gamma-ray spectrometric evaluation in watersheds with gold anomalies in stream sediments, Passo Feio Complex, Caçapava do Sul region (Brazil). *Discover Geoscience*, v. 3, n. 1, p. 58, 2025.
- BEA, F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of Petrology*, v. 37, n. 3, p. 521–552, 1996.
- BICCA, M. M.; CHEMALE JUNIOR, F.; JELINEK, A. R.; OLIVEIRA, C. H. E.; GUADAGNIN, F.; ARMSTRONG, R. Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 48, p. 173–192, 2013.
- BLAKELY, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 464 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pro-minerais-estrategicos/ctapme-2/resolucao-no-02.pdf>. Acesso em: 03 janeiro 2025.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2050: sustentabilidade e competitividade. Versão para consulta pública. Brasília, DF: MME, 2022.
- BONGIOLO, E. M.; RENAC, C.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B.; RONCHI, L. H.; PATRIER-MAS, P. Evidence of Ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry–epithermal Au–Cu deposits of Lavras do Sul. *Precambrian Research*, v. 189, p. 404–419, 2011.
- BORBA, A. W.; MIZUSAKI, A. M. P.; SILVA, D. R. A.; KOESTER, E.; NORONHA, F. L.; CASAGRANDE, J. Provenance of the Neoproterozoic Maricá Formation, Sul-rio-grandense Shield, southern Brazil: petrographic and Sm–Nd isotopic constraints. *Gondwana Research*, v. 9, p. 464–474, 2006.
- BORBA, A. W.; MIZUSAKI, A. M. P.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. J.; ONO, A. T.; HARTMANN, L. A. U–Pb zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. *Basin Research*, v. 20, p. 359–375, 2008.

CHEMALE JUNIOR, F. Evolução geológica do Escudo Sul-Riograndense. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (ed.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 13–52.

CLARK, David A. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*, v. 624, p. 46–65, 2014.

COOPER, G. R. J.; COWAN, D. R. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics*, v. 73, n. 3, p. H1–H4, 2008.

CORTÊS, A. R. P.; MOREIRA, C. A.; PAES, R. A. S.; VELOSO, D. I. K. Geophysical and metallogenetic modelling of the copper occurrence in Camaquã Sedimentary Basin, southern Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, v. 176, n. 11, p. 4955–4968, 2019.

DENTITH, M.; MUDGE, S.T. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press, 2014. 438 p

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys: adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 187–200, 1997.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *An introduction to the rock-forming minerals*. 2. ed. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1992. 558 p.

DE TONI, G. B. et al. Diatremas da Formação Hilário nas minas do Seival, Bacia do Camaquã, sul do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 48, n. 4, 2021.

EINAUDI, M. T.; HEDENQUIST, J. W.; INAN, E. E. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFAIR, R.; RICHARDS, J. P. (eds.). *Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. p. 293–313.

FAMBRINI, G. L.; JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P. de; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. O Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Central, RS: estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 273–284, 2005.

FAMBRINI, G. L.; JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P. de; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Evolução estratigráfica e paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Central, RS. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 1–24, 2007.

FERNANDES, L. A. D.; TOMMASI, A.; PORCHER, C. C. Deformation patterns in the southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: a reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 5, n. 1, p. 77–96, 1992.

FERREIRA, F. J.; SOUZA, J.; BONGIOLO, A.; CASTRO, L. G. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, v. 78, n. 3, p. J33–J41, 2013.

FONTANA, E. Hidrotermalismo e mineralizações das rochas vulcânicas da Mina do Seival: evolução geoquímica e isotópica ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$) dos fluidos e sua correlação com outros depósitos de minérios epitermais da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil. 2016. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FONTANA, E.; MEXIAS, A. S.; RENAC, C.; NARDI, L. V. S.; LOPES, R. W.; BARATS, A.; GOMES, M. E. B. Hydrothermal alteration of volcanic rocks in Seival Mine Cu-mineralization, Camaquã Basin, Brazil: part 1, chloritization process and geochemical dispersion in alteration halos. *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, v. 177, p. 45–60, jun. 2017.

- FONTANA, E.; RENAC, C.; MEXIAS, A. S.; BARATS, A.; GERBED, M. C.; LOPES, R. W.; NARDI, L. V. S. Mass balance and origin of fluids associated to smectite and chlorite/smectite alteration in Seival Mine Cu–Mineralization – Camaquã Basin –Brazil (Part II). *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, v. 196, 2019, p. 20–32.
- GALBRAITH, J. H.; SAUNDERS, D. F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 49–73, 1983.
- GASTAL, M. C. P.; LAFON, J. M.; FERREIRA, F. J. F.; MAGRO, J. F. U.; REMUS, M. V. D.; SOMMER, C. A. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 1: geologia, geofísica e geocronologia ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 109–124, 2006.
- GASTAL, M. C.; FERREIRA, F. J. F.; CUNHA, J. U.; ESMERIS, C.; KOESTER, E.; RAPOSO, M. I. B.; ROSSETTI, M. M. M. Lavras granite emplacement and gold mineralization during the development of the post-collisional volcano-plutonic center, west of the Sul-rio-grandense Shield: geophysical and structural data. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 217–241, 2015.
- GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL (SGB). *An Overview of Critical and Strategic Minerals Potential of Brazil: 2026 Edition*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2026.
- GEOSOFT INC. Oasis montaj: mapping and processing system. Version 7.1. Toronto: Geosoft Inc., 2010. 334 p.
- HEDENQUIST, J. W. et al. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, n. 23, p. 9–13, 1995.
- HEDENQUIST, J. W.; ARRIBAS JUNIOR, A.; GONZÁLEZ-URIEN, E. Exploration for epithermal gold deposits. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (ed.). *Reviews in Economic Geology*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2000. v. 13, p. 245–277.
- HEDENQUIST, J. W.; ARRIBAS, A.; AOKI, M. Zonation of sulfate and sulfide minerals and isotopic composition in the Far Southeast porphyry and Lepanto epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Resource Geology*, v. 67, n. 2, p. 174–196, 2017.
- HOOVER, D. B.; PIERCE, H. A. Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to gold exploration. Denver: U.S. Geological Survey, 1990. Open-File Report 90-203.
- HUECK, M.; OYHANTÇABAL, P.; PHILIPP, R. P.; BASEI, M. A. S.; SIEGESMUND, S. The Dom Feliciano Belt in southern Brazil and Uruguay. In: SIEGESMUND, S.; OYHANTÇABAL, P.; BASEI, M. A. S. (org.). *Geology of Southwest Gondwana*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 267–302.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Vienna: IAEA, 2003. 179 p. IAEA-TECDOC-1363. ISBN 92-0-108303-3.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The role of critical minerals in clean energy transitions. Paris: IEA, 2021.
- IRVINE, R. J.; SMITH, M. J. Geophysical exploration for epithermal deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 36, p. 375–412, 1990.
- JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; CORRÊA, C. R. A.; PELOSI, A. P. M. R. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozoico III) em sua área-tipo: litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 349–362, 2003.

JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. P. de; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; ARAUJO CORRÊA, C. R. de; PELOSI, A. P. M. R. Evolução paleoambiental e sequências deposicionais do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho (Supergrupo Camaquã) na porção norte da Sub-bacia Camaquã Ocidental. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 245–256, 2005.

JOHN, D. A.; GARSIDE, L. J.; WALLACE, A. R. Magmatic and tectonic setting of late Cenozoic epithermal gold–silver deposits in northern Nevada, with an emphasis on the Pah Rah and Virginia Ranges and the northern Nevada rift. In: *Geological Society of Nevada Special Publication*, Reno, n. 29, p. 65–158, 1999.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to Geophysical Exploration. 3. ed. London: Blackwell Science, 2002.

LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z. G.; TEIXEIRA, J. B. G.; NETO, A. B. Ore genesis at the Camaquã copper mine, a Neoproterozoic sediment-hosted deposit in southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, Amsterdam, v. 26, n. 1–2, p. 71–89, 2005.

LENHARE, B. D.; MOREIRA, C. A. Geophysical prospecting over a meta-ultramafic sequence with indicators of gold mineralization in Rio Grande do Sul State, Southernmost Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, v. 177, n. 11, p. 5367–5383, 2020.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, v. 71, n. 2, p. L13–L16, 2006.

LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S. The Lavras do Sul Shoshonitic Association: implications for the origin and evolution of Neoproterozoic shoshonitic magmatism in southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, n. 1, p. 67–77, 1998.

LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; NARDI, L. V. S. O vulcanismo neoproterozoico–ordoviciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: os ciclos vulcânicos da Bacia do Camaquã. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (org.). *Geologia do Rio Grande do Sul: estado da arte*. Porto Alegre: CPRM, 2007. p. 79–95.

LOPES, R.W. Alterações hidrotermais, mineralizações de Cu-Ag e geologia estrutural das rochas vulcanogênicas da mina do Seival, Bacia neoproterozoica do Camaquã, sul do Brasil. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LOPES, R. W.; MEXIAS, A. S.; PHILIPP, R. P.; BONGIOLO, E. M.; RENAC, C.; BICCA, M. M.; FONTANA, E. Au–Cu–Ag mineralization controlled by brittle structures in Lavras do Sul Mining District and Seival Mine deposits, Camaquã Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 88, p. 197–215, 2018. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.08.017.

LOPES, R. W.; RENAC, C.; MEXIAS, A. S.; NARDI, L. V. S.; FONTANA, E.; GOMES, M. E. B.; BARATS, A. Mineral assemblages and temperature associated with Cu enrichment in the Seival area, Neoproterozoic Camaquã Basin of southern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 201, p. 56–70, 2019. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.03.010.

LOWRIE, W. Fundamentals of geophysics. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 375 p.

MATTÉ, V. O vulcanismo ediacarano da porção oriental do Platô da Ramada, oeste do Escudo Sul-rio-grandense. 2016. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MEXIAS, A. S.; BONGIOLO, E. M.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L.; FRANTZ, J. C. Alterações hidrotermais e mineralizações nas rochas da associação plutono-vulcano-sedimentar da região de Lavras do Sul-RS. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (org.). *Geologia do Rio Grande do Sul: estado da arte*. Porto Alegre: CPRM, 2007. p. 145–159.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 39–50, 1997.

MOREIRA, C. A.; PAES, R. A. S.; ILHA, L. M.; BITTENCOURT, J. da C. Reassessment of copper mineral occurrence through electrical tomography and pseudo 3D modeling in Camaquã Sedimentary Basin, Southern Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, v. 176, n. 2, p. 737–750, 2019.

MOXHAM, R. M. Natural radioactivity in Washington County, Maryland. *Geophysics*, v. 28, n. 2, p. 262–272, 1963.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. Looking into the Earth: an introduction to geological geophysics. New York: Cambridge University Press, 2000.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, n. 3, p. 507–517, 1972.

NABIGHIAN, M. N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, v. 39, n. 1, p. 85–92, 1974.

NARDI, L. V. S. Geochemistry and petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brazil. 1984. Tese (Doutorado em Geologia) — University of London, London, 1984.

NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, p. 139–146, 1985.

NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. Hidrotermalismo no Complexo Granítico Lavras e vulcânicas associadas. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 369–375, 1988.

OLIVEIRA, J. P. P. de; MOREIRA, C. A.; CARLOS, D. U.; ILHA, L. M.; BARROS, M. F. S.; ALVES, L. L.; MASQUELIN, H. Geophysical analysis using gamma-ray spectrometry, magnetometry, and digital elevation model in a copper occurrence within the Camaquã Sedimentary Basin, southern Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, p. 1–16, 2025.

PAIM, P.; CHEMALE Jr. F.; LOPES, R. C. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luiz Fernando (Org.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 231–274.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JUNIOR, F.; WILDNER, W. Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 36, p. 183–193, 2014. DOI: 10.5902/2179460X13748.

PEREIRA, H. G.; FERREIRA, F. J. F.; MOREIRA, C. A.; SILVA, V. A. F. Geophysical-structural framework in a mineralized region of northwesternmost Camaquã Basin, southern Brazil. *Geofísica Internacional*, Cidade do México, v. 60, n. 2, p. 101–123, 2021.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR, F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: geological relationships and U–Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 46, n. Suppl. 01, p. 83–104, 2016.

PIRAJNO, F. Hydrothermal mineral deposits: Principles and fundamental concepts for the exploration geologist. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

PIRAJNO, F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Australia: Springer, 2009.

PIRES, A. C. B.; HARTHILL, N. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixás-Itapaci area, Goiás, Brazil. *Geophysics*, v. 54, n. 10, p. 1326–1332, 1989.

PORTNOV, A. M. Specialization of rocks toward potassium and thorium in relation to mineralization. *International Geology Review*, London, v. 29, n. 3, p. 326–344, 1987.

RAPOSO, M. I. B.; GASTAL, M. C. P. Emplacement mechanism of the main granite pluton of the Lavras do Sul intrusive complex, South Brazil, determined by magnetic anisotropies. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 466, n. 1–2, p. 18–31, 2009.

REISCHL, J. L. Mineralizações cupríferas associadas a vulcânicas na Mina Seival-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Anais... Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978. p. 1568–1582.

REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I.; REISCHL, J. L. Distal magmatic–hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au–Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu–Ag) deposits, southern Brazil. *Gondwana Research*, v. 3, p. 155–174, 2000.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, v. 57, n. 1, p. 116–125, 1992.

SAALMANN, K.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V. D.; KOESTER, E.; CONCEIÇÃO, R. V. Sm–Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano–sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de la Plata craton. *Gondwana Research*, Amsterdã, v. 8, p. 143–161, 2005.

SAALMANN, K.; GERDES, A.; LAHAYE, Y.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V. D.; LÄUFER, A. Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: the prolonged Brasiliano orogeny in southernmost Brazil. *International Journal of Earth Sciences*, Berlin, v. 100, n. 2, p. 355–378, 2011.

SHIVES, R. B. K.; CHARBONNEAU, B. W.; FORD, K. L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry—Recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, Tulsa, v. 65, n. 6, p. 2001–2011, 2000.

SILLITOE, R. H. Epithermal Models: Genetic Types, Geometric Controls and Shallow Features. In *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada, Special Paper, v. 40, p. 403–417, 1993.

SILLITOE, R. H.; HEDENQUIST, J. W. Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Publication*, Littleton, n. 10, p. 315–343, 2003.

SILLITOE, R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, Littleton, v. 105, n. 1, p. 3–41, 2010.

SIMMONS, S. F.; WHITE, N. C.; JOHN, D. A. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (ed.). *Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume*. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005. p. 485–522.

SKINNER, B. J. Hydrothermal mineral deposits: what we do and what we don't know. In: BARNES, H. L. (ed.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. p. 1–29.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F. de; NARDI, L. V. S.; FIGUEIREDO, A. M. G.; PIEROSAN, R. Potassic and low- and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 18, n. 3–4, p. 237–254, 2005.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F.; PIEROSAN, R.; MACHADO, A. Reoignimbritos e ignimbritos de alto grau do vulcanismo Acampamento Velho, RS: origem e temperatura de formação. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 3, p. 420-435, 2011.

TEIXEIRA, E. A. Cobre no Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, Serviço de Fomento da Produção Mineral, 1937.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied geophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TONIOLO J.A., Remus M.V.D., Macambira M.J.B., Moura C.A.V. 2004. Metalogênese do Depósito de Cobre Cerro dos Martins, RS, Revisão e Geoquímica Isotópica de Sr, S, O e C. *Pesquisas em Geociências*, 31:41–67.

TONIOLO, J. A.; GIL, C. A. A.; SANDER, A. Projeto BANEIO: metalogenia das bacias neoproterozoico-eopaleozoicas do Sul do Brasil: Bacia do Camaquã. Porto Alegre: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2007. 1 CD-ROM.

ULBRICH, H. H. G. J.; ULBRICH, M. N. C.; FERREIRA, F. J. F.; ALVES, L. S.; GUIMARÃES, G. B.; FRUCHTING, A. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. *Geologia USP. Série Científica*, v. 9, n. 1, p. 33–53, 2009.

WILDNER, W.; LIMA, E. F.; NARDI, L. V. S.; SOMMER, C. A. Volcanic cycles and setting in the Neoproterozoic III to Ordovician Camaquã Basin succession in southern Brazil: characteristics of post-collisional magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Amsterdam, v. 118, n. 1–2, p. 261–283, 2002.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 201–216, 1997.