



**THAYNA CRISTHYNA LIMA**

**PETROLOGIA DA OCORRÊNCIA MINERAL CUPRÍFERA MINA DOS  
CRESPOS, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul  
2025**

**THAYNA CRISTHYNA LIMA**

**PETROLOGIA DA OCORRÊNCIA MINERAL CUPRÍFERA MINA DOS  
CRESPOS, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

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

Orientador: Vinicius Matté  
Coorientadora: Eduarda Tobolski

Caçapava do Sul

2025

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

L159p Lima , Thayna Cristhyna  
PETROLOGIA DA OCORRÊNCIA MINERAL CUPRÍFERA MINA DOS  
CRESPOS, CAÇAPAVA DO SUL - RS / Thayna Cristhyna Lima .  
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.  
"Orientação: Vinicius Matté".

1. Petrologia. 2. Mineralização cuprífera. 3.  
Hidrotermalismo. 4. Grupo Santa Bárbara. 5. Caçapava do Sul  
(RS). I. Título.

**THAYNA CRISTHYNA LIMA**

**PETROLOGIA DA OCORRÊNCIA MINERAL CUPRÍFERA MINA DOS CRESPOS, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de dezembro de 2025

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Vinicius Matté

Orientador

UNIPAMPA

---

Profa. Dra. Cristiane Heredia Gomes

UNIPAMPA

---

Geóloga Sissa Kumaira

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **VINICIUS MATTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2025, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIANE HEREDIA GOMES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2025, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SISSA KUMAIRA, GEOLOGO**, em 19/12/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1934040** e o código CRC **AB0171B1**.

---

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização geológica, petrográfica e geoquímica da ocorrência mineral cuprífera da Mina dos Crespos, localizada no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. A área de estudo insere-se no Grupo Santa Bárbara, pertencente à Bacia do Camaquã, e está associada a eventos vulcano-sedimentares e hidrotermais relacionados aos estágios finais do Ciclo Brasileiro-Panafricano. A mineralização de cobre ocorre predominantemente em rochas vulcânicas e vulcanoclásticas, sendo controlada por estruturas rúpteis que favoreceram a circulação de fluidos mineralizantes. A metodologia adotada incluiu campanhas de campo com mapeamento geológico e coleta de amostras representativas, descrição macroscópica e petrográfica das litologias, além de análises geoquímicas por Fluorescência de Raios X (FRX), visando à quantificação de cobre e de elementos associados. As rochas identificadas compreendem lapillitufos, ignimbritos, andesitos, riolitos, basaltos e unidades sedimentares, muitas das quais apresentam evidências de alteração hidrotermal, como sericitização, cloritização, carbonatação e oxidação. Os resultados indicam uma forte relação entre o vulcanismo félsico, os processos hidrotermais e a concentração de cobre, com mineralizações associadas a veios e zonas fraturadas, além de ocorrência de minerais secundários, como malaquita, sugerindo enriquecimento supergênico. As análises geoquímicas revelam teores elevados de cobre em amostras sulfetadas, reforçando o potencial metalogenético da área. Conclui-se que a Mina dos Crespos representa um sistema vulcano-hidrotermal significativo no contexto da Bacia do Camaquã, contribuindo para o entendimento dos processos de mobilização e deposição de cobre em ambientes pós-orogênicos e reforçando o potencial prospectivo do Grupo Santa Bárbara.

**Palavras-chave:** Grupo Santa Bárbara. Mineralizações de Cobre. Rochas Alcalinas. Processos Hidrotermais.

## ABSTRACT

This study aims to characterize the geological, petrographic, and geochemical features of the copper mineral occurrence at Mina dos Crespos, located in the municipality of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, southern Brazil. The study area is part of the Santa Bárbara Group within the Camaquã Basin and is associated with volcano-sedimentary and hydrothermal events related to the final stages of the Brasiliano–Pan-African Cycle. Copper mineralization occurs mainly in volcanic and volcanoclastic rocks and is structurally controlled by brittle structures that favored the circulation of mineralizing fluids. The adopted methodology included field campaigns with geological mapping and the collection of representative samples, macroscopic and petrographic descriptions of the lithologies, and geochemical analyses using X-ray Fluorescence (XRF) to quantify copper and associated elements. The identified rock types include lapilli tuffs, ignimbrites, andesites, rhyolites, basalts, and sedimentary units, many of which exhibit evidence of hydrothermal alteration, such as sericitization, chloritization, carbonation, and oxidation. The results indicate a strong relationship between felsic volcanism, hydrothermal processes, and copper concentration, with mineralization associated with veins and fracture zones, as well as the presence of secondary minerals such as malachite, suggesting supergene enrichment. Geochemical analyses reveal elevated copper contents in sulfide-bearing samples, reinforcing the metallogenetic potential of the area. It is concluded that Mina dos Crespos represents a significant volcano-hydrothermal system within the Camaquã Basin, contributing to the understanding of copper mobilization and deposition processes in post-orogenic environments and highlighting the prospective potential of the Santa Bárbara Group.

**Keywords:** Santa Bárbara Group. Copper Mineralization. Alkaline Rocks. Hydrothermal Processes.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de localização e situação da área de estudo, incluindo os pontos descritos..... 15
- Figura 2: Mapa geológico dos Escudos do Sul do Brasil e do Uruguai. A seta vermelha indica a área de estudo. Zonas de cisalhamento dúcteis numeradas na região: 1 – Itajaí-Perimbó, 2 – Major Gercino, 3 – Caçapava do Sul, 4 – Dorsal de Canguçu, 5 – Passo do Marinho. .... 18
- Figura 3: Mapa geológico das unidades que compõem a Bacia do Camaquã. Destaque em vermelho para a área de estudo.....21
- Figura 4: Esquema simplificado ilustrando processos hidrotermais e mineralizações associadas. ....32
- Figura 5: Mapa geológico da área de estudo. Mapa mostrando as principais unidades geológicas mapeadas na região da Mina dos Crespos, bem como a localização dos pontos de coleta utilizados neste estudo.....41
- Figura 6: Características do afloramento e da rocha. A) Vista do afloramento na estrada tipo lajeado; B) foto de detalhe do afloramento; C) foto de detalhe da amostra evidenciando a rocha e os púmices; D) zoom do afloramento evidenciando o Lapilli Tufo.....42
- Figura 7: Característica do lapilli-tufo em lâmina, evidenciando a composição e textura. A – (Luz polarizada plana) Porção da lâmina mostrando cristaloclastos de plagioclásio anédricos e estilhaçados, com intensa sericitização, além de litoclastos de andesito porfirítico em matriz vítrea. B – Luz (polarizada cruzada) Mesma porção de A sob luz cruzada, evidenciando maclas polissintéticas nos plagioclásios menos alterados e o contraste entre áreas sericitizadas e litoclastos de andesito. C – (Luz polarizada plana) Outra porção da lâmina com variação granulométrica marcada, plagioclásios parcialmente substituídos por sericita e litoclastos de andesito com textura porfirítica. D – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de C sob luz cruzada, ressaltando a heterogeneidade dos plagioclásios, zonas de sericitização e a presença de matriz vítrea com litoclastos distribuídos de forma irregular reforçando o caráter da rocha 44
- Figura 8: Características da rocha em lâmina (Tufo de Cristais). A – (Luz polarizada plana) Porção da lâmina mostrando cristaloclastos de plagioclásio intensamente sericitizados, distribuídos em matriz fina, com agregados ferruginosos e cristais anédricos semelh antes a estilhaços. B – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de A sob luz cruzada, ressaltando a sericitização dominante, cristais de plagioclásio muito alterados e raros indivíduos preservando macla polissintética. C – (Luz polarizada plana) Outra porção da lâmina evidenciando agregados sericíticos levemente orientados e cristaloclastos de plagioclásio com forte alteração, incluindo centros saussuritizados. D – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de C sob luz cruzada, destacando a intensa sericitização, tons ferruginosos e a textura definida por plagioclásios altamente consumidos por minerais de alteração.....45

Figura 9: Afloramentos e amostras de andesitos coletados, mostrando variações de textura, estrutura e mineralogia. A) Afloramento de andesito em leito de córrego, com fraturas e exposição contínua da rocha; B) andesito porfirítico com fenocristais subédricos e uédricos de plagioclásio imersos em matriz fina de cor escura; C) amostra de andesito com textura porfirítica, apresentando fenocristais de plagioclásio bem visíveis, distribuídos em matriz afanítica; D) registro de atividade de campo durante descrição de afloramento em ambiente vegetado, onde ocorrem rochas andesíticas. E) amostra de andesito com fenocristais euédricos. ....46

Figura 10: Características petrográficas do Andesito Porfirítico. A) Fenocristal de plagioclásio com saussuritização intensa e alteração hidrotermal em matriz microcristalina a. (Luz polarizada Natural). B) Fenocristal de plagioclásio subédrico com macla polissintética e saussuritização incipiente no núcleo e zonas de crescimento. (Luz polarizada cruzada). ....48

Figura 11: Caracterização do afloramento e das amostras de rocha. A) Vista panorâmica de afloramento com morfologia tipo lajeado; B) amostra evidenciando cristaloclastos de quartzo e feldspato inseridos em matriz com estrutura intensamente soldada; C) afloramento com geometria em blocos destacados; D) amostra apresentando textura relacionada a menor grau de soldagem, com feições mais porosas e cristaloclastos menos coalescidos. ....49

Figura 12: Afloramento da Mina dos Crespos. ....50

Figura 13: Características das rochas vistas em campo. A) riolito com fenocristais de feldspato bem distribuídos na matriz, evidenciando uma textura porfirítica.; B) riolito com presença de malaquita recobrando a superfície da rocha, um indicativo de mineralização secundária de cobre gerada pela alteração; C) destaca-se um veio de sulfeto que corta o riolito, facilmente identificado pela coloração escura contrastante com a matriz clara da rocha hospedeira, sugerindo um episódio de mineralização posterior; D) riolito com fenocristais de feldspato esparsos, reforçando a variação textural observada nas rochas da área de estudo. ....52

Figura 14: Características da rocha em lâmina, mostrando a textura porfirítica e os processos de alteração. A) Fenocristais de sanidina, imersos em matriz microcristalina intensamente oxidada; fraturas irregulares preenchidas por malaquita a Luz Polarizada Plana. B) Detalhe da fratura principal, evidenciando preenchimento contínuo por malaquita de coloração verde intensa e sua relação com a matriz oxidada a Luz Polarizada Cruzada. C) Textura porfirítica destacando fenocristais de quartzo anédricos e arredondados, alguns formando agregados policristalinos, além do preenchimento hidrotermal das fraturas e em D a Luz Polarizada Cruzada. ....54

Figura 15: Amostras de basaltos vesiculados e maciços coletadas, evidenciando variações texturais e mineralógicas. A) Grupo II - basalto vesicular com vesículas de formato arredondado e distribuição irregular; B) Grupo II - basalto amigdaloidal, com vesículas preenchidas por minerais secundários; C) Grupo II - basalto com alteração hidrotermal evidente, apresentando coloração esverdeada; D) Grupo II - Amostra de basalto evidenciando vesículas e amígdalas bem desenvolvidas; E) Grupo I - basalto

maciço, com fratura concoidal e coloração escura; a presença de fraturas preenchidas por minerais secundários de tonalidade avermelhada sugere circulação de fluidos pós-solidificação.....55

Figura 16: Características da rocha em lâmina, evidenciando a textura porfírica do basalto. A) (Luz polarizada plana) Fenocristais de plagioclásio e piroxênio em matriz microcristalina fina, com plagioclásios sericitizados e piroxênios alterados para argilomineral e clorita; matriz com áreas avermelhadas indicando material vítreo oxidado. B) (Luz polarizada cruzada) Mesma área de A, mostrando maclas polissintéticas nos plagioclásios, cores de interferência baixas nos piroxênios alterados e bom contraste ótico com a matriz. C) (Luz polarizada plana) Fenocristal de piroxênio globular parcialmente alterado, com plagioclásios tabulares e matriz microcristalina rica em microlitos; presença de bordas reabsorvidas e fraturas internas. D) (Luz polarizada cruzada) Mesma área de C, evidenciando extinção ondulante nos plagioclásios, graus distintos de alteração nos piroxênios e matriz microcristalina típica de basalto porfírico alterado. ....57

Figura 17: Características do afloramento e da rocha. A) Vista de afloramento; B) foto de detalhe de afloramento evidenciado clastos em meio a matriz; C) zoom da rocha mostrando clastos polimícticos; D) detalhe da matriz rica em material mais fino e clastos angulos a subarredondados de diversos tamanhos. ....58

Figura 18: Espectro de Fluorescência de Raios X (XRF) simulado da amostra TL04 SULFETO, evidenciando picos intensos de S, Fe, Cu e Zn. ....59

Figura 19: Concentração média (%) dos principais elementos e óxidos na amostra TL04 SULFETO, destacando o teor elevado de cobre.....61

Figura 20: Características da rocha e do afloramento apresentando forte alteração hidrotermal. ....63

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Compilação das idades relatadas para os grupos da BC. ....	24
--	----

## LISTA DE SIGLAS

**Cu** - Cobre

**EGP** - Elementos do Grupo da Platina

**Te** - Telúrio

**U-Pb** - Urânio-Chumbo

**V** - Vanádio

**W** - Tungstênio

**BC** - Bacia do Camaquã

**ESRG** - Escudo Sul-Rio-Grandense

**FAV** - Formação Acampamento Velho

**FRX** - Fluorescência de Raios X

**GSB** - Grupo Santa Bárbara

**HFSE** - Elementos de Campo de Força Elevada

**IUGS** - União Internacional de Ciências Geológicas

**MEV** - Microscópio Eletrônico de Varredura

**PM** - Província Mantiqueira

**ppm** - Partes por Milhão

**rpm** - Rotações por Minuto

**SIG** - Sistema de Informação Geográfica

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Área de Estudo	15
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
<b>3. JUSTIFICATIVA</b>	<b>17</b>
<b>4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL</b>	<b>18</b>
4.1 Escudo Sul-Rio-grandense	18
4.2 Bacia do Camaquã	19
4.3 Serra de Santa Bárbara	24
4.4 Mina dos Crespos	25
<b>5. MINERALIZAÇÕES HIDROTERMAIS E ALCALINAS: COBRE, GEOQUÍMICA E IMPORTÂNCIA METALOGENÉTICA</b>	<b>27</b>
5.1 Rochas Alcalinas e Hidrotermalismo	27
5.2 Características Geoquímicas das Rochas Alcalinas	29
5.3 Mineralizações de Cobre no Grupo Santa Bárbara	30
5.4 Hidrotermalismo e Mineralizações Associadas	31
5.5 Alteração Hidrotermal	34
5.6 Importância Econômica e Metalogenética do Cobre	35
<b>6. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
6.1 Etapa de Aquisição de Dados	37
6.1.1 Revisão Bibliográfica	37
6.2 Etapa de Campo	37
6.3 Trabalho de Laboratório	38
6.3.1 Petrografia	38
6.3.1.1 Laminação	38
6.3.1.2 Descrições Petrográficas	39
6.3.2 Sistema de Informações Geográficas	39
6.4 Análise de Fluorescência de Raio X	40
6.5 Etapa de Integração Final	40
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>41</b>
7.1 Mapa Geológico	41

<b>7.2 Unidades</b> .....	<b>42</b>
7.2.1 Formação Hilário do Grupo Bom Jardim.....	42
7.2.2 Formação Hilário do Grupo Bom Jardim.....	46
7.2.3 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara.....	48
7.2.4 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara.....	50
7.2.5 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara.....	54
7.2.6 Descrição Geral das Rochas Sedimentares .....	58
<b>7.3 Análise de Fluorecencia de Raio X</b> .....	<b>59</b>
<b>8. DISCUSSÃO</b> .....	<b>62</b>
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Mina dos Crespos, situada a cerca de 23 km da cidade de Caçapava do Sul, destaca-se como uma ocorrência de cobre vinculada ao vulcanismo félsico e à circulação de fluidos hidrotermais em estruturas rúpteis, constituindo um exemplo representativo de sistemas mineralizantes pós-orogênicos no sul do Brasil (Simch, 2019; Lopes, 2011). Apesar de sua proximidade com depósitos amplamente estudados, como as Minas do Camaquã, trata-se de uma ocorrência ainda pouco investigada, o que reforça a necessidade de análises integradas que permitam compreender sua gênese e seu potencial econômico.

Geologicamente, a área insere-se no Grupo Santa Bárbara, unidade da Bacia do Camaquã que registra parte da evolução tectônica e sedimentar associada ao Ciclo Brasileiro no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). Composto por sequências vulcano-sedimentares do Ediacarano, o grupo representa um ambiente tardi a pós-tectônico da Orogenia Brasileira-Panafricana, marcado pela ocorrência de arenitos, conglomerados e riolitos associados a sedimentação flúvio-deltaica e magmatismo bimodal pós-colisional (Heilbron *et al.*, 2004; Borba, 2006).

Segundo Fambrini *et al.* (2014), o Grupo Santa Bárbara ocorre predominantemente na Sub-bacia Camaquã Ocidental, abrangendo regiões como Caçapava do Sul, Lavras do Sul e Dom Pedrito. Esses autores destacam que a unidade apresenta acamamentos inclinados, resultantes da atuação de falhas normais a oblíquas que provocaram o basculamento dos blocos rochosos. Na região do vale do Arroio Santa Bárbara e da Serra de Santa Bárbara, onde se localiza a área de estudo, os estratos exibem mergulhos entre 25° e 80° para leste, além de mineralizações metálicas associadas ao vulcanismo félsico e ao hidrotermalismo, como ocorre nas Minas do Camaquã.

Além das mineralizações já conhecidas na região, estudos em outras unidades da Bacia do Camaquã e em seus correlatos plutônicos indicam que depósitos de cobre estão frequentemente relacionados a processos hidrotermais associados ao vulcanismo félsico, especialmente em riolitos e tufos ricos em feldspatos. Esses processos são apontados como responsáveis pela mobilização e concentração do cobre, reforçando o potencial econômico da bacia em um contexto de crescente demanda global por metais estratégicos (Borba, 2006; Lopes, 2011; Simch, 2012).

Enquanto depósitos de maior porte, como os das Minas do Camaquã, têm sido amplamente estudados, a Mina dos Crespos permanece pouco caracterizada quanto aos seus aspectos petrográficos e geoquímicos. Assim, este trabalho busca complementar essa lacuna ao integrar dados de campo, descrições macro e petrográficas e resultados geoquímicos, propondo interpretações sobre o modelo genético da ocorrência e sua relação com os processos vulcano-hidrotermais regionais.

A pesquisa foi desenvolvida por meio de três campanhas de campo voltadas ao mapeamento geológico e à coleta de amostras representativas de diversos litotipos, incluindo riolitos, basaltos, andesitos, ignimbritos, lapilli-tufos e conglomerados, além de materiais mineralizados. Em laboratório, as amostras foram submetidas à descrição macroscópica e microscópica para caracterização textural e mineralógica, bem como a análises geoquímicas por Fluorescência de Raios X (FRX) para quantificação de cobre e elementos associados. Os dados foram posteriormente integrados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para análise espacial das feições geológicas e das zonas mineralizadas.

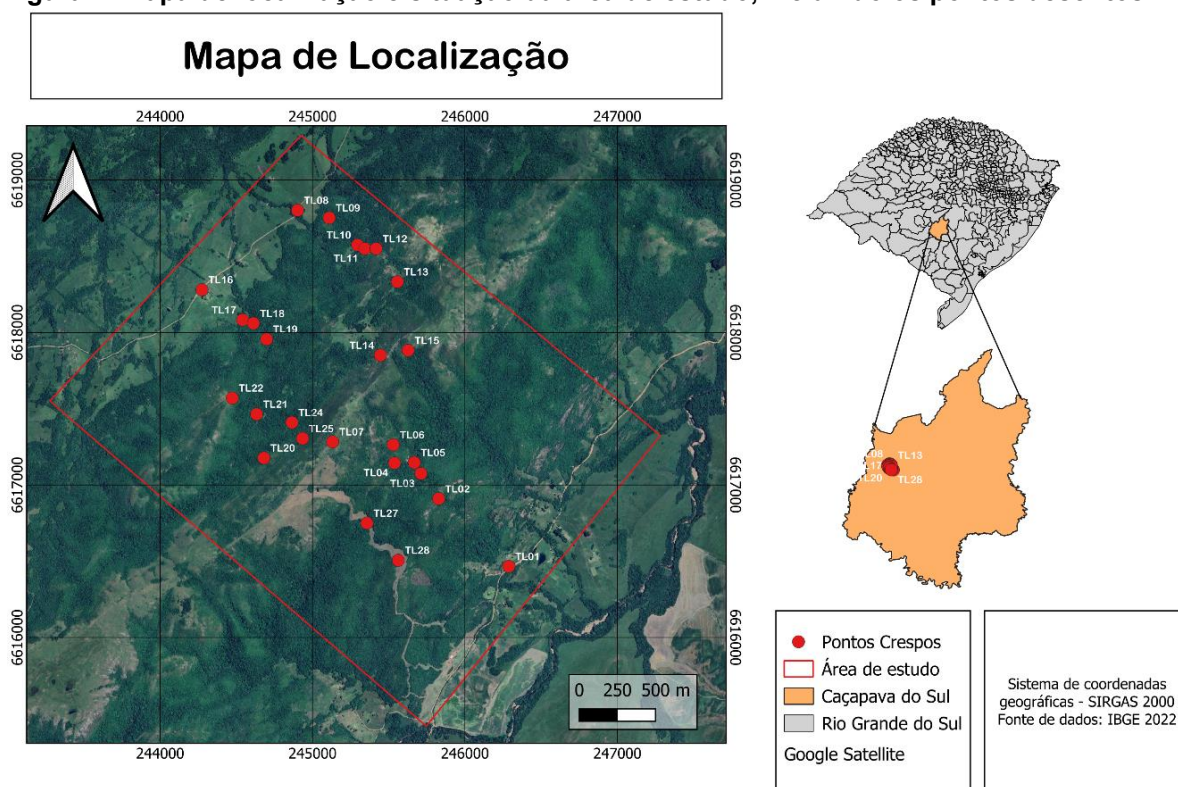
A questão central que orienta este estudo é: de que maneira os dados geológicos da Mina dos Crespos contribuem para compreender os processos que formaram as mineralizações na Bacia do Camaquã? Para respondê-la, o trabalho avalia o contexto geológico regional do Grupo Santa Bárbara e os processos vulcânicos e hidrotermais que influenciaram a formação da mineralização de cobre na área.

Os resultados evidenciam uma diversidade litológica significativa e uma forte associação entre o vulcanismo félsico e a mineralização de cobre. Foram identificados veios e disseminações de sulfetos, com teores de cobre de até 250.000 ppm, além de alteração hidrotermal expressiva, marcada por cloritização, sericitização, carbonatação e oxidação. A presença de malaquita reforça a ocorrência de enriquecimento supergênico sobre sulfetos primários, enquanto a espacialização das zonas mineralizadas ao longo de fraturas NE-SW e N-S confirma o controle estrutural da deposição do minério.

## 1.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) está localizada na carta topográfica Arroio Santa Bárbara (Folha SH.22-Y-A-IV-2; MI - 2995/2), na região da Serra de Santa Bárbara, a aproximadamente 23 km a oeste da cidade de Caçapava do Sul, no centro-sul do Rio Grande do Sul. O acesso à área pode ser feito a partir da cidade, seguindo pela Avenida João Manoel de Lima e Silva e, em seguida, pela RS-357 no sentido de Lavras do Sul por 3,5 km até a localidade da Vila do Segredo. A partir daí, toma-se uma estrada não pavimentada que segue em direção oeste por 16 km, levando até a Serra de Santa Bárbara. No *Google Maps*, há um marcador intitulado “Mina dos Crespos”, que pode contribuir para a localização e acesso à área.

Figura 1: Mapa de localização e situação da área de estudo, incluindo os pontos descritos.



Fonte: Elaborado pela autora.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar as características geológicas, mineralógicas e geoquímicas das mineralizações na Mina dos Crespos, Caçapava do Sul, com foco na gênese, distribuição e controle estrutural do cobre e sua relação com as rochas vulcânicas presentes na área, especialmente aquelas de afinidade alcalina a moderadamente alcalina.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Este estudo tem como objetivo analisar os processos magmáticos, hidrotermais e supergênicos responsáveis pela mobilização e concentração do cobre na Mina dos Crespos, por meio da caracterização detalhada das litologias vulcânicas e vulcanoclásticas presentes na área e da identificação das estruturas que controlam a circulação de fluidos mineralizantes. Para isso, foram elaborados o mapa geológico da área na escala 1:10.000, a descrição petrográfica das principais rochas, a caracterização das zonas de alteração hidrotermal e a integração de dados analíticos provenientes de fluorescência de raios X (FRX). Além disso, foi construído um banco de dados georreferenciado com base em informações de campo, petrográficas e geoquímicas, visando subsidiar a proposição de um modelo preliminar de formação da mineralização de cobre e contribuir para o entendimento dos sistemas vulcano-hidrotermais do Grupo Santa Bárbara, fortalecendo a base científica para futuras pesquisas e para a avaliação do potencial mineral da região.

### 3. JUSTIFICATIVA

A demanda global por cobre, impulsionada pela expansão de tecnologias da transição energética como veículos elétricos, sistemas de transmissão, turbinas eólicas e eletroeletrônicos, reforça sua importância estratégica para a economia moderna. Nesse cenário, compreender os ambientes geológicos responsáveis pela mobilização, concentração e precipitação de cobre é essencial para o avanço da pesquisa mineral e para novos modelos exploratórios.

A Mina dos Crespos, localizada na região da Bacia do Camaquã e inserida no Grupo Santa Bárbara, apresenta características geológicas propícias à formação de mineralizações hidrotermais de cobre, relacionadas à circulação de fluidos em rochas vulcânicas, como riolitos e basaltos. A presença de estruturas vulcano-hidrotermais preservadas, associadas a eventos magmáticos e tectônicos registrados na região, reforça o potencial metalogenético local.

As mineralizações descritas para o Grupo Santa Bárbara evidenciam a relevância da Bacia do Camaquã como província metalogenética, com destaque para a ocorrência de depósitos vulcânico-hidrotermais de cobre (Borba, 2006; Lopes, 2011; Simch, 2019). A extração de metais nessa região possui histórico significativo, o que motivou o desenvolvimento de estudos voltados à compreensão das condições tectônicas, magmáticas e hidrotermais responsáveis por esses depósitos. Ainda assim, observa-se que a Mina dos Crespos permanece pouco estudada sob a perspectiva petrográfica e geoquímica, o que destaca a necessidade de investigações mais detalhadas.

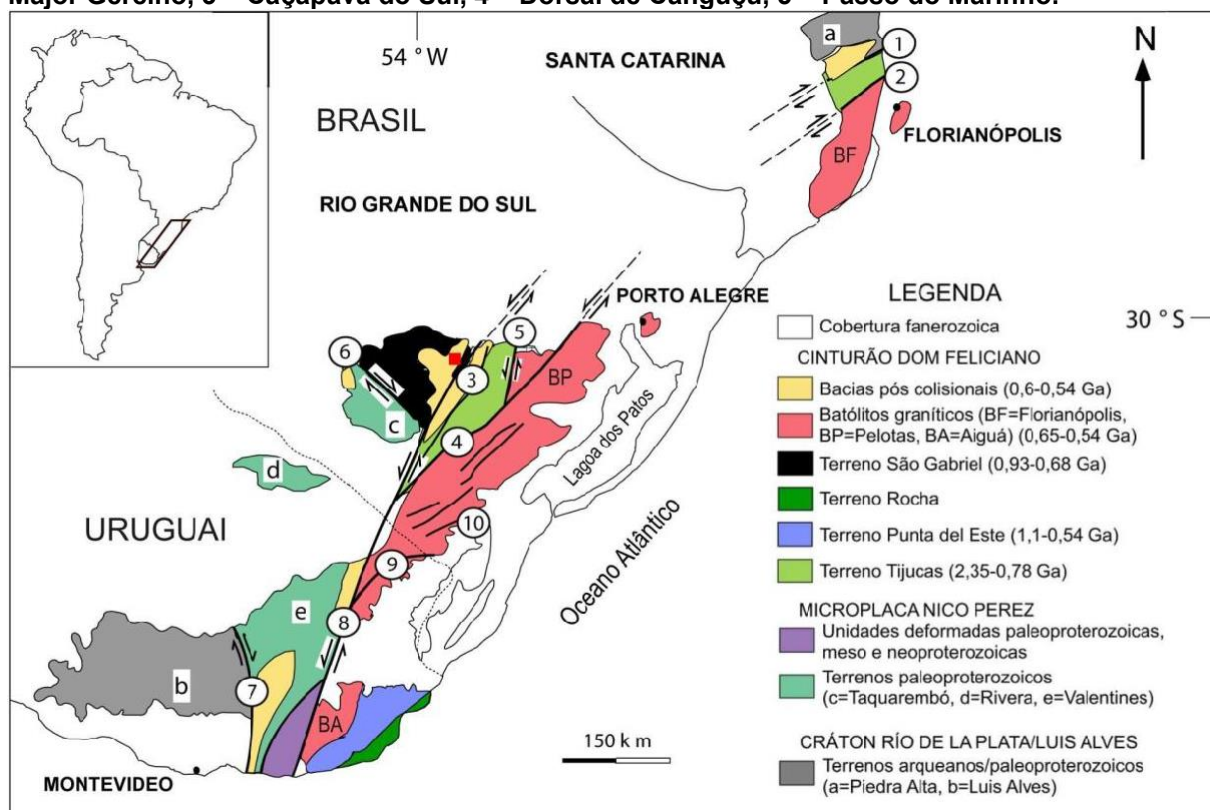
Além disso, a proximidade da área com o campus da Unipampa – instituição equipada com laboratórios e infraestrutura voltada às geociências – favorece a execução deste trabalho, oferecendo suporte técnico e científico adequado para estudos em petrografia, geoquímica e metalogênese. A experiência acumulada em projetos de pesquisa desenvolvidos na região fortalece a viabilidade deste estudo, permitindo analisar de forma integrada a evolução magmática, os processos hidrotermais e os controles estruturais associados às mineralizações de cobre. Assim, o presente estudo justifica-se pela importância científica de compreender os processos vulcano-hidrotermais responsáveis pelo enriquecimento de cobre na Bacia do Camaquã, bem como por seu potencial econômico, considerando o crescente interesse global por fontes seguras e sustentáveis desse metal estratégico.

## 4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL

### 4.1 Escudo Sul-Rio-grandense

O Escudo Sul-Rio-grandense (ESRG) é descrito por Hartmann, Chemale e Philipp (2007) como o produto de processos de geração e deformação da crosta continental ocorridos durante dois ciclos orogênicos: o Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e o Brasileiro-Panafricano (900-535 Ma). Esse escudo pode ser subdividido em quatro unidades tectono-estratigráficas, que possuem características geológicas, geoquímicas, estruturais e geotectônicas específicas. Essas unidades, representadas na Figura 2, incluem o Terreno São Gabriel, o Terreno Tijucas, o Batólito Pelotas e o Bloco Taquarembó (Philipp *et al.*, 2016).

**Figura 2: Mapa geológico dos Escudos do Sul do Brasil e do Uruguai. A seta vermelha indica a área de estudo. Zonas de cisalhamento dúcteis numeradas na região: 1 – Itajaí-Perimbó, 2 – Major Gercino, 3 – Caçapava do Sul, 4 – Dorsal de Canguçu, 5 – Passo do Marinho.**



**Fonte:** Philipp, Pimentel e Chemale (2016), adaptado pela autora.

Os domínios geotectônicos do Batólito Pelotas (a Leste), Tijucas (no centro) e São Gabriel (a oeste) formam o Cinturão Dom Feliciano. Esse cinturão apresenta uma

estrutura alongada na direção NE-SW, resultante da colisão entre os crátons Rio de La Plata, Congo e Kalahari durante o Neoproterozoico (Philipp *et al.*, 2016). O Bloco Taquarembó, situado na porção sudoeste do escudo, compreende fragmentos da microplaca Nico Perez, com rochas de idade Paleoproterozoica, originado, portanto, durante o ciclo Transamazônico (Hartmann; Júnior; Philipp, 2007).

## 4.2 Bacia do Camaquã

A Bacia do Camaquã (BC) é constituída por sequências vulcano-sedimentares geradas a partir da deposição de diversas bacias independentes, que se sobrepuseram nos estágios finais do Ciclo Brasileiro, entre 650 e 540 Ma (Fragoso Cesar *et al.*, 2003; Borba, 2006; Paim; Chemale; Wildner, 2014). Sua evolução tectônica está vinculada a um sistema de riftes intracontinentais anorogênicos com orientação predominante NNE-SSW. O desenvolvimento tectono-sedimentar da BC foi influenciado pela elevação de altos estruturais do embasamento, como o Alto de Caçapava do Sul e a Serra das Encantadas. Essas estruturas são limitadas por um conjunto de falhas com direção NNE-SSW e mergulho acentuado, além de zonas de falha originadas em um contexto extensional e posteriormente reativadas por movimentos transcorrentes.

De maneira geral, a sucessão registra uma deformação que diminui da base para o topo (Paim *et al.* 2000), com as unidades mais antigas (grupos Maricá e Bom Jardim) apresentando dobras moderadamente apertadas associadas a falhas transcorrentes, inversas e de empurrão. Isso sugere um ambiente dúctil-rúptil em um contexto compressivo ou transpressivo.

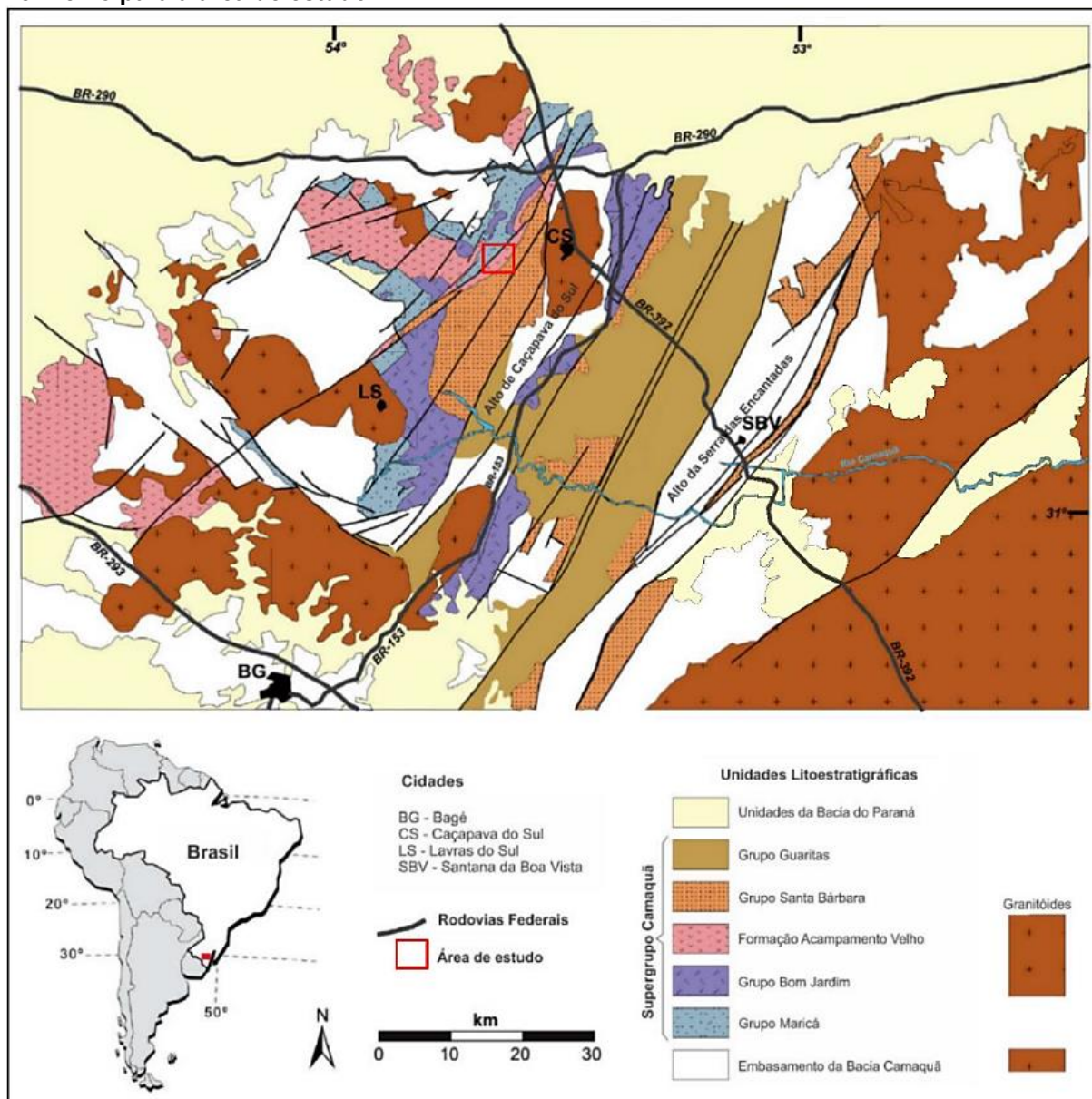
Essas unidades apresentam dobras amplas e suaves associadas a falhas transcorrentes e normais geradas em um ambiente rúptil transtraccional. Essa tendência também é refletida nos ambientes deposicionais, com uma gradual continentalização e interiorização da BC, partindo de um contexto marinho (Grupo Maricá), passando para lacustre profundo (Grupo Bom Jardim), fluvial e lacustre raso (Grupo Santa Bárbara) e culminando em eólico, aluvial e lacustre raso (Grupo Guaritas) (Chemale Jr., 1993; Paim *et al.* 2000).

Três grandes episódios magmáticos são destacados, e relacionados aos estágios tardi e pós-colisionais da Orogenia Brasileira (Wildner *et al.*, 2002; Lima *et al.*, 2007). O primeiro episódio inicia com uma série calcialcalina de alto-K a

shoshonítica (vulcanismo Hilário), seguida por magmatismo alcalino a peralcalino sódico, o que indica uma crescente estabilização da crosta (vulcanismo Acampamento Velho), sendo finalmente substituída por magmas mantélicos básicos alcalinos (vulcanismo Rodeio Velho), originados da base da crosta recém-formada durante a última fase distensiva, marcando o fim da sedimentação continental (Wildner *et al.*, 2008).

A Bacia do Camaquã foi analisada sob diferentes perspectivas à medida que o entendimento sobre suas unidades evoluiu. A Figura 3 apresenta um mapa geológico da bacia, elaborado a partir de dados compilados de estudos anteriores, no qual estão representadas as principais unidades estratigráficas.

Figura 3: Mapa geológico das unidades que compõem a Bacia do Camaquã. Destaque em vermelho para a área de estudo.



Fonte: Almeida (2005), adaptado pela autora.

O Grupo Maricá, localizado na parte inferior da Bacia do Camaquã, apresenta uma discordância angular em relação ao Grupo Bom Jardim (Paim; Chemale; Wildner, 2014). De acordo com Borba *et al.* (2008), a datação por U-Pb de seixos de rocha piroclástica da unidade superior do grupo forneceu uma idade de  $630,2 \pm 3,4$  Ma, enquanto Almeida, Lima e Philipp (2012) obtiveram uma idade de  $601 \pm 13$  Ma por U-Pb a partir de zircões encontrados em arenitos. Seguindo a classificação de Pelosi e Fragoso-Cesar (2003), o Grupo Maricá é subdividido nas seguintes formações: (i) Passo da Promessa (inferior), considerada como um ambiente fluvial entrelaçado; (ii) São Rafael, caracterizada como um ambiente marinho; e (iii) Arroio América

(superior), que é vista como um ambiente fluvial (Borba *et al.*, 2008). Além disso, as rochas desse grupo são cortadas por rochas vulcânicas pertencentes aos Grupos Bom Jardim e Acampamento Velho (Fambrini, 2003; Borba; Maraschin; Mizusaki, 2007), representando uma bacia de antepaís de retroarco (Paim; Chemale; Wildner, 2014).

O Grupo Bom Jardim é delimitado por duas discordâncias angulares: uma na base, em relação ao Grupo Maricá, e outra no topo, com a Formação Acampamento Velho (Almeida; Lima; Philipp, 2012). As rochas vulcânicas dessa unidade, associadas à Formação Hilário, foram datadas pelo método U-Pb, resultando em uma idade de  $590,5 \pm 5,7$  Ma (Janikian *et al.*, 2004).

Já a datação realizada por Almeida, Lima e Philipp (2012), a partir de amostras de lamprófiros, forneceu uma idade de  $591,8 \pm 3$  Ma. De acordo com Janikian *et al.* (2004), o Grupo Bom Jardim é subdividido nas seguintes formações: (i) Cerro da Angélica (inferior), interpretada como ambientes de leques sublacustres e leques deltaicos; (ii) Hilário (central), composto por rochas vulcânicas basálticas, andesíticas, riolitos e piroclásticas; e (iii) Picada das Graças (superior), associada a ambientes deltaicos e fluviais. A sedimentação do Grupo Bom Jardim ocorreu em uma bacia transcorrente (Paim; Chemale; Wildner, 2014).

A Formação Acampamento Velho (FAV) é marcada por um vulcanismo bimodal, originado em um ambiente subaéreo, com predominância de rochas ácidas (piroclásticas e derrames de riolito) na parte superior e rochas básicas na base (Almeida *et al.*, 2002; Janikian *et al.*, 2004). Diversos estudos geocronológicos foram realizados nas rochas da FAV. Sommer *et al.* (2005) obtiveram uma idade de  $549 \pm 5$  Ma (U-Pb SHRIMP em zircão) para rochas riolíticas hipabissais na região do Platô da Ramada. Na área de Caçapava do Sul, Almeida, Lima e Philipp (2012) dataram zircões de rochas básicas da FAV por U-Pb e obtiveram a idade de  $553 \pm 5$  Ma. Matté *et al.* (2016) registraram idades de até  $574 \pm 7$  Ma por U-Pb para o magmatismo da FAV, posicionando esta unidade como basal no Grupo Santa Bárbara. A FAV apresenta uma discordância angular com as rochas dos Grupos Maricá e Bom Jardim (Janikian *et al.*, 2004), e a deposição das rochas vulcânicas ocorreu em uma bacia extensional do tipo rifte (Paim; Chemale; Wildner, 2014).

O Grupo Santa Bárbara (GSB) apresenta uma discordância angular em relação ao Grupo Bom Jardim e à Formação Acampamento Velho, além de contato tectônico com as rochas do embasamento (Fambrine, 2003). A datação máxima da deposição

do GSB, com base na análise de zircões detríticos de arenitos, foi realizada por Bicca *et al.* (2013), que obtiveram a idade de  $566 \pm 6,9$  Ma por U-Pb. Já Oliveira, Paim e Almeida (2014) determinaram uma idade máxima de  $567,9 \pm 5,9$  Ma, aplicando o mesmo método em siltitos na base do grupo. De acordo com Fambrini, Almeida e Frago Cesar (2005), o Grupo Santa Bárbara é subdividido nas seguintes formações: (i) Estância Santa Fé (inferior), interpretada como sistemas fluviais de rios entrelaçados; (ii) Seival, associada a ambientes marinhos rasos influenciados por marés; (iii) Serra dos Lanceiros, caracterizada por ambientes fluviais com rios entrelaçados; (iv) Arroio Umbu, associada a ambientes lacustres; e (v) Pedra do Segredo (superior), relacionada a ambientes de leques aluviais proximais e rios entrelaçados. A deposição do Grupo Santa Bárbara ocorreu em uma bacia extensional do tipo rifte (Paim; Chemale; Wildner, 2014).

O Grupo Guaritas, que representa a unidade superior do Supergrupo Camaquã, é separado do Grupo Santa Bárbara por uma descontinuidade angular regional. Isso sugere que a deposição do Grupo Guaritas ocorreu durante um evento tectônico distinto, dentro de um novo ciclo de subsidência (Almeida *et al.*, 2009). A pesquisa de Hartmann, Santos e Mcnaughton (2008) obteve uma idade de  $535 \pm 10$  Ma para o grupo, baseada na datação U-Pb de zircões detríticos provenientes de amostras de arenitos na base da Formação Varzinha.

De acordo com Almeida *et al.* (2009), o Grupo Guaritas é subdividido nas seguintes formações: (i) Guarda Velha (inferior), associada a ambientes fluviais dominados por carga de fundo; (ii) Varzinha, relacionada a ambientes de planície de inundação; (iii) Pedra Pintada, interpretada como um ambiente eólico com interdunas; (iv) Pedra das Torrinhas, associada a ambientes de leques aluviais, em continuidade com as formações anteriores; e (v) Serra do Apertado (superior), caracterizada por ambientes de canais fluviais dominados por carga de fundo. A deposição das rochas desse grupo ocorreu em uma bacia extensional do tipo rifte (Paim; Chemale; Wildner, 2014). Associadas a este grupo, ocorrem as rochas vulcânicas do Membro Rodeio Velho (Ribeiro, Bocchi e Figueiredo, 1966), representando o último evento vulcânico registrado na Bacia do Camaquã. Embora estudos como o de Frago-César *et al.* (1999) tratem essas rochas como intrusivas, posteriores ao Grupo Guaritas, e utilizem o termo Suíte Intrusiva Rodeio Velho, Almeida *et al.* (2003) sugerem que as rochas do Membro Rodeio Velho são contemporâneas ao Grupo Guaritas. Além disso, evidências de interação vulcanossedimentar foram destacadas por Petry (2006). A

datação U-Pb realizada por Almeida, Lima e Philipp (2012), utilizando cristais de zircão extraídos de amostras de basalto, resultou em uma idade de  $547 \pm 6,3$  Ma. Os valores cronológicos apresentados para os grupos da BC estão sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Compilação das idades relatadas para os grupos da BC.**

Unidade	Idade	Método	Referência
Rodeio Velho	$547 \pm 6,3$ Ma	U-Pb	Almeida <i>et al.</i> (2012)
Grupo Guaritas	$535 \pm 10$ Ma	U-Pb	Hartmann <i>et al.</i> (2008)
Grupo Santa Bárbara	$567,9 \pm 5,9$ Ma	U-Pb	Oliveira <i>et al.</i> (2014)
	$566 \pm 6,9$ Ma	U-Pb	Bicca <i>et al.</i> (2013)
Formação Acampamento Velho	$574 \pm 7$ Ma	U-Pb	Matté <i>et al.</i> (2016)
	$553 \pm 5$ Ma	U-Pb	Almeida <i>et al.</i> (2012)
	$549 \pm 5$ Ma	U-Pb	Sommer <i>et al.</i> (2005)
Grupo Bom Jardim (Formação Hilário)	$591,8 \pm 3$ Ma	U-Pb	Almeida <i>et al.</i> (2012)
	$590 \pm 5,7$ Ma	U-Pb	Janikian <i>et al.</i> (2008)
Grupo Maricá	$601 \pm 13$ Ma	U-Pb	Almeida <i>et al.</i> (2012)
	$630,2 \pm 3,4$ Ma	U-Pb	Borba <i>et al.</i> (2008)

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Além disso, o magmatismo é importante no contexto da BC, tanto na evolução estratigráfica quanto na geração de sistemas hidrotermais responsáveis por mineralizações metálicas. Estudos mostram que as rochas vulcânicas da região, como diques andesíticos e brechas, estão intensamente alteradas por processos hidrotermais que remodelaram sua composição mineralógica e geraram depósitos economicamente importantes (Almeida; Lima; Philipp, 2012; Simch, 2019).

### 4.3 Serra de Santa Bárbara

A Serra de Santa Bárbara, onde se insere a Mina dos Crespos, apresenta um contexto geológico complexo, já descrito por diversos autores a partir de mapeamentos realizados em diferentes escalas. Esses trabalhos propuseram distintas classificações litológicas, estratigráficas e estruturais, refletindo a diversidade de unidades geológicas presentes na região.

Ribeiro e Carraro (1971), em mapeamento na escala 1:100.000, reconheceram na área as Formações Maricá, Hilário e Santa Bárbara, além do Membro Acampamento Velho, destacando a influência de duas falhas regionais com direção

NE–SW. A Formação Maricá é composta principalmente por arenitos arcoseanos, com intercalações subordinadas de siltitos e grauvacas, ocorrendo de forma restrita no setor sudoeste da área. A Formação Hilário é caracterizada por rochas relacionadas a um intenso vulcanismo andesítico, incluindo derrames, tufos e corpos intrusivos, dispostos preferencialmente segundo a direção NE–SW e apresentando fraturas verticais, com predomínio da orientação N–S. O Membro Acampamento Velho, unidade predominante na área e hospedeira da ocorrência mineral crespos, é constituído por rochas vulcânicas riolíticas intensamente fraturadas, com fraturas verticais de direções N–S e NW–SW. A Formação Santa Bárbara compreende conglomerados, arenitos arcoseanos, siltitos e grauvacas.

Almeida *et al.* (2002) realizaram mapeamento em escala 1:200.000 e identificaram, na área de estudo, rochas das Formações Santa Bárbara e Acampamento Velho, além de falhas verticais e subverticais, predominantemente normais, com direções N–S e NE–SW. Esses autores reconheceram, no Grupo Santa Bárbara, ritmitos da Aloformação Lanceiros e conglomerados da Aloformação Santa Fé, dispostos em uma faixa central orientada NE–SW. Sobre essas unidades ocorrem derrames riolíticos associados à Formação Acampamento Velho.

Fambrini (2003), em mapeamento na escala 1:50.000 da Sub-Bacia Camaquã Ocidental, identificou na área a Formação Acampamento Velho e as Formações Estância Santa Fé e Seival, pertencentes ao Grupo Santa Bárbara. A Formação Acampamento Velho é composta por riolitos porfiríticos e rochas piroclásticas associadas, enquanto a Formação Estância Santa Fé, unidade basal do grupo, é constituída por conglomerados e arenitos estratificados. A Formação Seival é formada por arenitos finos micáceos e siltitos em intercalações rítmicas. Os contatos entre essas unidades são controlados por falhas normais com direções NW–SE e NE–SW.

#### **4.4 Mina dos Crespos**

A ocorrência cuprífera presente na área de estudo foi originalmente descrita por Ribeiro, Bocchi e Figueiredo (1966), que a denominaram “Crespos”. De acordo com esses autores, a mineralização ocorre preenchendo juntas e pequenos filões instalados em rochas vulcânicas. Na região próxima ao local investigado, também são registradas outras ocorrências de cobre, como Silveira, Capão Grande, Vitor Teixeira,

Colônia Santa Bárbara/Pessegueiro e o depósito Charqueadas, todas inseridas no contexto geológico da Bacia do Camaquã (Wildner *et al.*, 2008).

Com base no mapeamento realizado em Caçapava do Sul, Ribeiro, Bocchi e Figueiredo (1966) delimitaram o Polígono Cuprífero de Caçapava do Sul, estabelecendo critérios de prospecção baseados no controle estrutural, estratigráfico e litológico das mineralizações, bem como na recorrente associação com rochas andesíticas. Esses parâmetros tornaram-se fundamentais para orientar estudos posteriores voltados à identificação de novas ocorrências de cobre na região.

As principais mineralizações dessa porção do ESRG, formadas no final do Neoproterozoico, foram classificadas por Laux *et al.* (2021) em três grupos: (i) mineralizações hospedadas em corpos granitoides; (ii) mineralizações associadas a rochas vulcânicas; e (iii) mineralizações situadas em sequências vulcano-sedimentares da Bacia do Camaquã. É nesta última categoria que se insere a área investigada neste trabalho.

Em complemento a esses estudos, a pesquisa de Pires (2023) fornece uma análise mais detalhada das estruturas rúpteis e sua relação com as mineralizações de cobre na Serra de Santa Bárbara, região que inclui a Mina dos Crespos, em Caçapava do Sul. O autor identificou, por meio de sensoriamento remoto e mapeamento geológico-estrutural, um predomínio de lineamentos na direção NE-SW, com a ocorrência mineral de cobre situada em uma zona de alta densidade de lineamentos multidirecionais.

O estudo revela que o fraturamento multidirecional e multitemporal das rochas vulcânicas ácidas e básicas foi fundamental para a deposição do minério, destacando-se as fraturas extensionais N-S como as principais vias de percolação de fluidos mineralizantes. Esses fluidos circulam preferencialmente no contato entre os termos ácidos e básicos da Formação Acampamento Velho, sendo os termos ácidos os mais fraturados o que favoreceu a deposição do cobre (Pires, 2023).

## 5. MINERALIZAÇÕES HIDROTERMAIS E ALCALINAS: COBRE, GEOQUÍMICA E IMPORTÂNCIA METALOGENÉTICA

### 5.1 Rochas Alcalinas e Hidrotermalismo

Rochas alcalinas e hidrotermalismo estão intimamente relacionados em diversos contextos geológicos, especialmente na formação de depósitos minerais. Essas rochas são frequentemente associadas a sistemas hidrotermais, nos quais fluidos quentes e quimicamente ativos circulam através de fraturas, falhas e porosidade primária ou secundária, promovendo reações químicas com as rochas hospedeiras e resultando em processos de alteração mineral (Smith *et al.*, 2017).

O fluido hidrotermal atua como o principal agente de transporte e deposição dos metais, sendo sua composição química, temperatura, pH, estado redox e salinidade fatores determinantes para a mobilidade e precipitação dos elementos metálicos. Em sistemas associados a rochas alcalinas, esses fluidos tendem a apresentar características distintas, como maior enriquecimento em voláteis e metais incompatíveis, além de um caráter químico menos ácido quando comparados aos sistemas hospedados em rochas cálcio-alcalinas. A interação prolongada entre o fluido e a rocha hospedeira promove reações de dissolução e reprecipitação mineral, controlando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal (Reed, 1997; Smith *et al.*, 2017).

Depósitos epitermais hospedados em rochas alcalinas são considerados relativamente raros, porém de elevada importância econômica e científica, uma vez que incluem alguns dos maiores depósitos epitermais do mundo em termos de metal contido. Esses sistemas se destacam pelos altos teores de ouro e por apresentarem associações mineralógicas particulares, distintas daquelas observadas em depósitos hospedados em litologias subalcalinas (Smith *et al.*, 2017).

Os depósitos epitermais de cobre (Cu), formados em ambientes hidrotermais rasos e magmático-hidrotermais, podem se desenvolver em diferentes tipos de rochas hospedeiras. No caso dos sistemas associados a rochas alcalinas, observa-se um controle mais pronunciado das características do fluido hidrotermal sobre a mineralização, em detrimento da composição litológica propriamente dita. Estudos clássicos indicam que esses depósitos tendem a apresentar maior enriquecimento em ouro e teluretos, menor volume de quartzo hidrotermal e desenvolvimento limitado de

alterações ácidas, como as sericíticas e argílicas avançadas, quando comparados aos sistemas formados em rochas cálcio-alcálicas (Richards, 1995; Jensen; Barton, 2000).

A importância da interação fluido-rocha nesses ambientes é evidenciada pelo fato de que a química do fluido é progressivamente modificada à medida que ocorre sua circulação, devido ao tamponamento químico promovido pela rocha hospedeira. Esse processo controla o pH e a estabilidade dos complexos metálicos, influenciando diretamente a precipitação dos sulfetos e óxidos metálicos em níveis rasos da crosta (Reed, 1997). Como resultado, a mineralização tende a concentrar-se em zonas estruturalmente favoráveis, onde a permeabilidade é maior e a interação fluido-rocha é mais intensa.

Essa associação entre rochas alcalinas e mineralizações auríferas é particularmente relevante, considerando que o maior depósito epitermal de ouro conhecido, Ladolam, na Ilha Lihir (Papua Nova Guiné), encontra-se hospedado nesse tipo de rocha (Simmons; Brown, 2006). Além do ouro, esses sistemas são frequentemente enriquecidos em elementos considerados críticos, como telúrio (Te), elementos do grupo da platina (EGP), flúor (F), tungstênio (W) e vanádio (V), refletindo a assinatura geoquímica dos fluidos hidrotermais envolvidos (Kelley; Spry, 2016). A identificação desses enriquecimentos depende da compreensão da geoquímica dos fluidos e da zonação de alteração hidrotermal, que fornecem importantes elementos guia (pathfinders) para prospecção mineral (Smith *et al.*, 2017).

Embora depósitos epitermais sejam mais comumente descritos em rochas subalcalinas, como basaltos e riolitos (Du Bray, 2017), modelos hidrotermais indicam que os processos fundamentais de circulação dos fluidos e as reações água-rocha seguem padrões semelhantes, independentemente da rocha hospedeira. Dessa forma, a gênese desses depósitos é controlada principalmente pela origem, evolução e dinâmica dos fluidos hidrotermais, mais do que pela composição litológica em si (Reed, 1997).

Os depósitos epitermais são tradicionalmente classificados em sistemas de alta e baixa sulfetação. Os sistemas de alta sulfetação são caracterizados por fluidos magmáticos altamente ácidos, ricos em enxofre e cloro, que geram intensa lixiviação e assembléias argílicas avançadas. Em contraste, os sistemas de baixa sulfetação desenvolvem-se a partir de fluidos quase neutros, geralmente tamponados pela interação com a rocha hospedeira, resultando em alterações de caráter mais alcalino (Smith *et al.*, 2017).

Nesse contexto, os depósitos hospedados em rochas alcalinas são geralmente enquadrados como uma subclasse dos depósitos epitermais de baixa sulfetação, devido à semelhança nos padrões de alteração hidrotermal (Richards, 1995; Jensen; Barton, 2000; Kelley; Spry, 2016). Contudo, suas particularidades mineralógicas, geoquímicas e metalogenéticas justificam seu reconhecimento como uma categoria distinta dentro dessa tipologia.

## 5.2 Características Geoquímicas das Rochas Alcalinas

As rochas alcalinas são caracterizadas por um excesso relativo de álcalis (Na e K) em relação à sílica, sendo geralmente subsaturadas em sílica e contendo nefelina normativa ou outros feldspatoides, como nefelina e leucita. Embora representem apenas cerca de 1% do volume total de rochas ígneas, sua mineralogia diversificada é responsável por grande parte da variedade de nomes de rochas ígneas proposta pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) (Pandey *et al.*, 2025).

Esses litotipos ocorrem em diversos cenários tectônicos, incluindo bacias oceânicas, porções continentais, dorsais meso-oceânicas (embora de forma rara), ilhas oceânicas, zonas de subducção, margens continentais e especialmente ambientes rifte. Entre as rochas alcalinas mais comuns destacam-se os basaltos alcalinos, foiditos, tefritos, fonólitos, traquitos e seus equivalentes intrusivos, como lamprófios e carbonatitos. Geoquimicamente, são reconhecidas por concentrações elevadas de elementos incompatíveis, como rubídio (Rb), urânio (U), tório (Th) e potássio (K), em comparação com rochas subalcalinas (Pandey *et al.*, 2025).

As rochas alcalinas distinguem-se também por seus altos teores de sódio (Na) e potássio (K), favorecendo o desenvolvimento de minerais como feldspatoides, piroxênios alcalinos e anfibólios alcalinos. Em composições mais extremas, esses litotipos evoluem para rochas peralcalinas, caracterizadas por razão  $(Na + K)/Al > 1,0$ , e que frequentemente apresentam minerais acessórios típicos desse ambiente. Um fracionamento prolongado pode gerar composições ainda mais diferenciadas, resultando em rochas agpaíticas, definidas por razão  $(Na + K)/Al > 1,2$ , indicando excesso de sódio em relação à nefelina (Elias; Alderton, 2020).

Os magmas alcalinos geralmente se formam em ambientes intracontinentais, a partir de fusões parciais de baixo grau em mantos metassomatizados, podendo sofrer processos de cristalização fracionada ao longo da crosta superior. Esse tipo de

evolução magmática pode originar grandes intrusões estratificadas de nefelina sienito (Elias; Alderton, 2020).

Depósitos economicamente relevantes podem desenvolver-se associados a esses magmas quando certos minerais acessórios atingem teores magmáticos suficientes, embora a diversidade mineralógica típica dessas rochas represente desafios significativos para processos de caracterização e beneficiamento (Goodenough; Wall; Merriman, 2018).

### **5.3 Mineralizações de Cobre no Grupo Santa Bárbara**

As mineralizações de cobre associadas ao Grupo Santa Bárbara apresentam forte controle estrutural, integrado à evolução tectônica da Bacia do Camaquã e aos eventos vulcano-hidrotermais relacionados ao magmatismo félsico e intermediário do Neoproterozoico. Os primeiros estudos estruturais de grande impacto sobre o tema foram conduzidos por Bettencourt (1972), que identificou no distrito mineral das Minas do Camaquã o predomínio de falhamentos transcorrentes de direção NE, associados a sistemas de falhas normais orientadas para NW. Essa configuração estrutural foi interpretada como fundamental para a geração de fraturas que serviram de condutos para a percolação de fluidos mineralizantes, estabelecendo assim os primeiros modelos de controle estrutural das mineralizações na região.

Décadas depois, Santos, Almeida e Fragoso-Cesar (2012) ampliaram essa interpretação ao reconhecerem que as zonas mineralizadas estão vinculadas a um evento tectônico compressional de direção WNW–ESE, responsável pela geração de estruturas rúpteis favoráveis à ascensão e ao aprisionamento de fluidos mineralizantes. Os autores destacaram que as fraturas mineralizadas seguem predominantemente um sistema transcorrente dextral, cuja idade de aproximadamente 530 Ma, obtida por geocronologia U-Pb, indica que essas estruturas são posteriores à deposição do Grupo Guaritas. Essa constatação é importante, pois demonstra que a mineralização é resultado de um pulso hidrotermal tardio, relacionado a reativações tectônicas que ocorreram após o principal ciclo sedimentar da bacia.

Contribuindo para a compreensão da distribuição espacial e morfológica dessas mineralizações, Côrtes (2015) estudou a ocorrência de cobre Capão Grande, situada na porção norte da bacia, na Formação Passo da Promessa, unidade basal

do Grupo Maricá. A partir da integração de dados de sensoriamento remoto, geologia estrutural e geofísica, o autor identificou que a zona de sulfetação apresenta geometria alongada na direção NW–SE, sugerindo que fraturas nessa direção exerceram papel fundamental na localização e no desenvolvimento das ocorrências cupríferas. Esse comportamento estrutural é coerente com regimes distensivos tardios ou com reativações direcionais relacionadas à tectônica do final do Neoproterozoico.

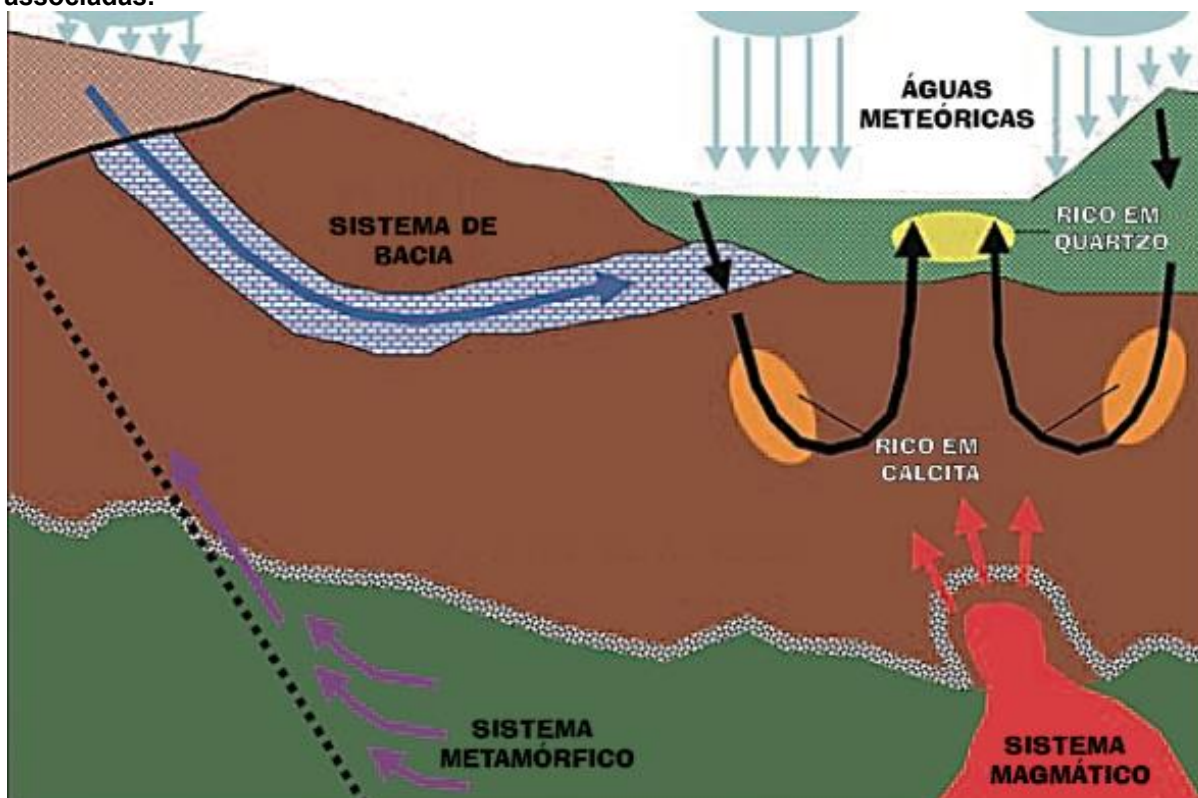
De forma complementar, estudos mais recentes realizados em depósitos cupríferos associados ao Grupo Santa Bárbara (Simch, 2019; Pires, 2023) reforçam a importância de estruturas rúpteis N–S, NE–SW e NW–SE como principais controladoras da circulação de fluidos mineralizantes. Esses trabalhos demonstram que as mineralizações tendem a se concentrar em fraturas abertas, zonas de falha de pequeno rejeito e contatos vulcânicos onde a permeabilidade estrutural foi aumentada por eventos tectônicos sucessivos. A associação entre vulcanismo félsico, eventos hidrotermais e reativações estruturais tardias indica um sistema metalogenético complexo, em que múltiplos pulsos de fluidos atuaram ao longo da evolução tectônica da bacia.

Além disso, as rochas vulcânicas do Grupo Santa Bárbara especialmente riolitos, ignimbritos e tufos ricos em feldspatos apresentam intensa alteração hidrotermal, com desenvolvimento de zonas argílicas, sericíticas e cloríticas, frequentemente descritas em estudos petrográficos e metalogenéticos da região (Nardi; Bitencourt, 2006). Esse padrão de alteração sugere que o sistema hidrotermal responsável pela mineralização foi de médio a alto grau de evolução, compatível com sistemas vulcano-hidrotermais pós-colisionais.

#### **5.4 Hidrotermalismo e Mineralizações Associadas**

A compreensão da origem das concentrações minerais restritas na crosta terrestre e suas conexões com os ambientes nos quais se formam é uma questão que acompanha a história humana e remonta várias décadas no campo da exploração mineral. As mineralizações e o hidrotermalismo associado a elas estão intimamente ligados aos ambientes tectônicos em que se situam, sendo uma ferramenta essencial para investigar os processos físico-químicos desses ambientes (Figura 4). Esses estudos, por sua vez, contribuem para a compreensão da evolução espacial e temporal dos fluidos portadores de metais (Fontana, 2016).

Figura 4: Esquema simplificado ilustrando processos hidrotermais e mineralizações associadas.



Fonte: Kesler (2005).

Como pode-se analisar na imagem acima, os sistemas geotérmicos modernos, que servem como análogos para depósitos epitermais fossilizados, apresentam processos dinâmicos nos quais águas de origem meteórica, após serem aquecidas, reagem quimicamente com rochas vulcânicas. Essa interação promove transformações significativas na composição mineralógica, nos padrões geoquímicos e nas assinaturas isotópicas das rochas, criando marcadores essenciais para a compreensão desses ambientes. Em profundidade, a dinâmica hidrológica é dominada pela ascensão de fluidos salinos ricos em componentes derivados de fontes magmáticas, os quais circulam através de rochas vulcânicas hospedeiras. À medida que esses fluidos atingem zonas mais superficiais, ocorre a predominância de águas menos profundas e de temperaturas mais baixas, estabelecendo um gradiente termal e químico característico (Fontana, 2016).

Anomalias geotérmicas ocorrem em vários contextos tectônicos e geológicos. As intrusões ígneas, que geralmente são a fonte térmica desses sistemas, possuem uma evolução temporal e espacial que influencia a sobreposição de processos que formam pacotes litológicos observados tanto em registros hidrotermais quanto em

sequências vulcano-sedimentares. A interação de águas aquecidas que ascendem por convecção com a rocha hospedeira na crosta superficial transporta e deposita elementos que podem gerar depósitos de Cu-pórfiros e veios epitermais de Au-Ag (Pirajno, 2009).

Algumas condições são essenciais para a ascensão de fluidos quentes: i) pressão hidrostática da rocha e dos fluidos; ii) densidade de fluidos salinos; iii) fluidos finais de cristalização magmática ricos em voláteis (Skinner, 1997). No processo de hidrotermalismo, as reações ocorrem a temperaturas entre 100 e 500 °C, envolvendo uma solução aquosa e as rochas por onde ela circula. A reação hidrotermal ocorre pela troca de cátions entre a rocha e o fluido hidrotermal, com o princípio de neutralidade elétrica. Soluções ácidas, ricas em H<sup>+</sup>, facilitam a remobilização de cátions em comparação com soluções básicas, devido às diferenças de entalpia ( $\Delta H$ ). O controle da temperatura do sistema é crucial, pois influencia as reações de troca e a capacidade do fluido em modificar a composição da rocha hospedeira. Além disso, as relações entre água e rocha deixam uma assinatura isotópica nos sistemas geotérmicos, devido ao fracionamento isotópico nas mudanças de fase.

Sistemas hidrotermais podem ser ativos e atuais, como gêiseres e sistemas geotérmicos associados a vulcanismo em zonas tectonicamente ativas. Estes sistemas podem também representar exposições de sistemas que foram ativos em eras geológicas passadas, evidenciados pela erosão. O nível de profundidade exposto depende de fatores como o tempo geológico e o grau de soerguimento regional. Muitos sistemas hidrotermais fósseis expõem apenas partes profundas, ou seja, suas “raízes”. As alterações hidrotermais geralmente produzem um gradiente mineral, que é um registro tangível das condições físico-químicas nos sistemas epitermais (Mexias, 1990).

O mapeamento das assembleias minerais serve como um guia de prospecção, podendo indicar a posição de depósitos quando combinado com outros indicadores. O estudo dessas zonações minerais ajuda a modelar as condições do processo hidrotermal (Mexias, 1990). De acordo com Bonorino (1959), os halos de alteração podem ser causados por múltiplos pulsos de soluções hidrotermais, que apresentam variações químicas e/ou físicas nos limites frontais. As zonas de alteração se formam simultaneamente a partir de “*fronts*” químicos e físicos, com a migração de soluções das fraturas para as rochas encaixantes, formando “armadilhas” químicas, como diferenças de temperatura, pH, Eh e composição do fluido.

A sequência mineral de alteração hidrotermal, à medida que aumenta a profundidade em um sistema geotérmico, está relacionada à temperatura até o ponto de ebulição e à profundidade pelo conteúdo de gases. Na região bifásica, a perda de vapor de água com CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e outros gases dissolvidos leva ao aumento do pH, promovendo o desenvolvimento de minerais característicos para cada ambiente (Browne e Ellis, 1970), especialmente em zonas de fluxo ascendente. Elders (1977) mostra como a integração de estudos isotópicos e de alteração hidrotermal pode ser usada para desenvolver um modelo de fluxo.

Devido à presença significativa de CO<sub>2</sub> em fluidos geotérmicos e à baixa solubilidade da calcita em altas temperaturas, a atividade de cálcio na solução varia de um sistema para outro. Esse controle, combinado com a variação da atividade de sílica em águas de baixa temperatura, contribui para a grande diversidade de minerais de cálcio encontrados em sistemas geotérmicos. O fator de acúmulo de voláteis é essencial para a formação de depósitos do tipo pórfiro-epitermal, uma vez que o vulcanismo explosivo não está normalmente associado a depósitos de cobre-ouro (Cu-Au) nesses sistemas, já que a maior parte dos gases é perdida durante as erupções piroclásticas, sem ser retida de forma a favorecer a formação de minério (Richards, 2013; Sillitoe, 2010).

## **5.5 Alteração Hidrotermal**

A alteração hidrotermal consiste no conjunto de reações químicas e mineralógicas resultantes da interação entre rochas e fluidos aquecidos, normalmente derivados de sistemas magmáticos ou relacionados à circulação de fluidos em zonas de deformação. Esses processos controlam a redistribuição de elementos químicos e estão intimamente associados à formação de diversos tipos de depósitos minerais metálicos, especialmente os vinculados a ambientes vulcânicos e subvulcânicos (Pirajno, 2009).

Essa alteração hidrotermal ocorre quando fluidos hidrotermais promovem substituição mineral progressiva, controlada pela temperatura, composição do fluido e permeabilidade da rocha. Esses fatores determinam a formação de zonas típicas de alteração, cada qual com associações minerais específicas que refletem a evolução térmica e química do sistema hidrotermal.

A alteração propilítica é uma das mais amplas e características de sistemas hidrotermais magmáticos. Ela é marcada por clorita, epidoto, carbonatos, albita e pirita, e ocorre periféricamente em sistemas de maior temperatura, representando a interação de fluidos magmáticos misturados com águas meteóricas (Pirajno, 2009). A alteração fílica, por sua vez, é caracterizada por quartzo, sericita e pirita e geralmente se desenvolve em zonas de fraturas ou falhas, sob condições mais ácidas e temperaturas intermediárias. Já a alteração argílica reúne minerais como caulinita, esmectita e illita, podendo ocorrer tanto em condições de maior acidez superficial (argílica avançada) quanto em níveis intermediários (argílica intermediária) (Franklin, Gibson; Jonasson, 2005).

Brito, Silva e Kuyumjian (2010) destacam que os sistemas hidrotermais desempenham papel fundamental na formação e modificação dos depósitos de cobre presentes em diferentes províncias metalogenéticas do país, incluindo aqueles associados a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas. Segundo os autores, a atuação de fluidos hidrotermais em ambientes magmáticos neoproterozoicos promoveu o desenvolvimento de zonas de alteração características, como as alterações propilítica, fílica e argílica, que registram a evolução físico-química desses sistemas e a redistribuição dos elementos metálicos. A identificação e análise dessas zonas constituem ferramentas essenciais para compreender os controles estruturais e litológicos que direcionaram a mineralização, permitindo delimitar áreas com maior potencial para a concentração de cobre e outros metais associados. Dessa forma, o estudo das alterações hidrotermais integra etapas decisivas da prospecção mineral, contribuindo para a reconstrução da história mineralizante e para o aprimoramento dos modelos exploratórios em depósitos sulfetados do Brasil.

## **5.6 Importância Econômica e Metalogenética do Cobre**

As mineralizações hidrotermais desempenham um papel central tanto na economia global quanto na compreensão metalogenética dos processos responsáveis pela concentração de metais na crosta terrestre. Entre esses metais, o cobre (Cu) destaca-se pela sua ampla utilização industrial e pela forte relação com sistemas hidrotermais, particularmente aqueles associados ao magmatismo e ao vulcanismo (Kesler, 2005).

Do ponto de vista econômico, o cobre é um metal estratégico amplamente aplicado em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, na construção civil, em componentes eletrônicos e em tecnologias sustentáveis, como turbinas eólicas e veículos elétricos. A maior parte das reservas economicamente exploradas de cobre está associada a depósitos hidrotermais, especialmente os do tipo pórfiro e epitermais, que se formam a partir da circulação de fluidos aquecidos por intrusões magmáticas (Sillitoe, 2010).

No contexto metalogenético, o estudo dessas mineralizações permite compreender os mecanismos de mobilização e deposição do cobre em função da interação entre fluidos mineralizantes e rochas hospedeiras. Variáveis como temperatura, pressão, pH, Eh (potencial redox) e composição química dos fluidos controlam a solubilidade, o transporte e a precipitação do cobre em diferentes níveis da crosta. Assim, a evolução do sistema magmático e a dinâmica dos fluidos hidrotermais determinam a distribuição vertical e horizontal dos depósitos, refletindo condições físico-químicas específicas (Guilbert; Park, 1986).

Dessa forma, as mineralizações hidrotermais associadas ao cobre possuem importância que vai além de seu valor econômico imediato, constituindo registros fundamentais para o entendimento dos processos geológicos responsáveis pela evolução crustal. Essas mineralizações também são essenciais para a construção de modelos preditivos de prospecção, contribuindo para o planejamento sustentável da exploração de recursos minerais críticos para a economia global.

## **6. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.1 Etapa de Aquisição de Dados**

A aquisição de dados representa a fase inicial do presente estudo e tem como finalidade reunir informações fundamentais para o entendimento geológico da área da Mina dos Crespos. Essa etapa compreende a compilação de dados bibliográficos, geológicos, geográficos e logísticos, que servem de base para o planejamento das investigações em campo e das análises laboratoriais subsequentes.

#### **6.1.1 Revisão Bibliográfica**

Durante a execução deste trabalho, foi realizada revisão bibliográfica sobre as mineralizações polimetálicas associadas ao vulcanismo e ao hidrotermalismo, com ênfase nas ocorrências de cobre na região da Mina dos Crespos. Foram analisados dados geológicos da Bacia do Camaquã, com foco nas características das rochas vulcânicas e das estruturas tectônicas que controlam as mineralizações. Além disso, foram investigados estudos relacionados aos processos hidrotermais e às alterações minerais observadas, como zonas propilíticas e argílicas, que são comuns em depósitos de cobre dessa natureza.

A revisão também inclui informações sobre a geologia regional, com a finalidade de obter uma compreensão sobre os processos geológicos que influenciam a formação dessas mineralizações. Essa abordagem permitiu consolidar o conhecimento sobre a Mina dos Crespos e suas características metalogenéticas, auxiliando no entendimento dos mecanismos de formação e evolução dos depósitos minerais associados a sistemas hidrotermais no contexto do Grupo Santa Bárbara.

### **6.2 Etapa de Campo**

Foram realizados três trabalhos de campo, nos dias 20 de abril de 2024, 29 de novembro de 2024 e no dia 14 de abril de 2025 na região da Mina dos Crespos. Como a mina está desativada e não há sondagens em profundidade, a coleta de amostras foi realizada a partir de afloramentos rochosos expostos na área. Focou-se na coleta

de rochas vulcânicas e rochas mineralizadas que ocorrem naturalmente no local, com o intuito de analisar as características das rochas e mineralizações de cobre.

A coleta foi realizada com base na representatividade das amostras que foram estabelecidas no tamanho aproximado de 15x15x15cm para as análises mineralógicas e geoquímicas, buscando entender melhor a composição mineral das rochas aflorantes e suas associações com os veios mineralizados. Esses trabalhos de campo também permitiram uma melhor compreensão da geologia local e dos processos que podem ter influenciado a formação dos depósitos de cobre na região.

### **6.3 Trabalho de Laboratório**

Os trabalhos laboratoriais realizados até o momento foram fundamentais para a organização dos dados e das amostras coletadas em campo, além de possibilitarem a ampliação do volume de informações apresentadas neste estudo. As metodologias aplicadas nesta etapa são variadas, muitas vezes complementares e interligadas. No entanto, para fins de clareza, foram agrupadas em três categorias principais: petrografia e Sistema de Informação Geográfica (SIG).

#### **6.3.1 Petrografia**

A seguir, são apresentados os materiais e os métodos empregados na realização dos trabalhos de petrografia, incluindo a confecção de lâminas delgadas e as descrições petrográficas das amostras de rochas vulcânicas provenientes da região da Mina dos Crespos.

##### **6.3.1.1 Laminação**

As lâminas petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação da Universidade Federal do Pampa. Inicialmente, as amostras são serradas e cortadas em fatias retangulares de aproximadamente 1 cm de espessura, denominadas esquirolas. Em seguida, essas fatias serão desbastadas utilizando-se lixas de diferentes granulções (120, 220, 600, 1.200, 2.500 e 4.000 g) e submetidas a processos de abrasão com abrasivos progressivamente mais finos, à base de carbetto de silício (900  $\mu\text{m}$ ) e óxido de alumínio (9,5  $\mu\text{m}$ ).

O polimento é realizado por meio de politriz, com frequência de 100 rotações por minuto (rpm), durante 5 minutos, utilizando um abrasivo à base de alumina (0,3  $\mu\text{m}$ ). Ao final dessa sequência de procedimentos, a fatia de rocha colada ao vidro atinge a espessura adequada (0,03 mm) para observação ao microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida.

### 6.3.1.2 Descrições Petrográficas

A caracterização petrográfica foi realizada com base na descrição de amostras de mão e lâminas delgadas obtidas durante as atividades de campo deste projeto. A análise das amostras macroscópicas foi conduzida com o auxílio de lupas de mão e de mesa, enquanto a observação das lâminas delgadas é feita por meio de microscópio de luz polarizada da marca Zeiss, modelo Axio Lab A1, no laboratório de microscopia da Universidade Federal do Pampa.

O principal objetivo das descrições petrográficas, em escala macroscópica e microscópica, é a distinção dos diferentes litotipos vulcânicos com base em suas características litológicas, mineralógicas, estruturais e texturais. A identificação e análise dessas feições permitem a interpretação dos processos vulcânicos responsáveis pela formação das rochas, a individualização das fácies e a formulação de uma hipótese sobre o estilo do vulcanismo atuante na área estudada, bem como interpretações preliminares sobre os processos mineralizadores.

### 6.3.2 Sistema de Informações Geográficas

Com base nas informações geológicas obtidas durante o trabalho de campo, por meio da checagem e georreferenciamento dos pontos amostrados, e em dados extraídos da bibliografia existente para a região, foi desenvolvido um banco de dados georreferenciado com o objetivo de elaborar a cartografia digital. A partir desse banco, foram produzidos produtos como o mapa de localização e de pontos, ambos confeccionados na escala (1:10.000). Para a construção do banco de dados e a geração dos mapas, foi utilizado o *software* QGIS (versão 3.38).

#### **6.4 Análise de Fluorescência de Raio X**

Foram realizadas análises por Fluorescência de Raio X (FRX) com o objetivo de identificar e quantificar elementos metálicos, em especial o cobre, nas amostras de sulfeto coletadas em afloramentos da Mina dos Crespos. Devido à granulometria fina e à alteração mineral presente nas rochas, a FRX mostrou-se uma ferramenta eficaz para a caracterização geoquímica dos sulfetos e para a detecção de possíveis minerais de argila associados.

Para as análises, uma pequena porção das amostras mineralizadas foi triturada manualmente em gral de ágata até a obtenção de pó fino homogêneo. O pó resultante foi analisado com um espectrômetro portátil da marca Bruker, modelo S1 TurboSD, utilizando o modo GeoChem General FP, com tempo médio de leitura de aproximadamente 120 segundos. Essa técnica permitiu qualificar teores de cobre, além de elementos associados como ferro, enxofre, níquel, cobalto e zinco, fundamentais para a interpretação dos processos de alteração hidrotermal na área estudada. As análises foram realizadas no Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minério (UNIPAMPA), sob acompanhamento da técnica responsável Angela Fleck.

O uso do método de FRX, especialmente sobre pó de sulfeto, permitiu uma compreensão mais precisa da composição das zonas mineralizadas, complementando as observações de campo e os dados petrográficos, e contribuindo de forma decisiva para a interpretação da mineralização de cobre nas rochas vulcânicas da Mina dos Crespos.

#### **6.5 Etapa de Integração Final**

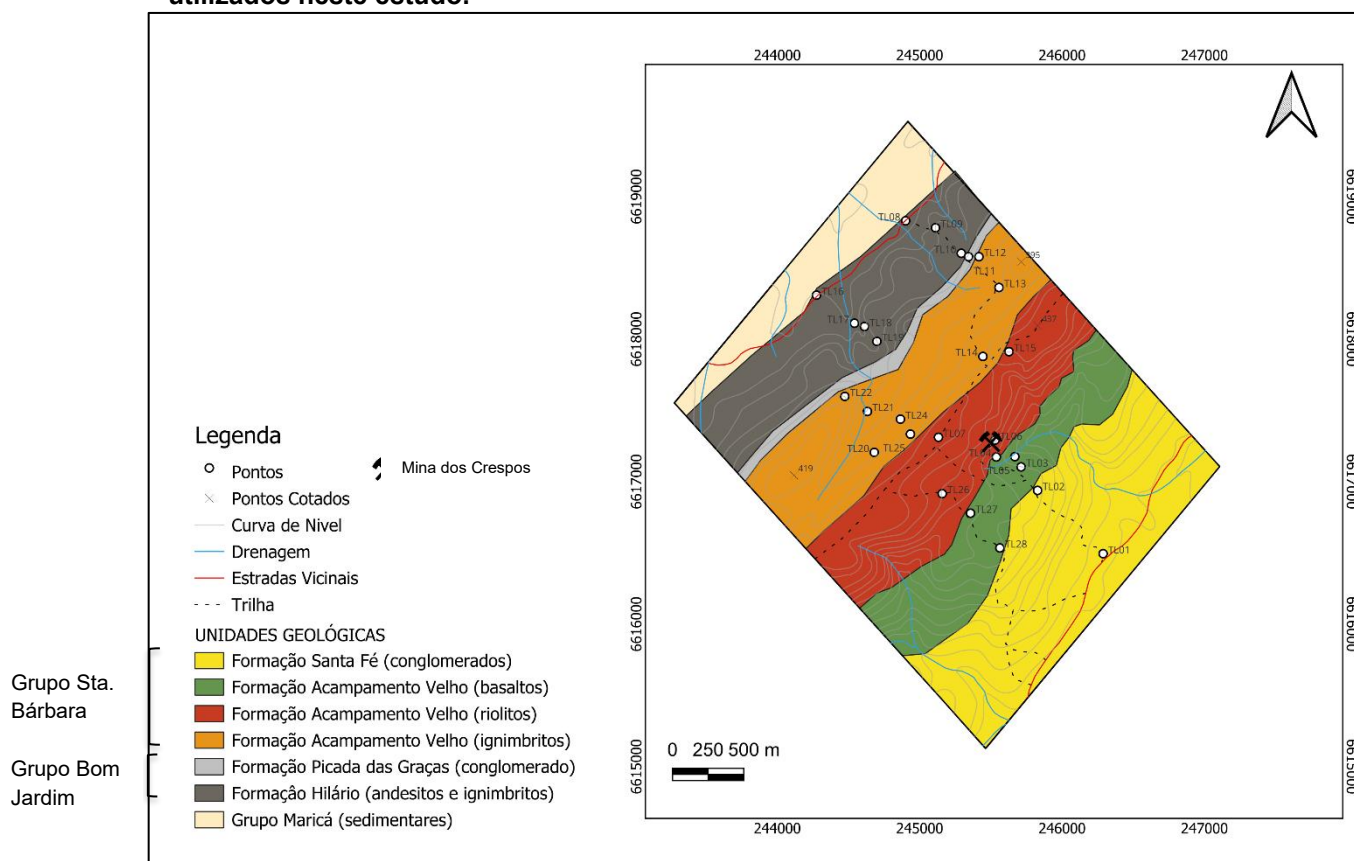
Nesta fase do trabalho, foi realizada a integração dos dados obtidos ao longo da pesquisa, com o objetivo de caracterizar as fácies e as propriedades petrológicas das rochas vulcânicas presentes na região Da Mina dos Crespos. Essa síntese contempla tanto as informações adquiridas em campo quanto as análises petrográficas.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Mapa Geológico

O mapa geológico abaixo apresenta as unidades geológicas identificadas na área da Mina dos Crespos, incluindo as diferentes formações vulcânicas, sedimentares e conglomeráticas. Além disso, são exibidos os pontos de coleta utilizados no estudo, bem como elementos básicos de referência, como drenagens, estradas e curvas de nível. Esse mapa permite visualizar a disposição das unidades mapeadas e a distribuição dos pontos de amostragem dentro da área de estudo (Figura 5).

**Figura 5: Mapa geológico da área de estudo. Mapa mostrando as principais unidades geológicas mapeadas na região da Mina dos Crespos, bem como a localização dos pontos de coleta utilizados neste estudo.**



Fonte: Elaborado pela autora.

## 7.2 Unidades

### 7.2.1 Formação Hilário do Grupo Bom Jardim

Os afloramentos apresentam-se sob a forma de lajeados de coloração marrom, com áreas variando entre aproximadamente 1 m<sup>2</sup> e 10 m<sup>2</sup>. As rochas exibem grau moderado de alteração e estrutura maciça, sem feições estruturais evidentes. Fraturas são comuns ao longo do afloramento, algumas preenchidas por material carbonático, indicando circulação de fluidos pós-deposição. A tonalidade marrom (Figura 6) predominante nas superfícies alteradas reforça o caráter moderadamente intemperizado do material.

**Figura 6: Características do afloramento e da rocha. A) Vista do afloramento na estrada tipo lajeado; B) foto de detalhe do afloramento; C) foto de detalhe da amostra evidenciando a rocha e os púmices; D) zoom do afloramento evidenciando o Lapili Tufo.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Com base na observação macroscópica, sugere-se que parte dos fragmentos presentes correspondam a cristaloclastos de plagioclásio, provavelmente anédricos a

subédricos, de até 1 mm, representando cerca de 20% da rocha. Também se observam pequenos grãos máficos, interpretados como possíveis piroxênios, com dimensões inferiores a 0,5 mm e compondo aproximadamente 2% do volume. A rocha contém ainda litoclastos de rochas vulcânicas, com tamanhos variando entre 2 mm e 2 cm, que correspondem a cerca de 5% e exibem formas angulosas a arredondadas. Fragmentos leves e esverdeados, de aspecto vesiculado, sugerem a presença de púmices, que totalizam cerca de 20% da rocha. A matriz fina, formada por cinza vulcânica, compõe aproximadamente 43% do conjunto.

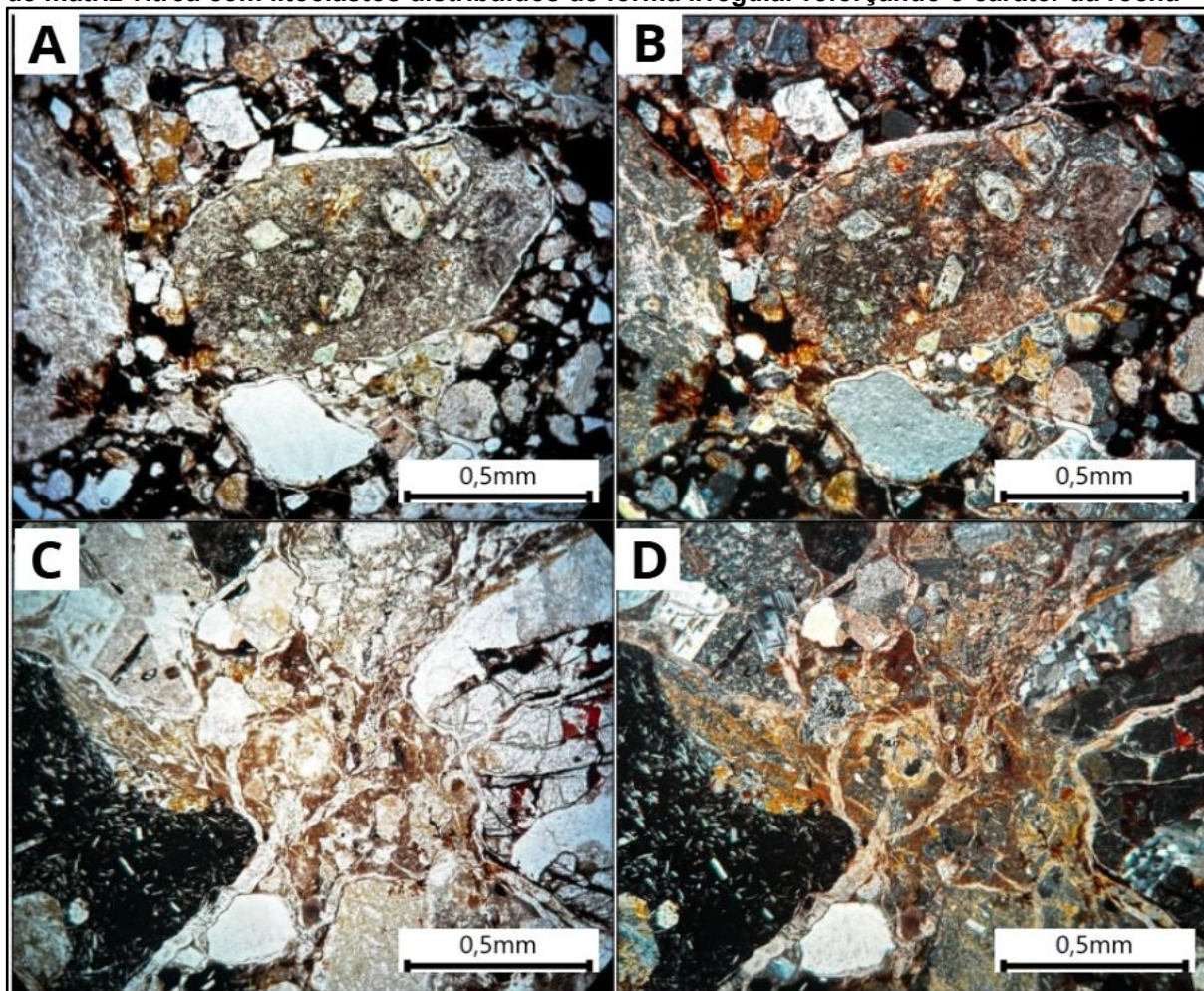
O somatório desses componentes resulta em cerca de 90% da rocha, sendo os 10% restantes atribuídos a materiais não individualizados macroscopicamente, possivelmente constituídos por fragmentos muito finos, minerais acessórios, produtos de alteração ou variações naturais na distribuição do material piroclástico.

Fraturas preenchidas por carbonatos ocorrem em diferentes porções e foram confirmadas pelo teste positivo com HCl 10% a frio. O grau moderado de alteração é notado tanto na matriz quanto nas superfícies expostas. Diante das características estruturais, texturais e composicionais observadas, a rocha é classificada como lapillitufo.

Em descrição micriscópica as rochas apresentam granulação desigual com cristais variando seu tamanho de 0,3 mm a 9 mm. A associação mineral e litológica reconhecível é constituída principalmente por plagioclásios (65%) e em menor quantidade litoclastos de andesito (35%), além de apresentar matriz vítrea e forte sericitização.

Os cristaloclastos de plagioclásios apresentam uma grande heterogeneidade em sua forma, apresentando-se majoritariamente anédrico com cristais pontiagudos similar a estilhaços, com excepcionais cristaloclastos euédricos de formato tabular e raros cristais de formato globular, boa parte dos exemplares apresentam-se com sericitização que por vezes substituiu todo cristal, nos indivíduos menos alterados pode-se observar a presença de macla polissintética. Os litoclastos de andesito apresentam-se com textura porfírica marcada por fenocristais de plagioclásio submilimétricos organizados de forma aleatória, de formatos majoritariamente globulares, com tamanho de no máximo 0,8 mm, segundo mostra a (Figura 7).

**Figura 7: Característica do lapilli-tufo em lâmina, evidenciando a composição e textura. A – (Luz polarizada plana) Porção da lâmina mostrando cristaloclastos de plagioclásio anédricos e estilhaçados, com intensa sericitização, além de litoclastos de andesito porfirítico em matriz vítrea. B – Luz (polarizada cruzada) Mesma porção de A sob luz cruzada, evidenciando maclas polissintéticas nos plagioclásios menos alterados e o contraste entre áreas sericitizadas e litoclastos de andesito. C – (Luz polarizada plana) Outra porção da lâmina com variação granulométrica marcada, plagioclásios parcialmente substituídos por sericita e litoclastos de andesito com textura porfirítica. D – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de C sob luz cruzada, ressaltando a heterogeneidade dos plagioclásios, zonas de sericitização e a presença de matriz vítrea com litoclastos distribuídos de forma irregular reforçando o caráter da rocha**



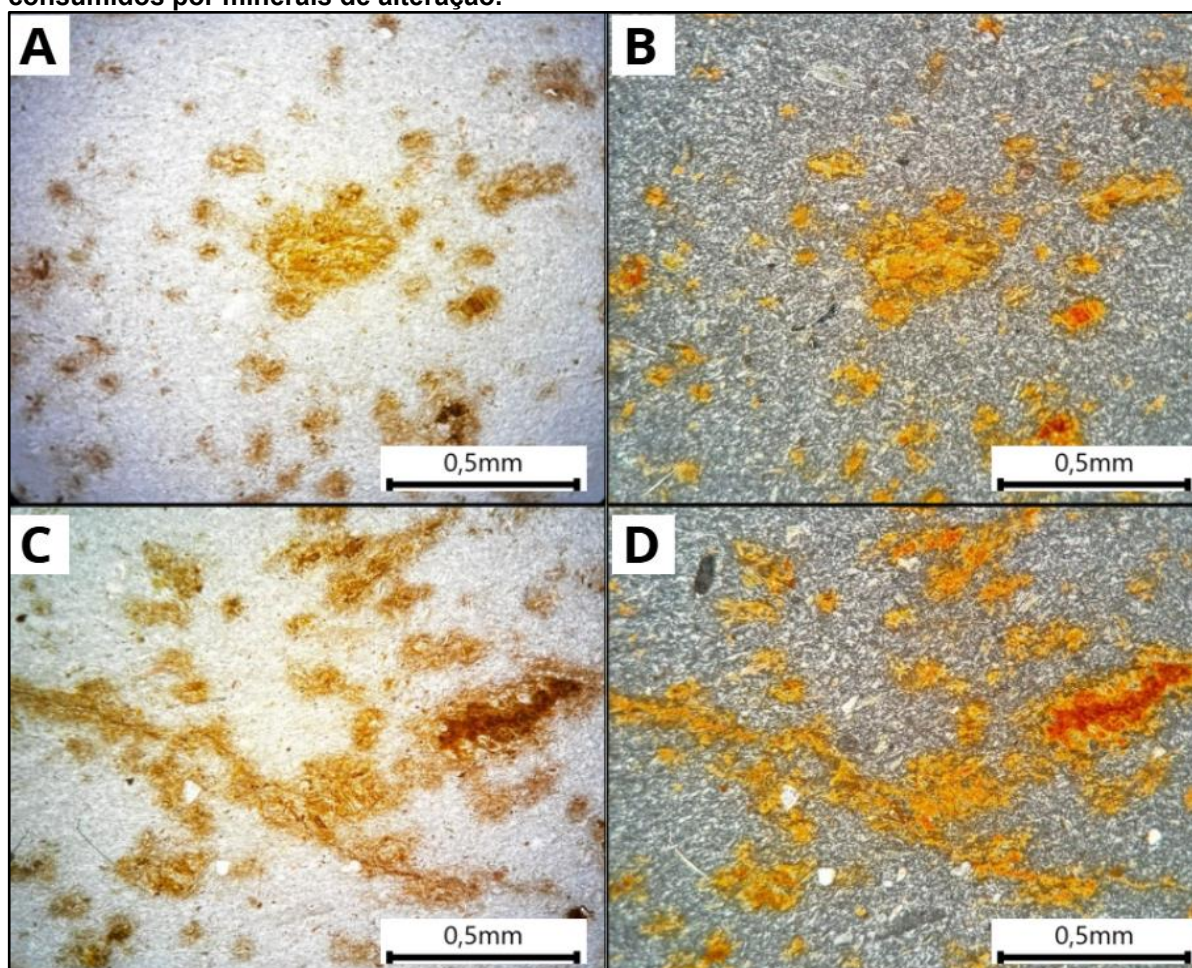
Fonte: Elaborado pela autora.

De maneira geral, tem-se uma rocha maciça com equilibrada variação granulométrica, a disposição dos cristais de plagioclásio não alterados se mescla com as porções sericitizadas, dispostos juntamente aos litoclastos de andesito porfirítico. Dessa forma, baseando-se em (Fisher, 1966), temos um lapilli-tufo de cristais.

Na mesma unidade tem-se rocha de granulação pouco variável com cristais alterando seu tamanho de 0,01 mm a 0,6 mm. A associação mineral reconhecível é constituída basicamente por plagioclásios e minerais de alteração como sericita, com coloração marrom claro e tons ferruginosos.

Os cristaloclastos de plagioclásio apresentam-se majoritariamente anédrico com cristais pontiagudos similares a estilhaços, com cristaloclastos euédricos de formato tabular, com alguns membros apresentando macla polissintética, em sua grande maioria apresentam-se sericitizados, com alguns exemplares apresentando em seu núcleo saussuritização. A sericita aparece tanto substituindo os cristaloclastos de plagioclásio como em agregados apresentando uma leve orientação (Figura 8).

**Figura 8: Características da rocha em lâmina (Tufo de Cristais).** A – (Luz polarizada plana) Porção da lâmina mostrando cristaloclastos de plagioclásio intensamente sericitizados, distribuídos em matriz fina, com agregados ferruginosos e cristais anédricos semelh antes a estilhaços. B – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de A sob luz cruzada, ressaltando a sericitização dominante, cristais de plagioclásio muito alterados e raros indivíduos preservando macla polissintética. C – (Luz polarizada plana) Outra porção da lâmina evidenciando agregados sericíticos levemente orientados e cristaloclastos de plagioclásio com forte alteração, incluindo centros saussuritizados. D – (Luz polarizada cruzada) Mesma porção de C sob luz cruzada, destacando a intensa sericitização, tons ferruginosos e a textura definida por plagioclásios altamente consumidos por minerais de alteração.



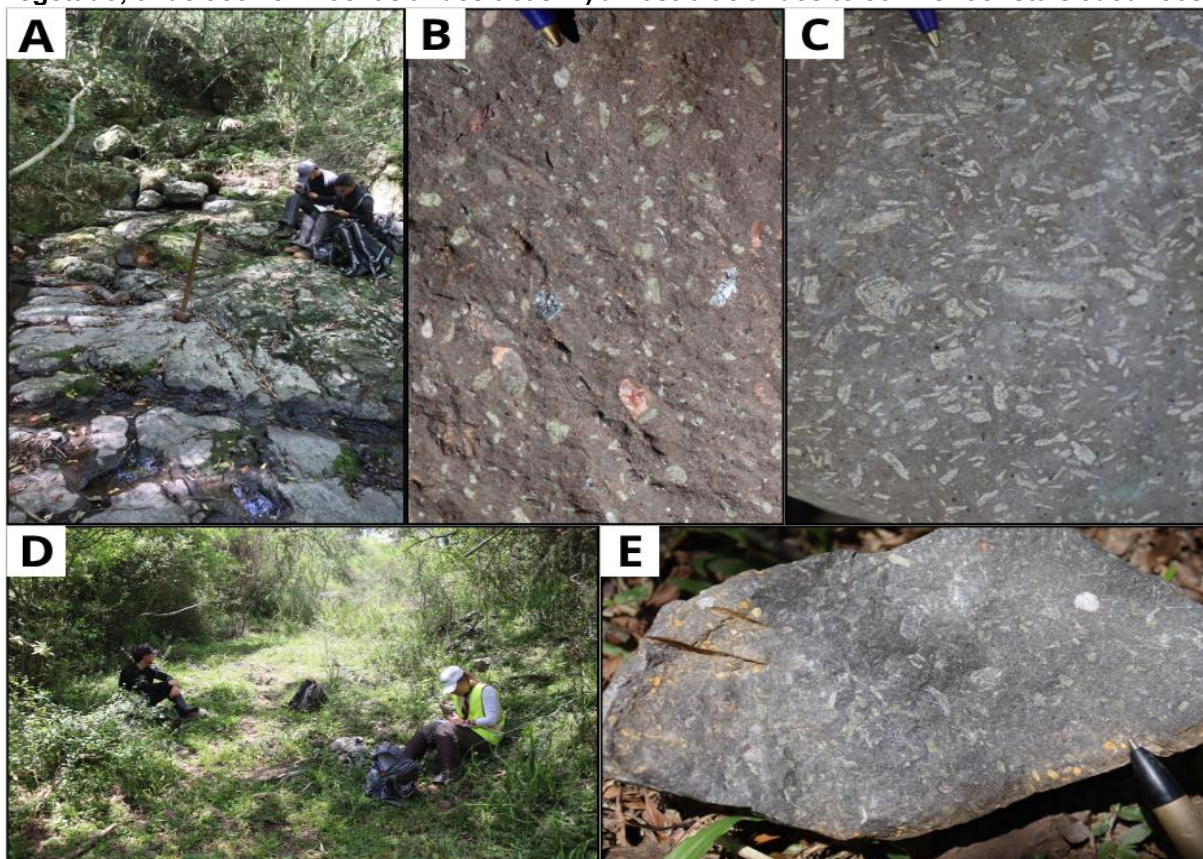
Fonte: Elaborado pela autora.

De maneira geral, tem-se uma rocha composta por cristaloclastos de plagioclásio altamente sericitizados. Desta maneira, baseando-se em (Fisher, 1966) tem-se um tufo de cristais.

### 7.2.2 Formação Hilário do Grupo Bom Jardim

O afloramento ocorre sob a forma de lajeados (Figura 9) com dimensões entre 1 e 7 metros, apresentando uma face alterada de coloração marrom, enquanto a face fresca exhibe coloração cinza. Embora a alteração superficial esteja presente, a composição mineralógica permanece bem preservada, indicando baixo grau de alteração. A rocha apresenta textura inequigranular porfirítica, marcada pela presença de cristais maiores imersos em uma matriz fina.

**Figura 9: Afloramentos e amostras de andesitos coletados, mostrando variações de textura, estrutura e mineralogia. A) Afloramento de andesito em leito de córrego, com fraturas e exposição contínua da rocha; B) andesito porfirítico com fenocristais subédricos a e uédricos de plagioclásio imersos em matriz fina de cor escura; C) amostra de andesito com textura porfirítica, apresentando fenocristais de plagioclásio bem visíveis, distribuídos em matriz afanítica; D) registro de atividade de campo durante descrição de afloramento em ambiente vegetado, onde ocorrem rochas andesíticas. E) amostra de andesito com fenocristais euédricos.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Os plagioclásios constituem duas populações texturais distintas. A primeira corresponde aos fenocristais, que representam cerca de 5% da amostra. Esses cristais possuem hábito tabular, variam de subédricos a euédricos e apresentam dimensões entre 0,2 e 1,0 cm. Sua orientação preferencial confere à rocha uma textura traquítica, e, em algumas porções, esses plagioclásios ocorrem como oikocristais contendo inclusões de anfibólio de até 1 mm. A segunda população corresponde aos plagioclásios presentes na matriz, que são menores, finos e ocorrem de forma mais milimétrica, totalizando cerca de 25% do volume da rocha. Essa fração está parcialmente cloritizada, indicando a ação de processos de alteração secundária principalmente na porção mais fina e suscetível da rocha.

Os minerais máficos estão representados por anfibólio, que compõe aproximadamente 5% da amostra, com hábito prismático, variando de anédrico a subédrico, e dimensões de até 1 mm. A matriz fina, afanítica, constitui cerca de 65% do volume total e sustenta as populações de cristais. Observam-se ainda fraturas preenchidas por hematita, além da ocorrência dispersa de sulfetos ao longo da matriz.

Considerando o conjunto das características texturais, mineralógicas e estruturais observadas, a rocha é classificada como andesito porfirítico. Rocha de textura porfirítica, caracterizada pela presença de fenocristais de plagioclásio em uma matriz microcristalina a criptocristalina. A rocha apresenta uma heterogeneidade granulométrica e morfológica nos fenocristais, com tamanhos variando de submilimétricos (cerca de 0,5 mm) até indivíduos maiores (próximos a 4 mm). A associação mineral fenocristalina é monominerálica, sendo constituída exclusivamente por plagioclásio.

Os fenocristais de plagioclásio exibem uma ampla variação em sua forma. Observam-se indivíduos euédricos de hábito tabular, com contornos cristalinos bem preservados, coexistindo com cristais subédricos e fragmentos anédricos de contornos irregulares. Com variação de tamanho, e cristais maiores com aproximadamente 1mm frequentemente exibindo macla polissintética bem desenvolvida.

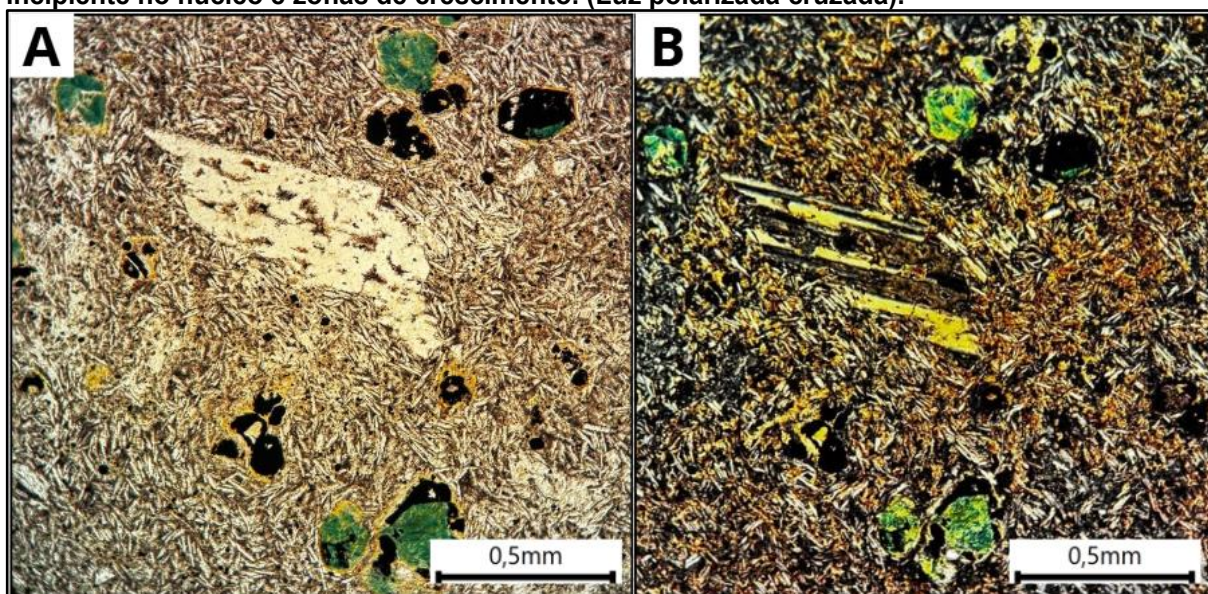
A principal feição de alteração observada é a saussuritização, que afeta o plagioclásio em diferentes graus. Em alguns cristais, a saussuritização é incipiente, manifestando-se como turvação esbranquiçada ou agregados finos de minerais secundários (principalmente epidoto) concentrados no núcleo ou ao longo das zonas de crescimento. Em outros indivíduos, a alteração é intensa, resultando na

substituição quase completa do plagioclásio por um agregado denso de (sericita e epidoto), obscurecendo as feições primárias como as maclas (Figura 10).

A matriz da rocha é de granulação muito fina, tipicamente microcristalina a criptocristalina, composta por microlitos de plagioclásio, minerais máficos (opacos) e material vítreo desvitrificado. A textura da matriz é pilotaxítica ou hialopilítica, dependendo do grau de cristalinidade.

De maneira geral, a rocha é classificada como um andesito porfirítico que sofreu um processo de alteração hidrotermal de baixo grau. A variação morfológica e granulométrica dos fenocristais de plagioclásio sugere um histórico de cristalização complexo, enquanto a presença de saussuritização indica a circulação de fluidos aquosos pós-magmáticos que promoveram a alteração do plagioclásio cálcico.

**Figura 10: Características petrográficas do Andesito Porfirítico. A) Fenocristal de plagioclásio com saussuritização intensa e alteração hidrotermal em matriz microcristalina a. (Luz polarizada Natural). B) Fenocristal de plagioclásio subedrico com macla polissintética e saussuritização incipiente no núcleo e zonas de crescimento. (Luz polarizada cruzada).**



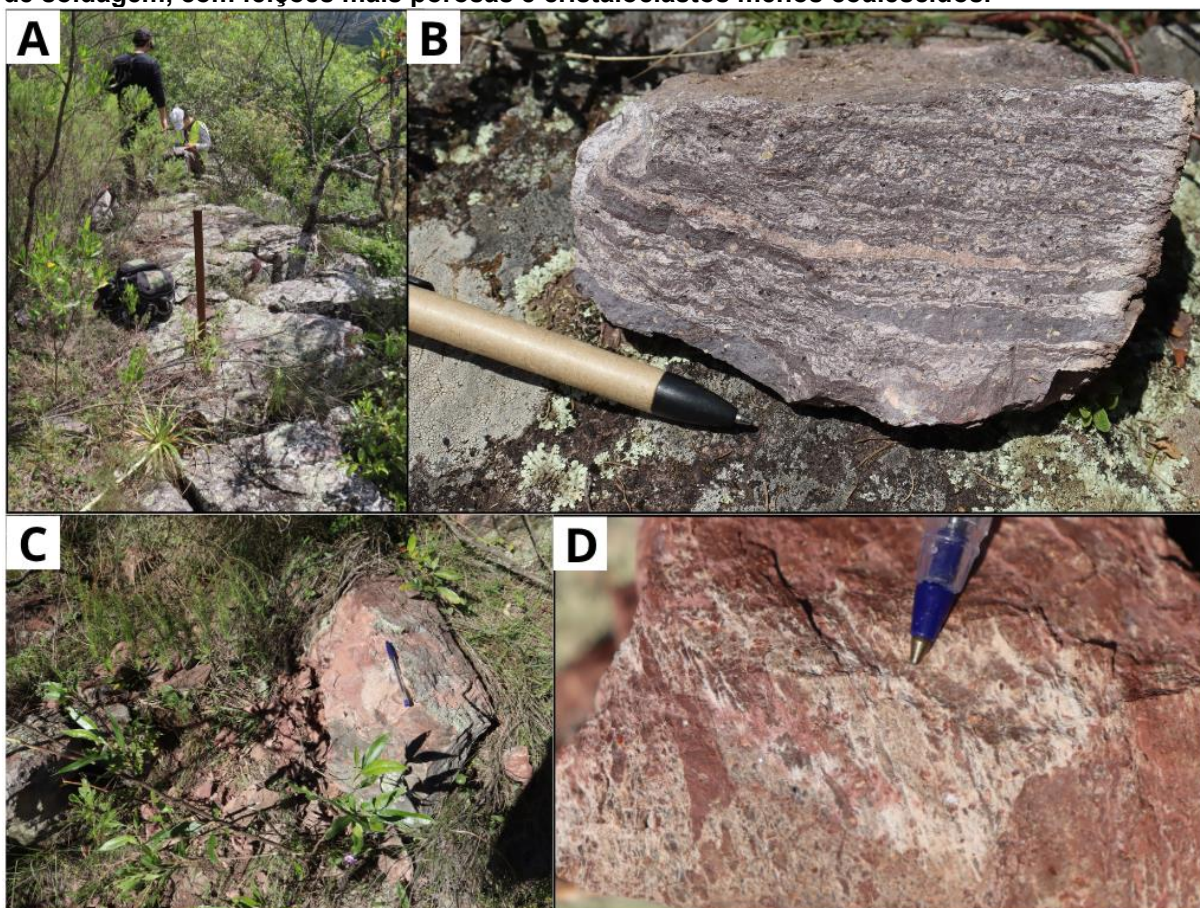
Fonte: Elaborado pela autora.

### 7.2.3 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara

O afloramento (Figura 11), apresenta-se em lajeados e pequenos paredões com até 10 metros de altura, ocupando uma área aproximada de 20 m<sup>2</sup>. A rocha encontra-se pouco alterada, exibindo fraturamento discreto. Sua estrutura é marcada por uma forte orientação interna dos componentes piroclásticos, associada a acamamentos estratigráficos que mergulham para leste. A coloração varia entre tons

de bege e avermelhado, refletindo o baixo grau de alteração e a preservação das feições primárias da rocha.

**Figura 11:** Caracterização do afloramento e das amostras de rocha. A) Vista panorâmica de afloramento com morfologia tipo lajeado; B) amostra evidenciando cristaloclastos de quartzo e feldspato inseridos em matriz com estrutura intensamente soldada; C) afloramento com geometria em blocos destacados; D) amostra apresentando textura relacionada a menor grau de soldagem, com feições mais porosas e cristaloclastos menos coalescidos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A composição mineralógica inclui cristaloclastos de quartzo, que representam cerca de 7% da rocha, com hábito anédrico, translúcido e dimensões entre 1 e 2 mm. O K-feldspato, possivelmente sanidina, também constituindo aproximadamente 7% do volume, ocorre com hábito tabular, variando de anédrico a subédrico, apresentando coloração rosa-salmão, dimensões entre 1 e 4 mm e textura seriada. A matriz é afanítica, possui coloração bege e corresponde a cerca de 26% da amostra, servindo como suporte para os componentes cristalinos.

Os fragmentos pumíceos formam o principal constituinte da rocha, totalizando cerca de 60% da composição. Apresentam colorações que variam entre roxo claro e roxo escuro, com aproximadamente 4 mm de espessura, distribuindo-se de forma

regular ao longo da rocha. A orientação desses púmices e da matriz, bem como a compactação dos componentes piroclásticos, indica intenso processo de soldagem após o depósito do material quente.

Considerando o conjunto de características estruturais, texturais e mineralógicas descritas, a rocha é classificada como ignimbrito eutaxítico densamente soldado.

#### 7.2.4 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara

As rochas vulcânicas ácidas ocorrem na área das Minas dos Crespos (Figura 12), apresentando-se como uma unidade maciça, com coloração predominantemente clara a levemente rosada, característica das rochas vulcânicas félsicas. A textura observada é porfirítica, com fenocristais de plagioclásio bem desenvolvidos e dispersos em uma matriz fina de composição félsica, indicando resfriamento relativamente rápido após extrusão. Em algumas porções dos afloramentos, é possível observar estruturas de fluxo, alinhamento dos cristais e fragmentos alongados, sugerindo movimentação magmática durante a consolidação.

**Figura 12: Afloramento da Mina dos Crespos.**

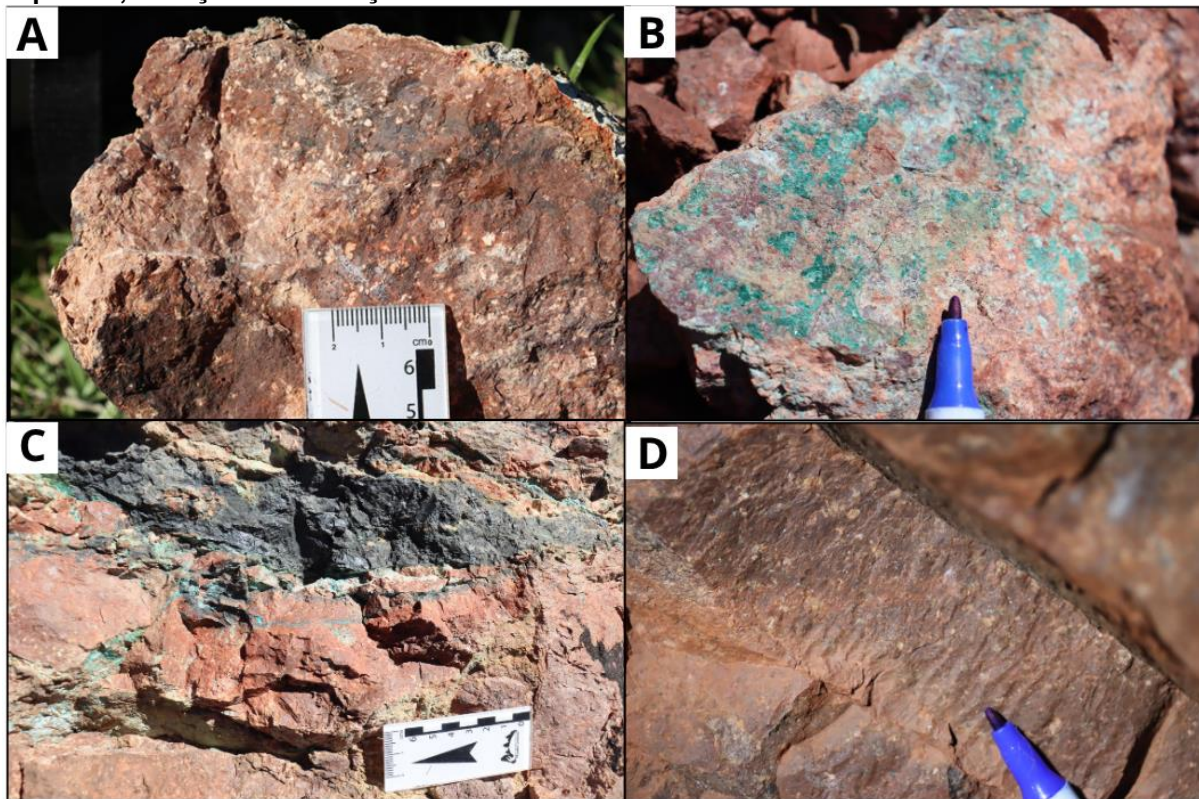


**Fonte:** Elaborado pela autora.

Zonas de alteração hidrotermal são marcadas por coloração esverdeada e esbranquiçada, frequentemente associadas à presença de malaquita, indicando processos de oxidação de cobre. Veios e manchas escuras, interpretados como sulfetos primários (possivelmente calcopirita), ocorrem ao longo de fraturas e superfícies de fluxo, reforçando a associação da rocha à mineralização de cobre.

As amostras analisadas apresentam coloração predominantemente avermelhada, com porções localizadas exibindo tonalidades esverdeadas decorrentes de processos de alteração, embora a rocha, de modo geral, esteja pouco alterada. Trata-se de uma rocha ígnea coerente, maciça, de grau de cristalinidade hipocristalino, composta por uma matriz muito fina de coloração vermelha que corresponde a aproximadamente 50% a 55% do volume total. A textura varia de afanítica a porfirítica, por vezes está marcada pela presença de fenocristais de sanidina (Figura 13 – A e D) que representam entre 25% e 30% da composição da rocha. Esses cristais ocorrem de forma hipidiomórfica, com hábito tabular e dimensões variando em torno de 1 a 3 mm. Os cristais de quartzo, por sua vez, constituem cerca de 20% a 35% das amostras, apresentando-se de maneira predominantemente alotriomórfica e distribuídos de forma esparsa na matriz. O arranjo mineralógico caracteriza-se por uma textura inequigranular do tipo porfirítica, ainda que a matriz em si seja equigranular e muito fina, refletindo um resfriamento relativamente rápido seguido da cristalização de fenocristais em estágios mais precoces.

**Figura 13: Características das rochas vistas em campo. A) riolito com fenocristais de feldspato bem distribuídos na matriz, evidenciando uma textura porfirítica.; B) riolito com presença de malaquita recobrando a superfície da rocha, um indicativo de mineralização secundária de cobre gerada pela alteração; C) destaca-se um veio de sulfeto que corta o riolito, facilmente identificado pela coloração escura contrastante com a matriz clara da rocha hospedeira, sugerindo um episódio de mineralização posterior; D) riolito com fenocristais de feldspato esparsos, reforçando a variação textural observada nas rochas da área de estudo.**



Fonte: Elaborado pela autora.

A rocha é leucocrática, com baixo índice de minerais máficos, o que reforça sua composição ácida. Durante o estudo macroscópico, foram observados veios irregulares preenchidos por sulfetos de brilho metálico cortando a rocha, interpretados como evidências de circulações hidrotermais posteriores à solidificação do riolito, possivelmente responsáveis também pelas porções de alteração de tonalidade verde. A combinação de fenocristais de K-feldspato imersos em matriz afanítica, presença de quartzo anédrico e características estruturais maciças confirmam a classificação da rocha como um riolito porfirítico com evidências de alteração hidrotermal.

Roch de textura porfirítica inequigranular, com fenocristais variando em tamanho de 0,5 mm a 5 mm, imersos em uma matriz microcristalina muito fina. A associação mineral primária reconhecível é composta por K-feldspato, quartzo e plagioclásio subordinado, além de apresentar intensa alteração secundária na matriz e preenchimento de fraturas.

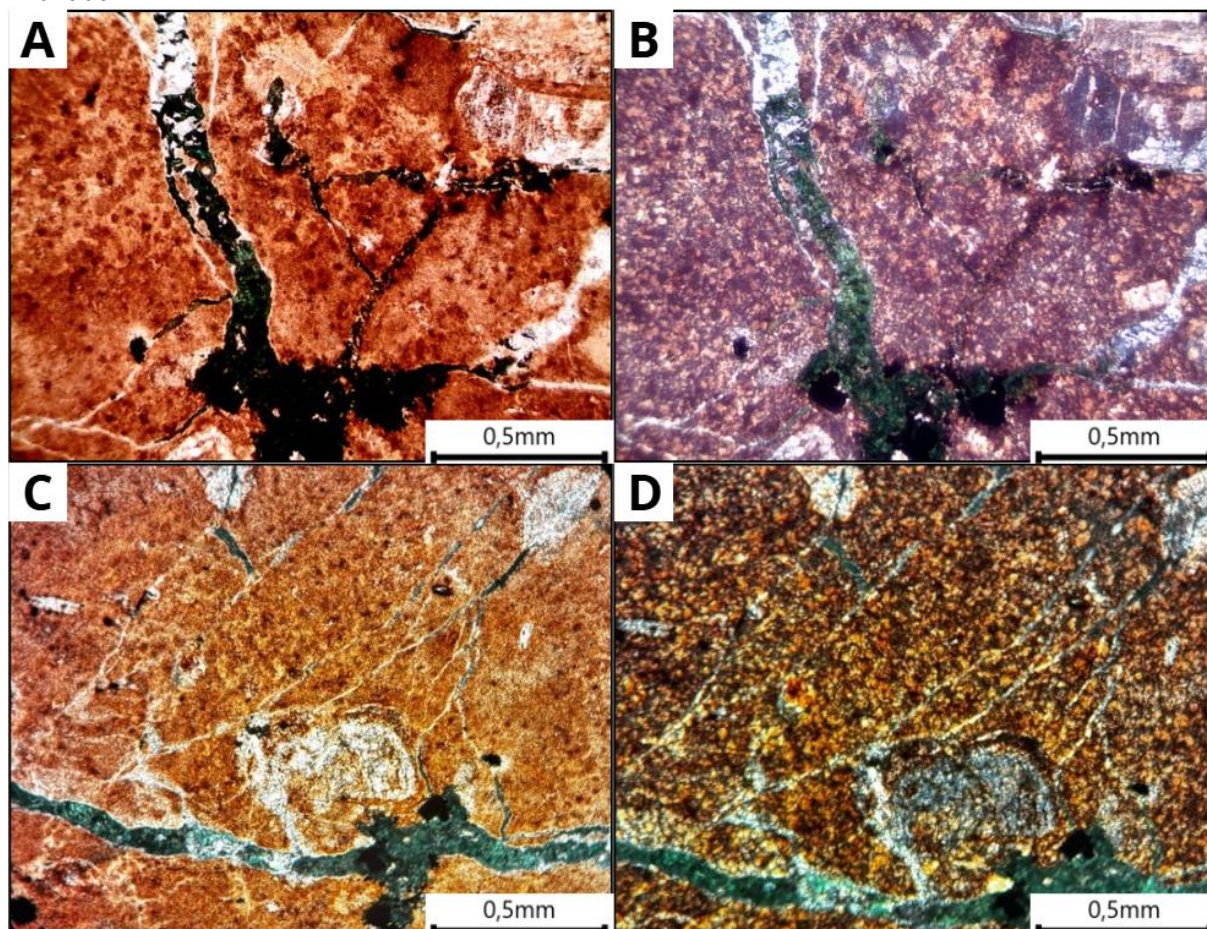
Os fenocristais de sanidina (aproximadamente 40% dos fenocristais) apresentam-se majoritariamente euédricos a subédricos, com hábito tabular e contornos bem definidos. Alguns indivíduos exibem macla de Carlsbad. É notável a presença de pertitas em alguns cristais. A alteração é incipiente, manifestando-se como turvação argilosa leve, mas a maior parte dos exemplares mantém sua integridade estrutural.

Os fenocristais de quartzo (aproximadamente 35% dos fenocristais) são predominantemente anédricos e exibem contornos arredondados ou corroídos. O quartzo é límpido, e frequentemente exhibe extinção ondulante, indicando deformação pós-cristalização. Ocasionalmente, formam agregados policristalinos.

Os fenocristais de plagioclásio (aproximadamente 25% dos fenocristais) são subordinados e apresentam-se como cristais subédricos a raros euédricos, com macla polissintética bem desenvolvida. Diferentemente do K-feldspato, o plagioclásio está fortemente alterado para sericita, com a substituição atingindo a totalidade de muitos indivíduos, obscurecendo completamente as feições primárias.

A matriz da rocha é fortemente oxidada, conferindo uma coloração cinza-avermelhada à lâmina em luz polarizada. A textura original da matriz, provavelmente vítrea ou microgranular, foi obliterada pela intensa oxidação. A rocha apresenta fraturas milimétricas que são preenchidas por malaquita de coloração verde intenso. Essas fraturas são descontínuas e de geometria irregular, a malaquita preenche completamente as fraturas, destacando-se nitidamente contra a matriz oxidada, conforme ilustrado na (Figura 14).

Figura 14: Características da rocha em lâmina, mostrando a textura porfirítica e os processos de alteração. A) Fenocristais de sanidina, imersos em matriz microcristalina intensamente oxidada; fraturas irregulares preenchidas por malaquita a Luz Polarizada Plana. B) Detalhe da fratura principal, evidenciando preenchimento contínuo por malaquita de coloração verde intensa e sua relação com a matriz oxidada a Luz Polarizada Cruzada. C) Textura porfirítica destacando fenocristais de quartzo anédricos e arredondados, alguns formando agregados policristalinos, além do preenchimento hidrotermal das fraturas e em D a Luz Polarizada Cruzada.



Fonte: Elaborado pela autora.

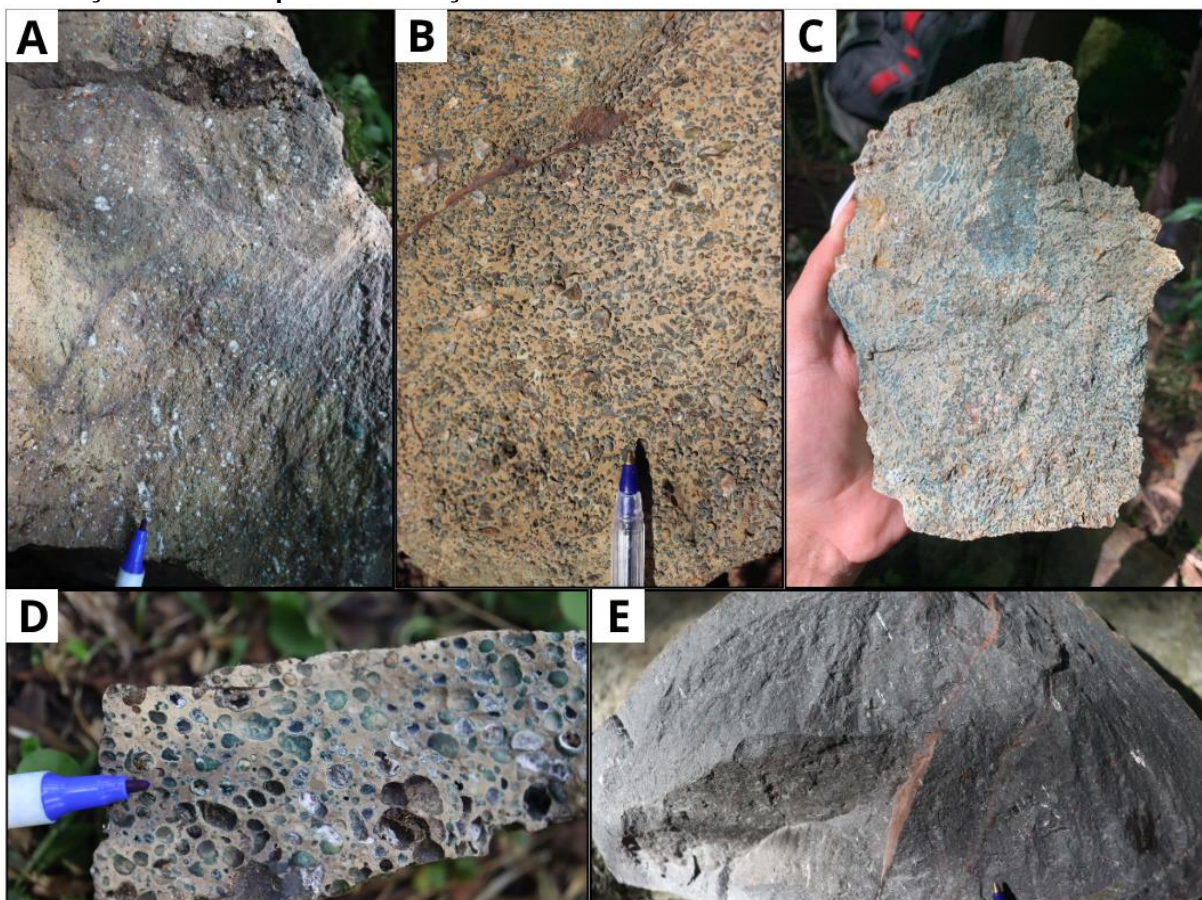
De maneira geral, tem-se uma rocha vulcânica ácida com forte evidência de alteração hidrotermal, onde a textura porfirítica primária é preservada pelos fenocristais mais resistentes (quartzo e sanidina), enquanto o plagioclásio e a matriz sofreram intensa alteração (oxidação).

#### 7.2.5 Formação Acampamento Velho do Grupo Santa Bárbara

Nas amostras estudadas (Figura 15), foram reconhecidas variações marcantes de coloração, estrutura e textura, permitindo a subdivisão do conjunto em dois grupos distintos: Grupo 1 – corresponde a uma rocha, que apresenta coloração escura, variando entre preto e cinza-escuro, além de aspecto homogêneo e estrutura maciça.

A textura é afanítica, evidenciando granulação extremamente fina, característica que indica resfriamento rápido da lava e distingue essas amostras de basaltos porfíricos. A mineralogia é composta predominantemente por piroxênios e plagioclásios, distribuídos em uma matriz microcristalina com proporção significativa de vidro vulcânico, responsável pela aparência compacta e pela impossibilidade de identificação mineralógica a olho nu. A rocha apresenta distribuição equigranular dos minerais e, do ponto de vista de alteração, encontra-se pouco modificada, sem evidências macroscópicas de alteração hidrotermal ou intempérica, preservando sua integridade original.

**Figura 15: Amostras de basaltos vesiculados e maciços coletadas, evidenciando variações texturais e mineralógicas. A) Grupo II - basalto vesicular com vesículas de formato arredondado e distribuição irregular; B) Grupo II - basalto amigdaloidal, com vesículas preenchidas por minerais secundários; C) Grupo II - basalto com alteração hidrotermal evidente, apresentando coloração esverdeada; D) Grupo II - Amostra de basalto evidenciando vesículas e amígdalas bem desenvolvidas; E) Grupo I - basalto maciço, com fratura concoidal e coloração escura; a presença de fraturas preenchidas por minerais secundários de tonalidade avermelhada sugere circulação de fluidos pós-solidificação.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Grupo 2 – Esse grupo inclui amostras, cuja coloração varia do cinza-claro ao cinza-escuro, apresentando tonalidades esverdeadas especialmente nas regiões onde se concentram as amígdalas. A estrutura é marcada pela presença abundante de vesículas arredondadas a subarredondadas, distribuídas irregularmente ao longo da rocha (Figura 15 - D), com dimensões que variam de 0,2 × 0,4 cm a 1,0 × 0,8 cm. Muitas dessas cavidades estão parciais ou totalmente preenchidas por minerais secundários, formando amígdalas de coloração esverdeada e esbranquiçada. Observam-se também amígdalas estiradas, cuja forma alongada indica deformação da rocha ainda em estado parcialmente plástico durante o fluxo da lava. O preenchimento amigdalar é composto por quartzo, celadonita e calcedônia, minerais associados a processos de alteração hidrotermal. O quartzo ocorre com hábito prismático, variando de subédrico a euédrico, com cristais de até 1 mm. A celadonita apresenta coloração verde-escura e hábito globular, com dimensões entre 1 e 4 mm, enquanto a calcedônia exibe hábito fibro-radial, anédrico a subédrico, com espessuras entre 1 e 3 mm. A matriz dessas amostras é fina, composta por minerais primários não discerníveis macroscopicamente, mantendo textura essencialmente afanítica.

Assim, os dois grupos descritos representam variações texturais e estruturais de basaltos associados a diferentes condições de fluxo, resfriamento e atuação posterior de processos hidrotermais, permitindo a distinção entre um basalto maciço pouco alterado e um basalto vesicular-amigdaloidal com alteração hidrotermal.

Rocha de textura porfirítica (figura16), caracterizada pela presença de fenocristais de plagioclásio e piroxênio imersos em uma matriz microcristalina fina. A variação de tamanho dos fenocristais é moderada, variando de 0,1 mm a 1 mm.

A composição dos fenocristais é dominada por plagioclásio e piroxênio. Fenocristais de plagioclásio: apresentam-se com morfologia variada, desde formas pontiagudas (semelhantes a estilhaços) até tabulares. O tamanho varia de 0,1 mm a 0,5 mm. Muitos exemplares exibem sericitização que pode ser parcial ou, em casos mais avançados, total, indicando um processo de alteração hidrotermal.

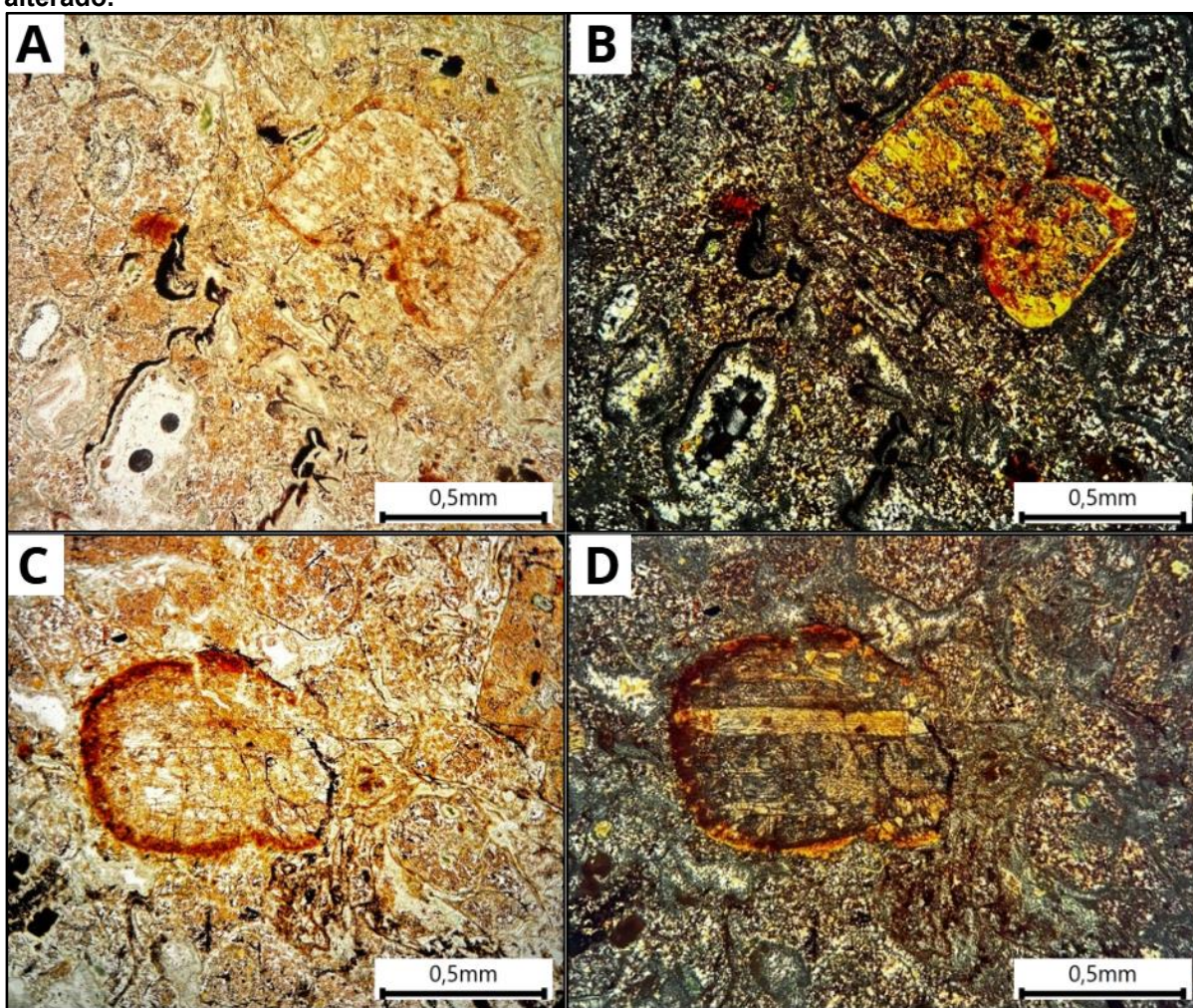
Fenocristais de piroxênio: variam em tamanho de 0,2 mm a 1 mm. A morfologia é predominantemente globular, com raros exemplares tabulares ou de aspecto anédrico. Uma porção significativa desses fenocristais está alterada para um argilomineral de coloração amarelo pálido e clorita.

A matriz é fina e microcristalina, composta primariamente por micrólitos de plagioclásio e minerais máficos finos, característicos de uma rocha vulcânica básica.

Em algumas áreas, a matriz exibe uma coloração avermelhada, sugerindo a presença de material vítreo oxidado.

De maneira geral, a rocha é caracterizada por uma mistura de fenocristais minerais de plagioclásio e piroxênio, com forte evidência de alteração secundária (sericitização e argilomineralização) afetando os fenocristais e a matriz. A textura porfírica e a mineralogia rica em plagioclásio e piroxênio são consistentes com a classificação de um basalto porfírico alterado (Figura 16).

**Figura 16: Características da rocha em lâmina, evidenciando a textura porfírica do basalto. A)** (Luz polarizada plana) Fenocristais de plagioclásio e piroxênio em matriz microcristalina fina, com plagioclásios sericitizados e piroxênios alterados para argilomineral e clorita; matriz com áreas avermelhadas indicando material vítreo oxidado. **B)** (Luz polarizada cruzada) Mesma área de A, mostrando maclas polissintéticas nos plagioclásios, cores de interferência baixas e bom contraste óptico com a matriz. **C)** (Luz polarizada plana) Fenocristal de piroxênio globular parcialmente alterado, com plagioclásios tabulares e matriz microcristalina rica em microlitos; presença de bordas reabsorvidas e fraturas internas. **D)** (Luz polarizada cruzada) Mesma área de C, evidenciando extinção ondulante nos plagioclásios, graus distintos de alteração nos piroxênios e matriz microcristalina típica de basalto porfírico alterado.

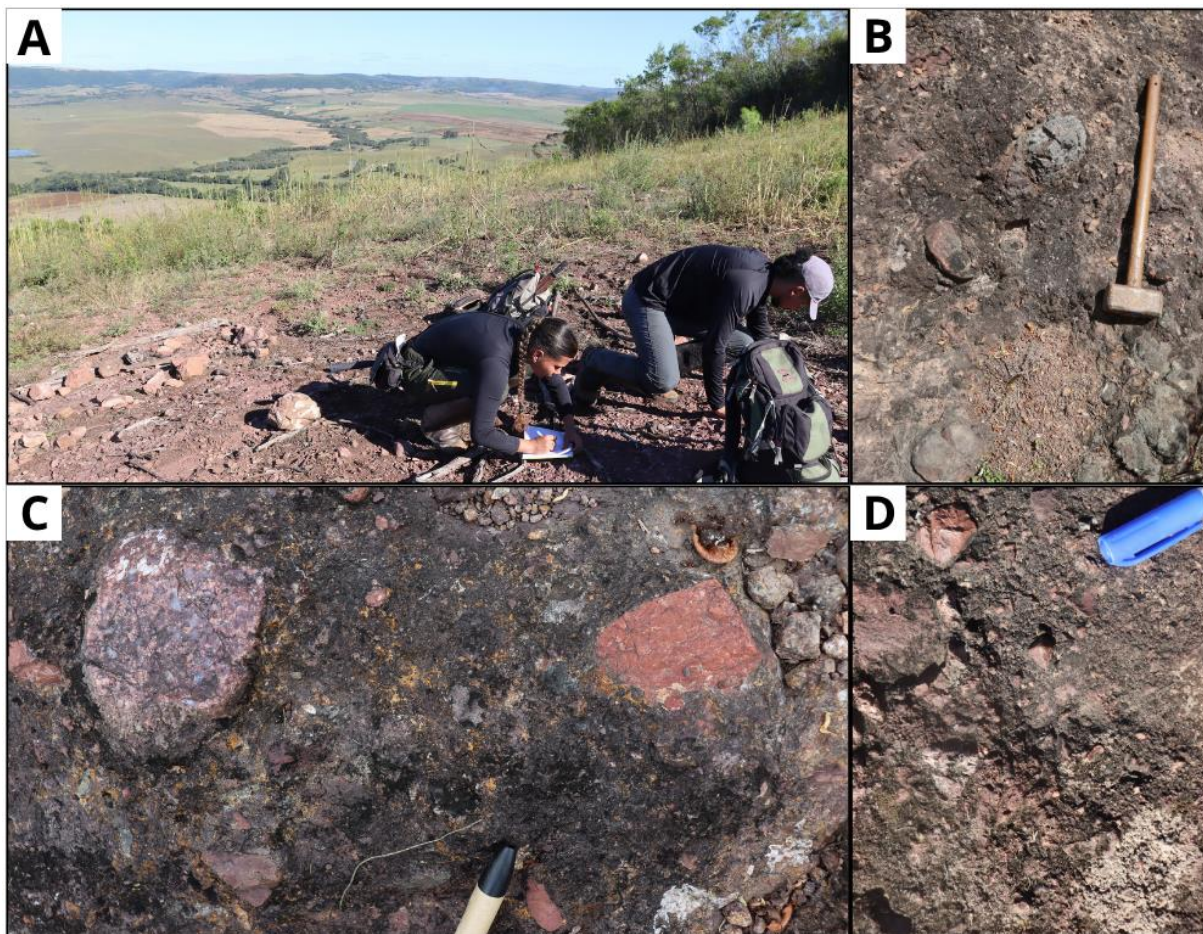


Fonte: Elaborado pela autora.

### 7.2.6 Descrição Geral das Rochas Sedimentares

No flanco leste da Serra de Santa Bárbara ocorrem conglomerados polimíticos (Figura 17), de coloração marrom e pouco alterados. Trata-se de uma rocha sedimentar composta por uma matriz de areia média que representa cerca de 25% da mesma, e por clastos de diferentes tipos: riolito (10%), basalto (10%), granito (30%), arenito (5%), andesito (10%) e piroclásticas (10%). Os clastos variam de grânulos e blocos de subangulosos a subarredondados mal selecionados.

**Figura 17: Características do afloramento e da rocha. A) Vista de afloramento; B) foto de detalhe de afloramento evidenciado clastos em meio a matriz; C) zoom da rocha mostrando clastos polimíticos; D) detalhe da matriz rica em material mais fino e clastos angulos a subarredondados de diversos tamanhos.**



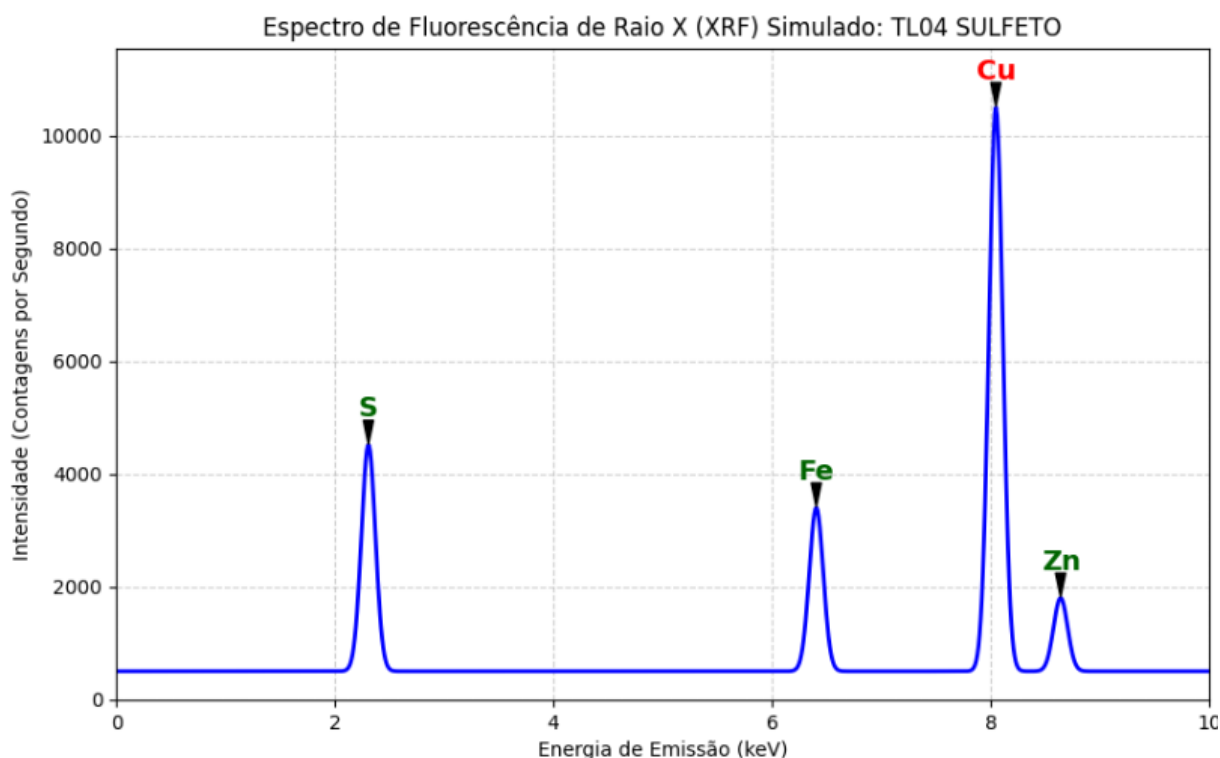
Fonte: Elaborado pela autora.

### 7.3 Análise de Fluorescência de Raio X

A análise da amostra “TL04 SULFETO” por Fluorescência de Raios X, realizada com o equipamento portátil Bruker TurboSD, teve como objetivo determinar sua composição elementar e inferir sua natureza mineralógica. Os resultados indicam que a amostra corresponde a um minério polimetálico, caracterizado pela predominância de elementos associados a minerais sulfetados, compatível com mineralizações de origem hidrotermal.

O espectro XRF simulado (Figura 18) confirma visualmente essa composição, evidenciando picos bem definidos de Cu, S, Fe e Zn, típicos de minérios sulfetados polimetálicos.

**Figura 18: Espectro de Fluorescência de Raios X (XRF) simulado da amostra TL04 SULFETO, evidenciando picos intensos de S, Fe, Cu e Zn.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Cinco elementos concentram aproximadamente 60% da massa total da amostra, com destaque para o cobre (Cu), que apresenta teor médio de 25%, configurando o principal elemento metálico identificado. Essa predominância também é observada no gráfico de concentração dos principais elementos (Figura 20), no qual o cobre se destaca de forma expressiva.

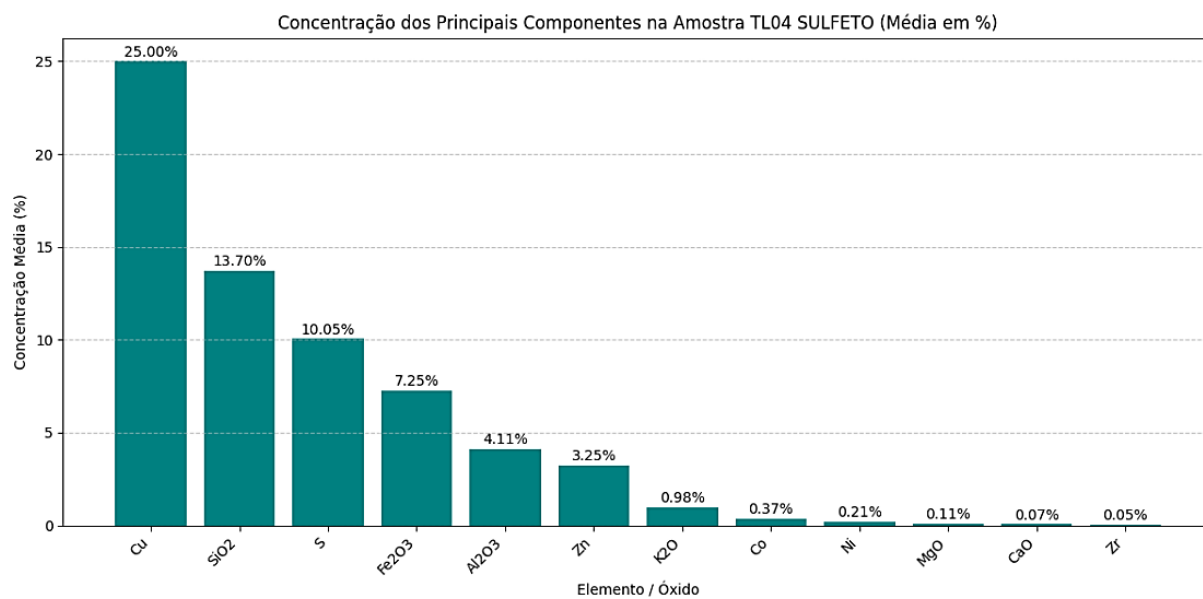
O óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), com teor de 13,70%, representa a ganga silicatada, provavelmente composta majoritariamente por quartzo, comum em rochas vulcânicas alteradas. O enxofre (S), com 10,05%, reforça o caráter sulfetado da amostra, estando associado a minerais como pirita, calcopirita e esfalerita. O teor de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), correspondente a 7,26%, indica a presença significativa de sulfetos de ferro, enquanto o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com 4,11%, sugere a atuação de processos de alteração hidrotermal, especialmente do tipo argílico.

O zinco, com teor de 3,25%, indica a provável presença de esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), mineral comum em sistemas polimetálicos. A interpretação do espectro reforça essas conclusões, uma vez que os picos de Cu, S, Fe e Zn se apresentam intensos e bem definidos, constituindo um padrão típico de minérios sulfetados.

A comparação entre as duas medições realizadas (ID 1 e ID 2) demonstra boa consistência nos elementos majoritários, indicando relativa homogeneidade da amostra em escala macroscópica. Entretanto, a variação observada no teor de  $\text{MgO}$ , presente em apenas uma das leituras, sugere heterogeneidade em microescala, possivelmente relacionada à distribuição irregular de fases minerais secundárias.

Dessa forma, os dados obtidos por XRF permitem classificar a amostra TL04 como um minério sulfetado Cu–Fe–Zn, com teores elevados de cobre e composição compatível com sistemas de mineralização associados a ambientes vulcano-hidrotermais, fornecendo subsídios importantes para a compreensão da mineralização e para futuras avaliações de beneficiamento mineral (Figura 19).

**Figura 19: Concentração média (%) dos principais elementos e óxidos na amostra TL04 SULFETO, destacando o teor elevado de cobre.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 8. DISCUSSÃO

A integração dos dados geológicos, petrográficos e geoquímicos obtidos na Mina dos Crespos permite reconhecer que a mineralização de cobre presente na área possui características distintas daquelas descritas para os principais depósitos da Bacia do Camaquã. Embora estudos regionais, como o de Pires (2023), tenham demonstrado que estruturas rúpteis de grande escala desempenham papel decisivo no controle da circulação de fluidos mineralizantes, os resultados deste trabalho indicam que, na Mina dos Crespos, o controle estrutural atua de forma mais localizada e restrita, estando associado a fraturas de pequeno porte que serviram como canais para a movimentação de fluidos hidrotermais tardios. Essa diferença sugere que, ao contrário dos sistemas regionais contínuos e amplamente conectados, a mineralização da área estudada representa um evento limitado, condicionado por heterogeneidades estruturais locais.

As evidências petrográficas corroboram essa interpretação ao demonstrarem que a malaquita ocorre predominantemente preenchendo fraturas abertas, sem sinais de deformação interna, apresentando textura fibrosa e coloração verde intensa. Essas características são típicas de processos supergênicos, desenvolvidos em condições oxidadas e rasas, próximas à superfície. A ausência de deformação nos preenchimentos minerais indica que a precipitação da malaquita ocorreu após a formação das fraturas, durante um estágio tardio da evolução do sistema.

Essas observações indicam que a mineralização primária, possivelmente representada por sulfetos de cobre como a calcopirita, foi submetida a processos de lixiviação, remobilização e reprecipitação decorrentes da percolação de fluidos meteóricos oxidados, responsáveis pelo enriquecimento secundário do cobre. A associação entre fraturas abertas, minerais de oxidação do cobre e ausência de deformação é compatível com modelos clássicos de enriquecimento supergênico, que destacam o papel da circulação prolongada de fluidos meteóricos em zonas fraturadas para a formação de minerais como a malaquita (Pirajno, 2009; Reed, 1997).

Além das fraturas mineralizadas, a área apresenta uma diversidade litológica significativa, incluindo lapilli-tufos, ignimbritos, andesitos e riolitos, que refletem múltiplos episódios vulcânicos de afinidade alcalina a moderadamente alcalina, característica típica do magmatismo pós-colisional registrado no Grupo Santa Bárbara (Matté *et al.*, 2016; Fambrini *et al.*, 2014). A presença de alteração hidrotermal intensa,

evidenciada por sericitização, cloritização e argilomineralização (Figura 20), constitui evidência direta da circulação de fluidos quentes pelo substrato rochoso. Esses processos alteraram as mineralogias e texturas primárias das rochas hospedeiras, criando condições favoráveis para a remobilização posterior do cobre, conforme amplamente descrito em sistemas associados ao vulcanismo alcalino (Smith *et al.*, 2017).

**Figura 20: Características da rocha e do afloramento apresentando forte alteração hidrotermal.**



**Fonte:** Elaborado pela autora.

A comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e as interpretações regionais mostra que, embora a Mina dos Crespos esteja inserida em um ambiente geológico conhecido pela ocorrência de depósitos expressivos, como as Minas do Camaquã (Simch, 2019; Ribeiro; Bocchi; Figueiredo, 1966), sua mineralização apresenta características que a diferenciam desses sistemas maiores. Enquanto Pires (2023) descreve fraturas regionais NE–SW e N–S como principais condutos de fluidos mineralizantes, relacionados a zonas rúpteis de grande extensão, a mineralização

observada neste estudo ocorre sobretudo em fraturas estreitas e descontínuas, com pouco desenvolvimento lateral e controladas por estruturas secundárias. Esse tipo de mineralização tende a gerar depósitos de menor volume, frequentemente descontínuos e mais difíceis de mapear, o que reforça a necessidade de investigações mais detalhadas para compreender sua continuidade e potencial econômico.

Os teores elevados de cobre obtidos pelas análises de FRX, chegando a até 250.000 ppm, reforçam que, embora a mineralização seja local, ela apresenta enriquecimento. A combinação entre hidrotermalismo prévio, condições tectônicas permissivas e posterior atuação de processos supergênicos criou um ambiente favorável para a concentração de cobre, ainda que em corpos de pequena extensão. A afinidade alcalina das rochas hospedeiras contribui para esse entendimento, uma vez que sistemas mineralizantes associados a magmatismo alcalino pós-orogênico são reconhecidos mundialmente por gerar depósitos cupríferos e, por vezes, mineralizações raras e estratégicas (Pandey *et al.*, 2025; Richards, 2013).

Assim, a análise integrada permite concluir que a mineralização da Mina dos Crespos representa um sistema hidrotermal e supergênico de pequena escala, cuja gênese está diretamente associada à interação entre estrutura, litologia, hidrotermalismo e intemperismo. O conjunto de evidências demonstra que, dentro de uma mesma província metalogenética, diferentes estilos e estágios de mineralização podem coexistir, refletindo a complexa evolução tectono-magmática e hidrotermal da região. Esses resultados ampliam o conhecimento sobre a diversidade de ambientes mineralizantes do Grupo Santa Bárbara e reforçam a necessidade de estudos complementares, como análise de zonas de alteração, geoquímica de minerais e mapeamento estrutural detalhado, para aprimorar a compreensão da evolução metalogenética na região e para avaliar o real potencial econômico da ocorrência.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da Mina dos Crespos permitiu caracterizar a mineralização de cobre e compreender sua relação com os processos hidrotermais atuantes na área. A predominância de malaquita preenchendo fraturas em rochas vulcânicas ácidas alteradas indica que a mineralização está vinculada a eventos hidrotermais tardios, posteriormente modificados por processos supergênicos. A presença desses veios reforça a hipótese de alteração mineral em estágio posterior à formação primária da rocha, apontando para a interação das unidades vulcânicas com soluções hidrotermais que induziram modificações mineralógicas importantes para a compreensão da evolução geológica local.

Ao comparar esses resultados com as observações estruturais apresentadas por Pires (2023), destaca-se que, embora a região possua fraturamentos significativos compatíveis com sistemas rúpteis regionais, a mineralização da Mina dos Crespos não está diretamente associada aos grandes lineamentos ou às zonas de cisalhamento descritas para a Bacia do Camaquã. Diferentemente do contexto regional analisado por aquele autor, a mineralização observada neste estudo caracteriza-se como um evento localizado, restrito a fraturas de menor porte e influenciado por processos supergênicos que atuaram em condições rasas.

Dessa forma, conclui-se que a mineralização de cobre da Mina dos Crespos possui caráter tardio e independente do metamorfismo regional, sendo controlada principalmente por heterogeneidades estruturais locais que permitiram a circulação e precipitação dos fluidos mineralizantes. As evidências obtidas complementam o panorama regional apresentado por Pires (2023), ao demonstrar que diferentes estilos de mineralização de cobre podem ocorrer dentro da mesma província geológica, variando conforme o contexto estrutural e hidrotermal de cada área. Além disso, o comportamento da mineralização sugere que a Mina dos Crespos possui potencial para investigações adicionais, como estudos geoquímicos de alteração, análises isotópicas e mapeamento estrutural detalhado das zonas fraturadas mineralizadas.

Assim, o presente trabalho contribui de maneira significativa para o entendimento dos processos metalogenéticos atuantes na Mina dos Crespos e reforça a importância da integração entre estudos estruturais, petrográficos e de mineralização na interpretação de sistemas de cobre associados a ambientes vulcano-sedimentares.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. P. M., *et al.* Eventos vulcânicos alcalinos na Bacia do Camaquã: o vulcanismo Neoproterozoico III Acampamento Velho e o magmatismo Meso-Ordoviciano (?) Rodeio Velho. In: Ronchi, L.H. and Althoff, F. (Eds.), **Caracterização e Modelamento de Depósitos Minerais**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil, p. 325-350. 2003.

ALMEIDA, D. P. M., *et al.* The Acampamento Velho Formation, a Lower Cambrian Bimodal Volcanic Package: Geochemical and Stratigraphic Studies from the Cerro do Bugio, Perau and Serra de Santa Bárbara (Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, RS-Brazil). **Gondwana Research**, v. 5, n. 3, p. 721-733, 2002.

ALMEIDA, R. P. **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental)**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ALMEIDA, R. P., *et al.* Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**. v. 217, p. 30-51, 2009.

ALMEIDA, R. P.; LIMA, E. F.; PHILIPP, R. P. Tectono-stratigraphic evolution of the Camaquã Basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 34, n. 1, p. 12-26, 2012.

BETTENCOURT, J. S. **Mina de Cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul**. 1972. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.

BITENCOURT, M. F.; NARDI, L. V. S. Processos de alteração hidrotermal em rochas ígneas: uma revisão aplicada ao magmatismo do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 411–422, 2000.

BONORINO, F. G. Hydrothermal Alteration in the Front Range Mineral Belt, Colorado. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 70, p. 53-90, 1959.

BORBA, A. W. Evolução geológica da "Bacia do Camaquã" (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-Riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica. Tese de Doutorado. Porto Alegre: **Instituto de Geociências, UFRGS**. 109 f., 2006.

BORBA, A. W. Geologia e Recursos Minerais da Bacia do Camaquã. Porto Alegre: CPRM, 2006. 98 p. (**Série Arquivos Abertos, 25**). Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/8525>. Acesso em: 02 mai. 2025.

BORBA, A. W., *et al.* U-Pb zircon and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar K-feldspar dating of synsedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. **Basis Research**, p. 359-375, 2008.

BORBA, A. W.; MARASCHIN, A. J.; MIZUSAKI, A. M. P. Evolução tectono estratigráfica e paleoclimática da Formação Maricá (Escudo Sul-rio-grandense, Brasil): um exercício de geologia histórica e análise integrada de uma bacia sedimentar neoproterozóica. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, RS. v. 34, n. 2, p. 57-74, 2007.

BRITO, R. S. C. de; SILVA, M. da G.; KUYUMJIAN, R. M. (org.). Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. Brasília: **CPRM – Serviço Geológico do Brasil**, 2010.

BROWNE, P. R. L.; ELLIS, A. J. The Ohaki - Broadlands Hydrothermal Area, New Zealand: Mineralogy and Related Geochemistry. **American Journal of Science**, v. 269, p. 97-131, 1970.

CÔRTEZ, A. R. P. **Integração de dados geofísicos e geológicos na caracterização morfológica de ocorrência de cobre na borda norte da Bacia do Camaquã (RS)**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro, São Paulo, 2015.

DU BRAY, E. A. Geochemical Characteristics of Igneous Rocks Associated with Epithermal Mineral Deposits - a Review. **Ore Geol. Rev.**, v. 80, p. 767-783, 2017.

ELDERS, W. A. Petrology as a Practical Tool in Geothermal Studies. **Geothermal Resources Council, Transactions**, v. 1, p. 85-87, 1977.

ELIAS, Scott; ALDERTON, David. **Encyclopedia of Geology**. 2. ed. [S. l.]: Academic Press, 2020. 5622 p. ISBN: 978-0-08-102908-4.

FAMBRINI, G. L. *et al.* Evolução tectônica e estratigráfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS, sul do Brasil: registro de sedimentação continental na assembléia do Gondwana. **Comunicações Geológicas**, v. 101, n. 1, p. 39-54, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/272506243>. Acesso em: 02 mai. 2025.

FAMBRINI, G. L. **O grupo Santa Bárbara (neoproterozóico III) da bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2003.

FAMBRINI, G. L.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO CESAR, A. R. S. Revisão litoestratigráfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil. **Estudos geológicos**, v. 15, n. 1, p. 165-195, 2005.

FISHER, R. V. Rocks composed of volcanic fragments and their classification. **Earth Science Reviews**, v. 1, n. 4, p. 287-298, 1966.

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.

FRANKLIN, J. M.; GIBSON, H. L.; JONASSON, I. R. Volcanogenic massive sulfide deposits. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (Eds.). **Economic Geology 100th Anniversary Volume**. Littleton: **Society of Economic Geologists**, 2005. p. 523-560.

GOODENOUGH, K. M.; WALL, F.; MERRIMAN, D. The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. **Natural Resources Research**, v. 27, n. 2, p. 201-216, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>.

GUILBERT, J. M.; PARK, C. F. **The Geology of Ore Deposits**. W. H. Freeman and Company, New York. 1986.

HARTMANN, L. A.; SANTOS, Joao; MCNAUGHTON, Nicholas. Detrital Zircon U-Pb Age Data, and Precambrian Provenance of the Paleozoic Guaritas Formation, Southern Brazilian Shield. **International Geology Review**, v. 50, p. 364-374, 2008. DOI: 10.2747/0020-6814.50.4.364.

HARTMANN, L.; JÚNIOR, F. C.; PHILIPP, R. P. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. [S.l.]: [s.n.], jan. 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/285804944\\_Evolucao\\_geotectonica\\_do\\_Rio\\_Grande\\_do\\_Sul\\_no\\_Pre-Cambriano](https://www.researchgate.net/publication/285804944_Evolucao_geotectonica_do_Rio_Grande_do_Sul_no_Pre-Cambriano). Acesso em: 3 jul. 2025.

HEILBRON, M.; RICCOMINI, C.; ALMEIDA, J. C. H.; HASUI, Y. A Província Mantiqueira. **Geologia do Brasil**, p. 203-234, 2004.

JANIKIAN, L. **Seqüências deposicionais e evolução paleoambiental do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho, Supergrupo Camaquã, Rio Grande do Sul**. 2004. 189 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

JENSEN, E. P.; BARTON, M. D. Gold deposits related to alkaline magmatism. In: HAGEMANN, S.G., BROWN, P.E. (Eds.), Gold in 2000. **Society of Economic Geologists**, Littleton, Colorado, 2000.

KELLEY, K. D.; SPRY, P. Critical Elements in Alkaline Igneous Rock-Related Epithermal Gold Deposits. In: **Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits**. [S. l.], 2016. p. 9. DOI: 10.5382/Rev.18.09. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336547923>. Acesso em: 02 mai. 2025.

KESLER, S. E. **Ore-forming fluids**. Elements, v. 1, n. 1, p. 13-18, 2005.

LAUX J. H., *et al.* Escudo Sul-Rio-Grandense, estado do Rio Grande do Sul. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral Levantamentos Geológicos e de Potencial Mineral de Novas Fronteiras. Porto Alegre: CPRM (Serviço Geológico do Brasil), 2021.

LIMA, E. F.; ALMEIDA, R. P.; PHILIPP, R. P. Vulcanismo shoshonítico e lamprofírico na região de Lavras do Sul, RS. Geologia USP. **Série Científica**, v. 13, p. 321-338, 2007.

- LOBATO, L. M. *et al.* Mineralizações polimetálicas em depósitos vulcano-hidrotermais brasileiros. **Geologia USP**, v. 17, n. 2, p. 55–78, 2017.
- LOPES, R. W. **Alteração hidrotermal e mineralização de cobre na Mina do Seival**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/55610/000850870.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02 mai. 2025.
- MARIANO, A. N. Economic geology of rare earth minerals. In: Rare Earths: Geochemistry and Mineralogy. **Reviews in Mineralogy**, v. 21, 1989. p. 309-337.
- MATTÉ, V. *et al.* Postcollisional Ediacaran volcanism in oriental Ramada Plateau, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 71, p. 201-222, 2016.
- MEXIAS, A. S. **O sistema hidrotermal fóssil de Volta Grande – Lavras do Sul/RS**. 1990. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.
- NARDI, L. V. S.; BITENCOURT, M. F. Vulcanismo e sistemas hidrotermais associados na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, p. 473-488, 2006.
- OLIVEIRA, T. V.; PAIM, P. S.; ALMEIDA, R. P. Vulcanismo e sedimentação no Grupo Guaritas, Bacia do Camaquã. **Geologia USP. Série Científica**, v. 13, n. 4, p. 87-98, 2014.
- PAIM, P. S. G. *et al.* Arcabouço estratigráfico e evolução tectono-sedimentar da Bacia do Camaquã (Neoproterozóico-Eopaleozóico). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 394-396, 2000.
- PAIM, P. S. G.; CHEMALE, F. J.; WILDNER, W. Estágios Evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 183-193, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X13748>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- PANDEY, R. *et al.* Alkaline rocks and their economic and geodynamic significance through geological time. **Geological Society**, London, Special Publications, London, v. 551, p. 415, 2025. Disponível em: <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP551-2025-9>. Acesso em: 02 mai. 2025.
- PELOSI, A. P. M. R.; FRAGOSO-CÉSAR, A. R. S. Proposta de classificação litoestratigráfica para o Grupo Maricá. I Encontro sobre a Estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias. Porto Alegre. **Anais**, p. 133-138, 2003.
- PEREIRA, J. C.; ANGELI, N. Aplicação de XRF portátil na prospecção de sulfetos no Quadrilátero Ferrífero. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 71, n. 2, p. 251–259, 2018
- PETRY, K. **Feições de interação vulcano-sedimentares: seu uso como indicadores de contemporaneidade no magmatismo Rodeio Velho**

(mesoordoviciano) e no vulcanismo Serra Geral (cretáceo inferior). São Leopoldo - RS, 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade do Vale do Rio do Sinos.

PHILIPP, A., *et al.* Development and Comparison of Circulation type Classifications using the COST 733 dataset and software. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2673-2691, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.3920>. Acesso em: 02 mai. 2025.

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**, v. 46, p. 83-104, 2016.

PINTO, G. R. Mineralizações polimetálicas no sul do Brasil: contexto geológico e características metalogenéticas. **Revista de Geociências**, v. 14, p. 89–104, 2015.

PIRAJNO, F. **Hydrothermal Processes and Mineral Systems**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2009. 1250 p. ISBN: 978-1-4020-8612-0.

PIRES, João Saldanha. **Sensoriamento remoto e mapeamento geológico-estrutural para a caracterização de estruturas rúpteis associadas a mineralizações de cobre na Bacia do Camaquã – RS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2023.

REED, M. H. Hydrothermal Alteration and its Relationship to ore Fluid Composition. In: BARNES, H. L. (Ed.), **Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits**. 3. ed. John Wiley and Sons, 1997.

RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO, F. P. M. Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul – Brasil. **Boletim do D.N.P.M.**, 127. 1966.

RIBEIRO, M.; CARRARO, C. C. Geotectonic map of the Caçapava do Sul Region RS-Brazil. Mapa Instituto de Geociências, Porto Alegre, v. 1, 1971.

RICHARDS, J. P. **Alkalic-type epithermal Gold Deposits – a Review**. In: Thompson, J.F.H. (Ed.), **Magmas, Fluids, Ore Deposits**. 1995.

RICHARDS, J. P. Giant ore Deposits Formed by Optimal Alignments and Combinations of Geological Processes. **Nature Geoscience**, v. 6, p. 911-916, 2013.

SANTOS, M. G. M.; ALMEIDA, R. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Paleostress analysis in brittle structures of the Camaquã copper mines. **Brazilian Journal of Geology**, v. 42, n. 3, p. 573-584, 2012.

SILLITOE, R. H. Porphyry copper systems. **Economic Geology**, v. 105, p. 3-41, 2010.

SILVA, J. A. *et al.* Uso do XRF portátil na identificação de minerais sulfetados em campo. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 47, p. 913–925, 2014.

SIMCH, Gabriela Huster. **Estudo do Vulcanismo Associado às Mineralizações de Cu (Au), Zn e Pb (Ag) na Região das Minas do Camaquã/RS - Brasil**. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/204988/001111019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 mai. 2025.

SIMMONS, S. F.; BROWN, K. L. Gold in Magmatic Hydrothermal Solutions and the Rapid Formation of a Giant ore Deposit. **Science**, p. 288-291, 2006.

SMITH, Daniel J. *et al.* Hydrothermal Alteration and Fluid PH in Alkaline-Hosted epithermal systems. **Ore Geology Reviews**, [S.l.], v. 89, p. 705-722, 2017.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136817302913?via%3Dihub>. Acesso em: 02 mai. 2025.

SOMMER, C. A., *et al.* Potassic and low- and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Elsevier, v. 18, n. 3-4, p. 237-254, 2005.

WILDNER, W. *et al.* Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2008. Escala 1:750.000. **Programa Geologia do Brasil**.

Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10301>. Acesso em: 9 ago. 2023.