

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM GEOLOGIA**

**LEONARDO MACHADO GARCIA**

**PROSPECÇÃO DE CARBONATITOS NA REGIÃO SUL DO GRANITO  
CAÇAPAVA – RS: ENFÂSE EM MAPEAMENTO GEOLÓGICO E QUÍMICA  
MINERAL PARA ETRs, NB E P**

**Caçapava do Sul**

**2023**

**LEONARDO MACHADO GARCIA**

**PROSPECÇÃO DE CARBONATITOS NA REGIÃO SUL DO GRANITO  
CAÇAPAVA – RS: ENFÂSE EM MAPEAMENTO GEOLÓGICO E QUÍMICA  
MINERAL PARA ETRs, NB E P**

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.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Delia Del Pilar Montecinos de Almeida.

**Caçapava do Sul  
2023**

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) .

G216p Garcia, Leonardo Machado

PROSPECÇÃO DE CARBONATITOS NA REGIÃO SUL DO GRANITO  
CAÇAPAVA - RS: ENFÂSE EM MAPEAMENTO GEOLÓGICO E QUÍMICA  
MINERAL PARA ETRs, NB E P / Leonardo Machado Garcia.  
108 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2023.

"Orientação: Delia del Pilar Montecinos de Almeida".

1. Carbonatitos. 2. Fenitização. 3. Prospecção Mineral. 4.  
Elementos Terras Raras. I. Título.

LEONARDO MACHADO GARCIA

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO E QUÍMICA MINERAL RELACIONADO À PROSPECÇÃO DE CARBONATITOS NA REGIÃO SUL DO GRANITO CAÇAPAVA - RS: ÊNFASE EM ETRs, NB E P**

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 13 de julho de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Delia Del Pilar Montecinos de Almeida

Orientadora

Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Msc. Luiz Delfino Albarnaz

Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Alexandre Magno Rocha da Rocha

IFRN



Assinado eletronicamente por **LUIZ DELFINO TEIXEIRA ALBARNAZ PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR** em 20/07/2023, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DELIA DEL PILAR MONTECINOS DE ALMEIDA PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR** em 21/07/2023, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [ps://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_ogao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_ogao_acesso_externo=0), informando o código verificado **19089** e o código CRC **E28D3AFC**

## RESUMO

Carbonatitos são rochas compostas por mais de 50% de minerais de carbonato. São relativamente raros e possuem grande importância econômica devido a sua concentração de minerais com conteúdo expressivos de elementos terras raras (ETRs), Nb e minerais de fosfato ( $P_2O_5$ ), os quais tem aplicações na indústria de alta tecnologia e de fertilizantes, respectivamente. Na região de Caçapava do Sul - RS, afloram 2 complexos carbonatíticos, conhecidos pelos nomes de Picada dos Tocos e Passo Feio, localizados a leste e sudeste da suíte granítica chamada granito Caçapava do Sul. A presença destes corpos é marcada regionalmente por expressivas anomalias gamaespectrométricas no canal de tório equivalente (eTh) e por sua distribuição ao longo de estruturas de falha, interpretadas através da magnetometria. Conjuntos de anomalias geofísicas semelhantes são observadas imediatamente ao sul do granito Caçapava em uma faixa semi-contínua, podendo indicar a presença de corpos carbonatíticos. Desta forma, foi realizado o mapeamento das áreas de estudo, estabelecidas de acordo com os dados geofísicos, e a análise de química mineral em MEV-EDS de amostras coletadas com o objetivo principal de prospectar novos corpos carbonatíticos na região e estudar sua concentração química em ETRs, Nb e fosfato ( $P_2O_5$ ). Os resultados obtidos não revelaram a presença concreta de rochas carbonatíticas, contudo, foram observadas rochas anfíbolíticas calcissilicáticas com alto conteúdo de biotita, ocorrência de minerais de fosfato ( $P_2O_5$ ) e de minerais com conteúdo de ETRs e Nb, além disso, foram mapeadas rochas com vênulas de minerais alcalinos. Litologias semelhantes a estas são encontradas nas encaixantes fenitizadas dos CCPT e CCPF o que permitiu interpretar a presença de possíveis zonas de alteração fenítica nos anfíbolitos deste estudo e que, podem estar relacionados, a presença de uma possível intrusão carbonatítica em subsuperfície.

**PALAVRAS-CHAVE:** CARBONATITOS, FENITIZAÇÃO, PROSPECÇÃO MINERAL, ELEMENTOS TERRAS RARAS.

## **ABSTRACT**

Carbonatites are rocks composed of more than 50% carbonate minerals. They are relatively rare and have great economic importance due to their concentration of minerals with expressive content of rare-earth elements (REE), Nb and phosphate minerals (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), which have applications in the high technology industry and fertilizers, respectively. In the region of Caçapava do Sul - RS there are 2 carbonatite complexes, known by the names of Picada dos Tocos and Passo Feio, located to the east and southeast of the granite suite called Caçapava do Sul granite. The presence of these bodies is marked by expressive gamma-ray spectrometric anomalies in the thorium equivalent channel (eTh) and by the distribution along fault structures, interpreted by magnetometry. Sets of similar geophysical anomalies are observed immediately south of the Caçapava granite in a semi-continuous zone, which may indicate the presence of carbonatite bodies. In this way, the mapping of the study areas was carried out, established according to the geophysical data, and the analysis of mineral chemistry in SEM-EDS of samples collected with the main objective of prospecting new carbonatite bodies in the region and studying their chemical concentration in REE, Nb and phosphate (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). The results obtained didn't reveal the concrete presence of carbonatite rocks, however, calcisilicate amphibolitic rocks with high biotite content, occurrence of phosphate minerals (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and minerals with REE and Nb content were observed. In addition, rocks with veins of alkaline minerals were mapped as well. Lithologies similar to these are found in the phenitized host of the CCPT and CCPF, which allowed interpreting the presence of possible zones of phenitic alteration in the amphibolites of this study and which may be related to the presence of a possible carbonatite intrusion in the subsurface.

**KEY WORDS: CARBONATITES, FENITIZATION, MINERAL PROSPECTING, RARE EARTH ELEMENTS.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu grande Pai por toda a força e coragem que me deu por toda minha trajetória, e principalmente nos momentos difíceis deste final de graduação. Agradeço a toda minha querida família, meus pais José Eduardo e Sandra, meus irmãos Eduardo e Lucas, e minha grande companheira Nádyla, pela ajuda em muitas das atividades de campo e pelo suporte e amparo durante todo o tempo de graduação, e principalmente nos momentos finais da realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer imensamente a minha orientadora Prof. Dr<sup>a</sup>. Delia del Pilar Montecinos de Almeida, por toda orientação, suporte e conhecimento que me forneceu durante toda minha graduação e durante este trabalho, e por todas as outras oportunidades que consegui graças a ela.

Meus sinceros agradecimentos a todos os meus amigos, incluindo Jorge Miguel e Nauen Benedt que contribuíram de várias formas para a realização deste trabalho e, em especial ao meu grande amigo Roger que me acompanhou sem pestanejar durante várias das etapas de campo. Gostaria de agradecer também a todos aqueles que fizeram parte desta trajetória acadêmica e que de alguma forma contribuíram para meu aperfeiçoamento.

Agradeço aos professores Luiz Delfino e Alexandre Rocha, constituintes da banca de avaliação, pelas sugestões feitas para este trabalho, elas contribuíram muito para sua melhoria e aperfeiçoamento. Agraço também ao geólogo Dr. Daniel pelo suporte e contribuição durante as etapas realizadas junto a Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização, situação e detalhe das áreas de estudo. a) Imagem de satélite; b) Imagem de gamaespectrometria no canal de eTh. O polígono em preto indica os mapas de detalhe.....	19
Figura 2 - Representação dos espectros de radiação gama, com a faixa de energia da contagem total e dos elementos radiométricos potássio (K), urânio (U) e tório (Th).....	21
Figura 3 - Tipos de sinais produzidos pelo MEV a partir de elétrons primários.....	24
Figura 4 – Diagrama esquemático mostrando o caminho dos elétrons primários e a emissão de BSE e elétrons secundários.....	24
Figura 5 - Classificação química de carbonatitos com SiO <sub>2</sub> < 20% usando % em peso de óxidos (Woolley & Kempe, 1989). Carbonatitos com SiO <sub>2</sub> > 50% são silicocarbonatos.....	26
Figura 6 – Classificação de carbonatitos contendo misturas de minerais de carbonatos.....	26
Figura 7 – Variedade morfológica dos complexos carbonatíticos: A) Complexos do Tipo Central. B) Complexos do Tipo Linear.....	27
Figura 8 - Gráfico de temperatura versus profundidade mostrando a posição do peridotito-C-H-O (Vermelho) com razão CO <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O igual a 0,8 extrapolada para altas pressões. A porção amarela entre os pontos 2 e 3 corresponde a possibilidade de fusão parcial do manto com uma fase carbonatada. ....	31
Figura 9 - Mapa geotectônico, ilustrando a disposição dos terrenos que compartimentam o Escudo Sul Rio-Grandense e as principais estruturas que os dividem.....	36
Figura 10 – a) Mapa gamaespectrométrico (eTh) e magnetométrico (RTP); (b) Mapa geológico da região (c) Complexo Carbonatítico Picada dos Tocos e (d) Complexo Carbonatítico Passo Feio. ....	40
Figura 11 - a) Fotografia do afloramento de carbonatito Picada dos Tocos, ilustrando o contato entre a camada de carbonatito e a rocha fenitizada. b) fotografia de uma amostra de granada-titanita hornblenda granofels albitizado (fenitização sódica), coletada próximo ao contato com o carbonatito Passo Feio. ....	41
Figura 12 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 1 em conjunto com imagem gamaespectrométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .	45



Figura 13 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 2 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .46	46
Figura 14 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 3 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .47	47
Figura 15 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 4 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .48	48
Figura 16 – Mapeamento geológico realizado pelo Grupo MVB. Os polígonos pretos mostram as áreas 1 e 2, o círculo vermelho mostra a parte ainda não mapeada. ....49	49
Figura 17 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 1 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .50	50
Figura 18 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 2 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .51	51
Figura 19 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 3 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.. 52	52
Figura 20 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 4 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado. .53	53
Figura 21 – Realização de amostragem de solo com trado manual.....54	54
Figura 22 – Amostras coletadas em campo e descritas macroscopicamente.....55	55
Figura 23 – Mapa geológico da área 1 com relevo sombreado.....57	57
Figura 24 – Mapa geológico da área 2, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.....58	58
Figura 25 – Mapa geológico da área 3, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.....59	59
Figura 26 – Mapa geológico da área 4, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.....60	60
Figura 27 – Mapa geológico da área 2 salientando em amarelo hachurado as zonas inacessíveis de lavoura, ou zonas sem afloramentos. ....61	61
Figura 28 - Mapa mostrando as estruturas observadas na magnetometria (FVD-RTP-Residual) que cortam as áreas de estudo. Em conjunto à imagem gamaespectrometria no canal de eTh. ....62	62
Figura 29 – Amostras de xistos. A) Mica Xisto com anfibólios. B) Mica Xisto com granadas. ....63	63
Figura 30 – Fotos do afloramento de mármore (A e B) e da amostra coletada (C)...64	64

Figura 31 – Lâmina petrográfica de mármore. A) à nicóis paralelos. B) e nicóis cruzados. Aumento de 5x.....	65
Figura 32 – Amostras de granitos ultramilonitizados. A) Amostra de coloração azulada; B) Amostra de coloração branca; C) Amostra de coloração rosada. D) Amostra com estrutura bandada. ....	66
Figura 33 – Fotomicrografia de uma amostra de granito ultramilonitizado. A) nicóis paralelos; B) Nicóis cruzado. Aumento de 5x. Pla=Plagioclásio; FK=Feldspato alcalino.....	67
Figura 34 – Imagem de BSB de um cristal de xenotima. ....	67
Figura 35 – Imagens das amostras de anfibolitos. A) Estrutura maciça. B) Com porfiroblástos de biotita. C) Amostra carbonatada. D) Amostra carbonatada com textura “muro de tijolos”. E) Amostra carbonatada com bandas de plagioclásio. F) Amostra com arranjo stockwork de carbonatos.....	69
Figura 36 – A e B) Amostra exibindo carbonatos na foliação e em vênulas de perpendiculares (textura muro de tijolos). C e D) Amostra com carbonatação da matriz em menor quantidade, aumento de 5x. E e F) Amostra com pequenas massas de carbonatos, aumento de 20x. G e H) Amostra mostrando a ocorrência de reabsorção de cristais (em vermelho), aumento de 20x. Nicóis paralelos nas imagens à esquerda. Nicóis cruzados nas imagens à direita. ....	70
Figura 37 – Imagem de BSB mostrando a distribuição dos diferentes tipos de biotita na matriz da rocha. Mer=Meroxeno; Lep=Lepidomelano; Py=Pirita.....	72
Figura 38 – Amostra PPF22-46 mostrando a distribuição dos cristais de actinolita observados. Bio=Biotita; Esf=Esfeno; Act=Actinolita. ....	73
Figura 39 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de esfeno (em vermelho) junto a apatitas. Esf=Esfeno; F-Apa=Apatita-(CaF).....	75
Figura 40 – Imagem de BSB em conjunto com mapa composicional gerado em MEV-EDS para La, Ce e Py. ....	76
Figura 41 - Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de calcita e ankerita. Ank=ankerita; Cal=Calcita.....	77
Figura 42 - Imagem BSB mostrando a distribuição e diferença composicional dos cristais de calcitas dispersos na matriz e aqueles preenchendo fraturas perpendiculares. Cal=Calcita; Bio=Biotita; Bar=Barita. ....	78

Figura 43 – Fotomicrografia de uma amostra com vênulas de carbonatos e presença de feldspato alcalino, plagioclásio e quartzo. ....	79
Figura 44 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de zircão. Zir=Zircão; O-Fe=Óxido de ferro; Esf=Esfeno. ....	80
Figura 45 – Imagem de BSB mostrando cristais de wollastonita junto a valores médios e amplitude observados em MEV-EDS. Woll=Wollastonita; Bar=Barita; Esf=Esfeno. ....	81
Figura 46 – A) Imagem BSB mostrando um cristal de apatita com sua composição e espectro. B) Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de apatita-(CaF) e apatita-(CaOH). F-Apa= Apatita-(CaF); OH-Apa=apatita-(CaOH); O-Fe/Ti=Óxido de ferro/Titânio. ....	82
Figura 47 – A) Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de barita na borda e nos planos de clivagem dos cristais de esfeno. B) Imagem de BSB mostrando cristais de barita de forma amorfa preenchendo espaços na rocha. Bar=Barita; Apa=Apatita; Esf=Esfeno; Act=Actinolita; Woll=Wollastonita. ....	84
Figura 48 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de allanita em uma amostra de anfíbolito. All=Allanita; Apa=Apatita. ....	86
Figura 49 – A) Imagem de BSB mostrando a distribuição dos cristais de monazita(La-Ce) dispersos na matriz de forma anédrica. B) Imagem de BSB mostrando um cristal de Mon-(La-Th) (as porções esbranquiçadas remetem a valores mais altos de Th). Mon=Monazita; Bio=Biotita. ....	87
Figura 50 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de cerianita junto a valores médios e de amplitude observados em MEV-EDS. Cer=Cerianita. ....	88
Figura 51 – Imagem de BSB mostrando a distribuição dos óxidos de ferro e titânio alterando um cristal de esfeno. As tabelas mostram os valores de média e amplitude para os minerais de óxido observados em MEV-EDS. O-Ti/Fe= Óxidos de ferro e/ou titânio. ....	89
Figura 52 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de sulfeto junto com valores de concentrações médias e amplitudes observadas em MEV-EDS. Py=Pirita; CaPy=Calcopirita; Gal=Galena. ....	90
Figura 53 – Perfil A-A' realizado em uma drenagem na porção oeste da área 2. É notável a presença de uma lineação no afloramento cortada pela drenagem. ....	91

Figura 54 – Representação em mapa e em seção do perfil A-A' realizado em campo. Foram calculados os mergulhos aparentes para representação das estruturas. ....	92
Figura 55 – Representação em mapa e em seção do perfil B-B' realizado em campo. Foram calculados os mergulhos aparentes para representação das estruturas. ....	93
Figura 56 – Perfil esquemático mostrando a possível intrusão de um corpo carbonatítico em subsuperfície e sua relação com as rochas fenitizadas.....	97
Figura 57 - Mapa geológico da área 1 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.....	98
Figura 58 - Mapa geológico da área 2 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.....	99
Figura 59 - Mapa geológico da área 3 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.....	100
Figura 60 - Mapa geológico da área 4 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.....	101
Figura 61 – Seção realizada no projeto primavera liderado pelo GMVB mostrando a proximidade do CCPT com os mármorees. ....	102

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da faixa de energia e os respectivos picos, em MeV, associados aos canais dos elementos radiométricos. ....	21
Tabela 2 - Sete principais litologias que acompanham os carbonatitos ao redor do mundo. ....	33
Tabela 3 – Coordenadas, bibliografias e idades definidas e estimadas das intrusões carbonatíticas do ESRG. ....	37
Tabela 4 – Valores de amplitude e média de 4 análises de MEV-EDS realizadas em xenotimas. ....	68
Tabela 5 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos diferentes cristais de biotita. ....	73
Tabela 6 – Valores de média e amplitude para 7 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de actinolita. ....	74
Tabela 7 – Valores de média e amplitude para 24 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de esfeno. ....	75
Tabela 8 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de calcita e ankerita. ....	77
Tabela 9 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas em 5 cristais de oligoclásio e 13 cristais de feldspato alcalino. ....	79
Tabela 10 – Valores de média e amplitude para 16 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de zircão. ....	80
Tabela 11 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de apatita. ....	83
Tabela 12 – Valores de média e amplitude para 13 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de barita. ....	85
Tabela 13 – Valores de média e amplitude para 5 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de allanita. ....	85
Tabela 14 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de monazita. ....	88

## **ABRAVIAÇÕES**

CC – Complexo Carbonatítico

CCPT – Complexo Carbonatítico Picada dos Tocos

CCPF – Complexo Carbonatítico Passo Feio

CMPF – Complexo Matamórfico Passo Feio

SGCS – Suíte Granítica de Caçapava do Sul

ESRG – Escudo Sul Rio-Grandense

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva

GMVB – Grupo Mining Ventures Brasil

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1. Objetivos Gerais.....	18
2.2. Objetivos Específicos .....	18
<b>3. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>18</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>19</b>
<b>5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
5.1. Teoria dos métodos e técnicas .....	20
5.1.1. Gamaespectrometria .....	20
5.1.2. Magnetometria.....	22
5.1.3. Microscopia ótica.....	23
5.1.4. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	23
5.2. Estado da arte .....	25
5.2.1. Carbonatitos .....	25
5.2.2. Depósitos associados.....	34
5.3. Contexto Geológico.....	35
5.3.1. Geologia regional.....	35
5.3.2. Geologia Local.....	38
<b>6. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
6.1. Atividades pré-Campo.....	42
6.1.1. Revisão bibliográfica.....	42
6.1.2. Análise geofísica.....	43
6.1.3. Planejamento do trabalho de campo .....	43
6.2. Atividades de campo .....	44
6.2.1. Mapeamento geológico .....	44
6.3. Atividades pós campo .....	54

6.3.1. Descrição macroscópica.....	55
6.3.2. Confeção e descrição lâminas delgadas .....	55
6.3.3. Estudo de química mineral .....	55
6.3.4. Confeção do mapa geológico .....	56
6.3.5. Perfis geológicos .....	56
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
7.1. Mapeamento Geológico .....	56
7.2. Litologias .....	62
7.2.1. Andesito.....	62
7.2.2. Mica xisto.....	63
7.2.3. Mármore .....	63
7.2.4. Granito ultramilonizado .....	65
7.2.5. Anfibolitos .....	68
7.3. Perfis.....	91
<b>8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES .....</b>	<b>93</b>
8.1. Mapeamento geológico .....	93
8.2. Química mineral .....	102
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>104</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Carbonatitos são rochas ígneas com mais de 50% de minerais de carbonatos primários em sua composição, podendo ser de origem vulcânica, plutônica ou seus equivalentes intermediários. Essas rochas são classificadas em quatro classes principais, de acordo com sua composição mineralógica, sendo elas: carbonatitos calcíticos, carbonatitos dolomíticos, ferrocronatitos e natrocarbonatitos (Le Maitre, 1999 & Streckeisen, 1979). A presença de halos de alteração hidrotermal e outras intrusões alcalinas associadas aos carbonatitos são fortes indicadores de sua presença e servem de caráter prospectivo. Além disso, a presença de rochas hidrotermais associadas permite melhor denominar estes corpos como complexos carbonatíticos (CC).

A importância dos carbonatitos se dá pela presença de altas concentrações de fósforo (P), Elementos Terras Raras (ETRs), Nióbio (Nb) (Lapin et al., 1988) e Cu (Simandl, 2018). Tendo os elementos Terras Raras uma grande importância como produtos estratégicos, para as áreas militar e civil. Além disso, a crescente demanda de fertilizantes a base de fosfato ( $P_2O_5$ ) no último ano, devido ao cenário político mundial, resultando em um aumento na sua procura.

No Brasil, ocorrem diversos depósitos minerais associados a carbonatitos, como os depósitos de Araxá (MG) e Catalão (GO), e mais recentemente o projeto Três Estradas (RS). Atualmente, no município de Caçapava do Sul, afloram dois complexos carbonatíticos, primeiramente reconhecidos pelo Grupo Mining Ventures Brasil (GMVB), denominados de Complexo Carbonatito Picada dos Tocos (CCPT) (Alves, 2017) e Passo Feio (CCPF) (Alves, 2017; Morales, 2017), que bordejam a suíte granítica de Caçapava do sul (SGCS), ou granito Caçapava.

Anomalias geofísicas semelhantes àquelas observadas na região destes carbonatitos são encontradas imediatamente ao sul do batólito, sendo matéria deste estudo. Além disso, morfologia destes corpos permite uma classificação como do tipo linear associado a grandes falhas profundas como classificado por Lapin et al. (1988).

Este trabalho teve como enfoque principal o mapeamento e estudo mineralógico da área imediatamente ao sul do granito Caçapava, na busca de

possíveis complexos carbonatíticos ou zonas feníticas indicadoras. Além disso, através do estudo de química mineral procurou-se reconhecer o comportamento e concentração de ETRs, Nb e P associados as rochas estudadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

O presente trabalho tem como objetivos gerais, detectar e mapear a presença de corpos carbonatíticos na região do CMPF imediatamente ao sul do CGCS, entender algumas de suas características petrológicas e geoquímicas, no âmbito da prospecção mineral, com foco principal no comportamento e concentração de ETR, Nb e P.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Mapear as rochas das áreas de estudo e compreender suas relações espaciais e genéticas;
- Mapear corpos carbonatíticos ou detectar zonas feníticas como indicadores da sua presença;
- Construir mapas e perfis geológicos das áreas de estudo;
- Analisar e compreender a mineralogia das rochas e sua concentração de ETRs, Nb e P.

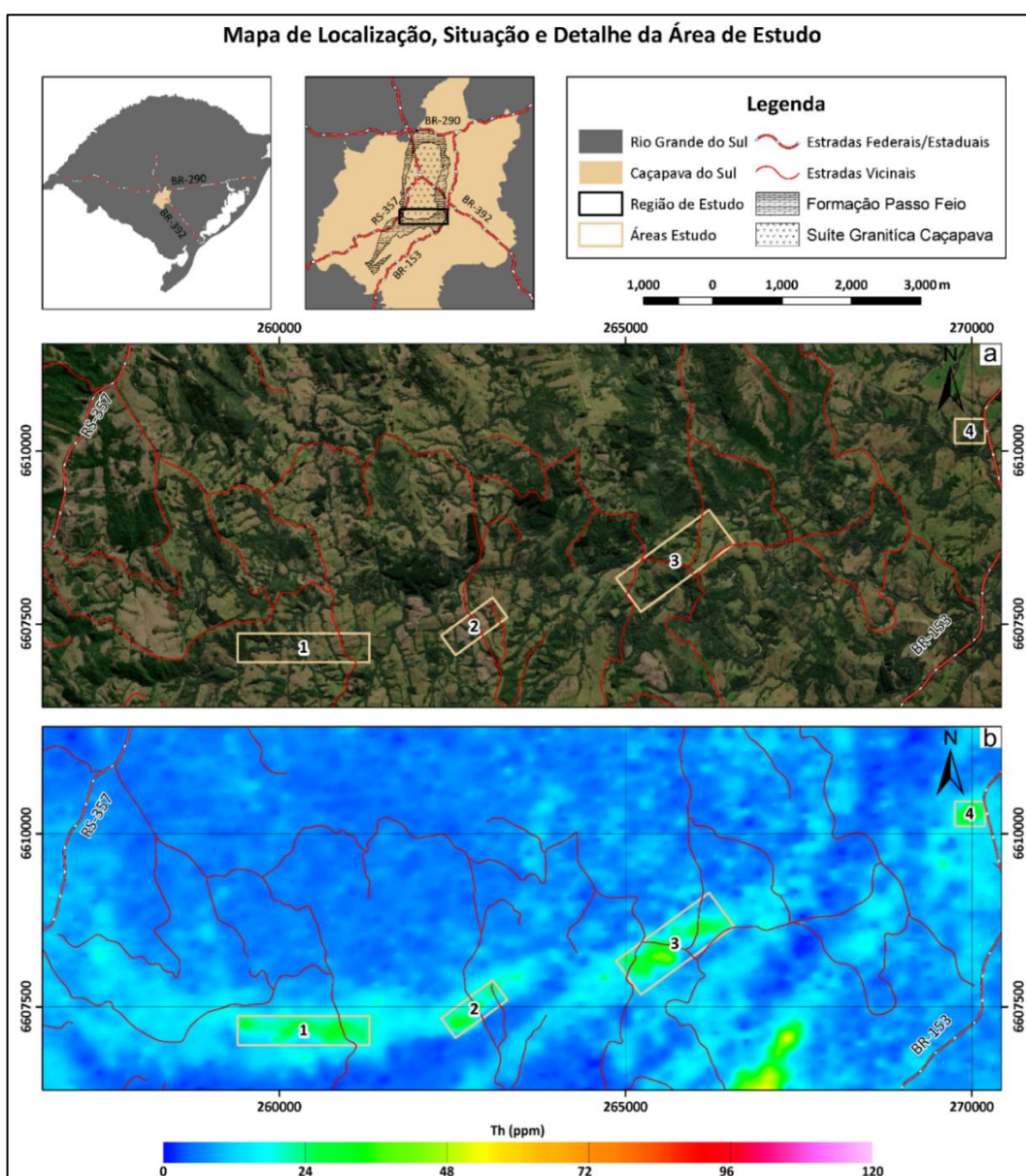
## **3. JUSTIFICATIVA**

Devido ao alto potencial econômico dos carbonatíticos, e considerando seu caráter estratégico, é extremamente importante a realização de pesquisas de mapeamento e reconhecimento destas litologias. Sua composição mineralógica, geralmente com elevada concentração de ETRs, Nb e P, pode ter uso tanto na indústria de alta tecnologia quanto de fertilizantes e pode justificar a pesquisa pelo âmbito econômico, principalmente pelo aumento da demanda por ETRs e fertilizantes, devido ao contexto geopolítico atual.

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

As áreas de estudo, representadas no mapa da **figura 1**, localizam-se na porção central do município de Caçapava do Sul, mais precisamente na região do Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) imediatamente ao sul do Granito Caçapava.

Figura 1 - Mapa de localização, situação e detalhe das áreas de estudo. a) Imagem de satélite; b) Imagem de gamaespectrometria no canal de eTh. O polígono em preto indica os mapas de detalhe.



Fonte: Autor.

O acesso principal às áreas se dá principalmente pela BR-153, sentido Santana da Boa Vista, e RS-357 sentido Lavras do Sul, além das estradas vicinais Leste-Oeste que conectam essas duas rodovias.

Nesta região, ocorre uma faixa semi-contínua de anomalias gamaespectrométricas do canal de eTh encaixadas em anomalias magnetométricas, ambas semelhantes as assinaturas geofísicas dos Complexos Carbonatíticos Passo Feio e Picada dos Tocos.

## **5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **5.1. Teoria dos métodos e técnicas**

#### **5.1.1. Gamaespectrometria**

Entre o final dos séculos XVIII e XIX a contribuição de diversos cientistas permitiu a descoberta dos elementos radioativos e o estudo da radioatividade. Através dos estudos de Rutherford, foram identificados os três tipos principais de radioatividade ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) e, posteriormente, em conjunto com Frederick Soddy, desenvolveram a teoria do decaimento radioativo dos elementos (Ribeiro et al., 2014).

A gamaespectrometria começou a ser utilizada entre 1960 e 1970, permitindo a medição de raios gama provenientes da desintegração natural do potássio ( $^{40}\text{K}$ ) e de elementos da série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e tório ( $^{232}\text{Th}$ ). A contagem de radiação é feita através de um espectrômetro pela medida de energia radioativa entre 0,41 e 2,81 MeV (**tabela 1**), onde cada elemento apresenta um pico energético dentro deste intervalo (**figura 2**) (Ribeiro et al., 2014).

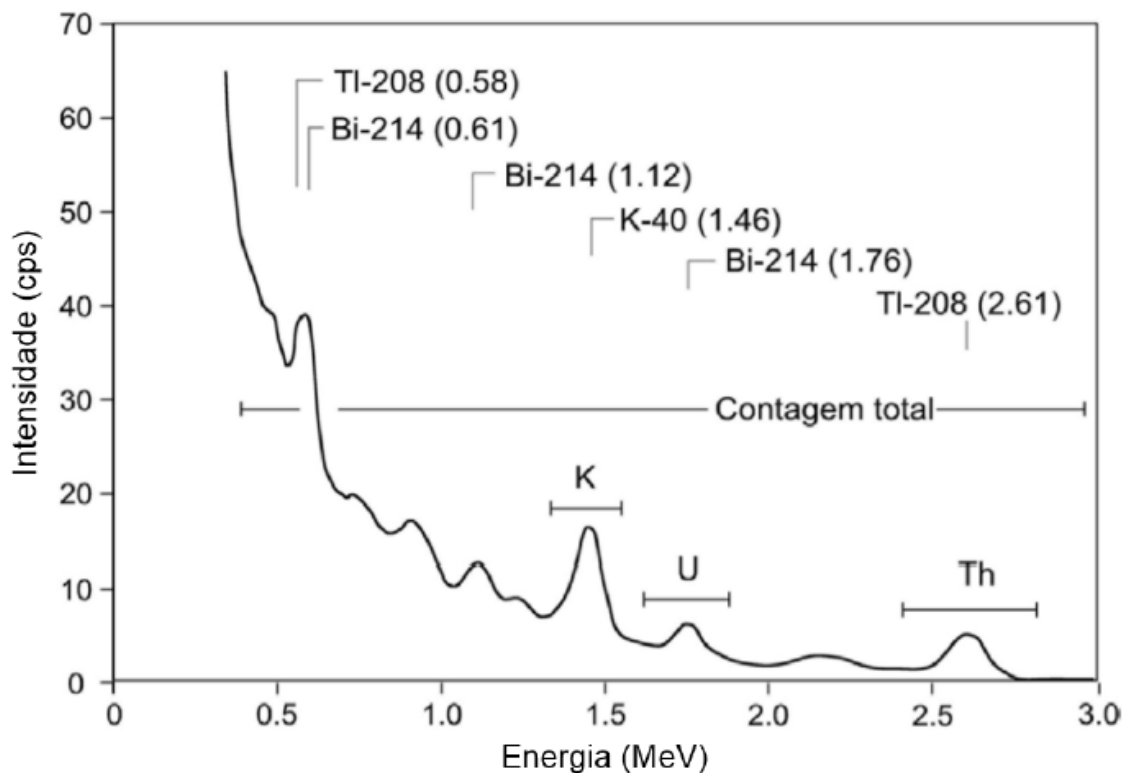
Os elementos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , apresentam uma faixa de energia de 1,66 a 1,86MeV e 2.41 a 2.81MeV respectivamente. Contudo, estes átomos não apresentam emissão de radiação gama, sendo sua medição decorrente dos elementos  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$  contidos em sua série de decaimento, com energias centradas em 1,76 e 2,61MeV, respectivamente. Desta forma, as concentrações de Th são geradas por estimativas, geralmente representadas na literatura como tório equivalente ou eTh (Ribeiro et al., 2014).

Tabela 1 - Valores da faixa de energia e os respectivos picos, em MeV, associados aos canais dos elementos radiométricos.

Canal	Faixa de Energia (MeV)	Pico (MeV)
Contagem Total	0,41 – 2,81	–
<sup>40</sup> K	1,37 – 1,57	1,46
<sup>238</sup> U	1,66 – 1,86	1,76
<sup>232</sup> Th	2,41 – 2,81	2,61

Fonte – Extraído de Valle (2021).

Figura 2 - Representação dos espectros de radiação gama, com a faixa de energia da contagem total e dos elementos radiométricos potássio (K), urânio (U) e tório (Th).



Fonte – Extraído de Valle (2021).

Segundo Jácomo et al. (2015), a concentração de elementos radioativos de <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th, ocorre principalmente em minerais como zircão, monazita, apatita,

allanita, esfero e pirocloro, muitos dos quais são resistentes ao intemperismo e podem se concentrar nas coberturas de alteração. O urânio se apresenta na forma  $U^{+4}$  e tem propriedades semelhantes a  $Th^{+4}$  e a  $ETRL^{+3}$ . A mineralogia dos carbonatitos compreende grande quantidade de minerais portadores de elementos radioativos da série de Th e U. Contudo, U se torna muito móvel em condições supergênicas podendo formar uma vasta gama de minerais de alteração. Desta forma, as respostas gamaespectrométricas no canal de eTh podem ser interessantes para caracterização destes corpos.

### 5.1.2. Magnetometria

A magnetometria permite medir anomalias no campo magnético terrestre causadas por corpos geológicos em subsuperfície. As rochas em geral não são magnéticas, contudo, alguns minerais presentes podem causar anomalias significativas (Kearey et al., 2009). Esses minerais correspondem a um pequeno grupo de óxidos de ferro e titânio, sendo mais comum a magnetita (série magnetita-titanomagnetita). O campo magnético total é a soma de várias fontes magnéticas, entre eles o Campo Magnético Terrestre, que possui magnitudes muito maiores que a causada pelas rochas. Desta forma, a pequena interferência no campo magnético total causada por estas, requer uma série de reduções para sua captação, como mostrado na equação 1.2:

$$F_{(Total)} = F_{(Alvo)} + F_{(Int)} + F_{(Ext)} + F_{(Indesejável)} \quad 1.1$$

$$F_{(Alvo)} = F_{(Total)} - F_{(Int)} - F_{(Ext)} - F_{(Indesejável)} \quad 1.2$$

Para a visualização de certas características geológicas, é necessária a aplicação de filtros que salientem tais atributos. A Primeira Derivada Vertical (FVD) é um gradiente do Campo Magnético Total (TMI) que é sensível a mudanças no sinal analítico em subsuperfície. Este filtro salienta estruturas como contatos, descontinuidades e lineamentos de altas frequências em detrimento daqueles de baixa frequência, ou seja, salienta estruturas mais rasas em detrimento daquelas

mais profundas. A operação de Redução ao Polo (RTP) transforma anomalias magnéticas inclinadas em regiões não polares em seus equivalentes polares (Dentith et al., 2014). Ao utilizar a RTP, esta ajusta os dados a uma condição de polarização vertical, observada nos polos magnéticos (Sumida, 2017).

### **5.1.3. Microscopia ótica**

A microscopia ótica, tanto de luz transmitida quanto refletida, constitui um método não destrutivo clássico e até hoje imprescindível no estudo de substâncias geológicas sólidas (cristalinas ou amorfas), pois além de permitir a determinação do material em estudo, é possível determinar características texturais não observáveis a olho nu que possibilitam determinar sua gênese. Desta forma, não pode ser substituída por outros métodos que utilizam amostras moídas para identificação de fazes minerais, ou de rochas total. Contudo, algumas limitações como determinação de minerais muito pequenos ou químicas minerais complexas ou precisas, condicionam o uso deste método em conjunto com outras técnicas não destrutivas, mas de maior resolução, como: Microscópio eletrônico de transmissão (MET) e o Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS) (Raith et al., 2011).

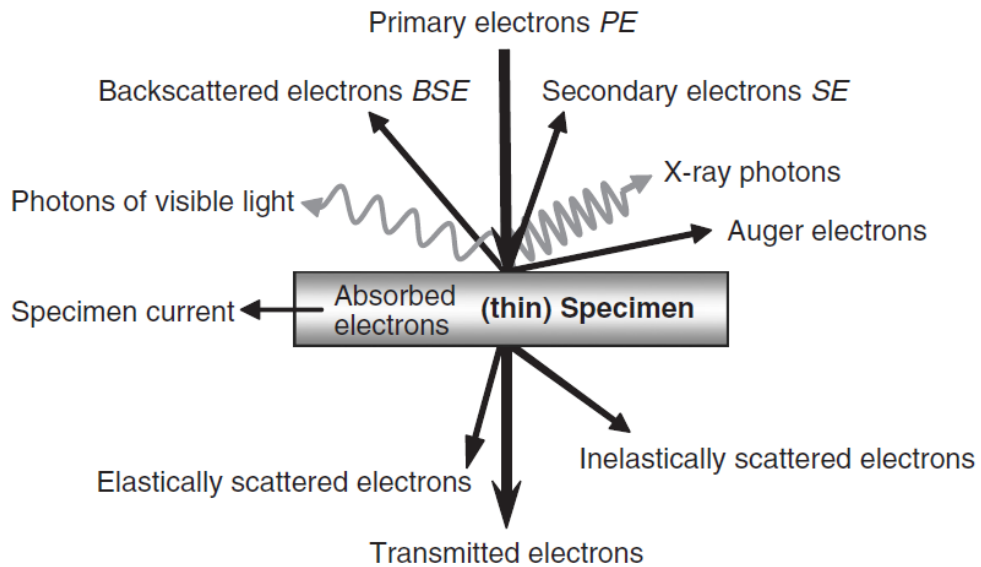
### **5.1.4. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

Segundo Stockes (2008), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica de grande importância e amplamente utilizada nas comunidades científica e tecnológica. O moderno microscópio eletrônico de varredura é capaz de obter imagens de detalhes da ordem de dezenas de Ångströms (sub-nanométricos), sujeitos aos limites das interações elétron-espécime.

O MEV combina imagens de alta resolução com uma grande profundidade de campo, graças aos comprimentos de onda curtos dos elétrons e sua capacidade de serem focalizados usando lentes eletrostáticas e eletromagnéticas. A forte interação dos elétrons com a matéria produz uma ampla variedade de "sinais" úteis que revelam todos os tipos de segredos sobre a matéria no nível microscópico e até mesmo nanoscópico. A **figura 3** mostra os sinais produzidos pelo MEV, os quais

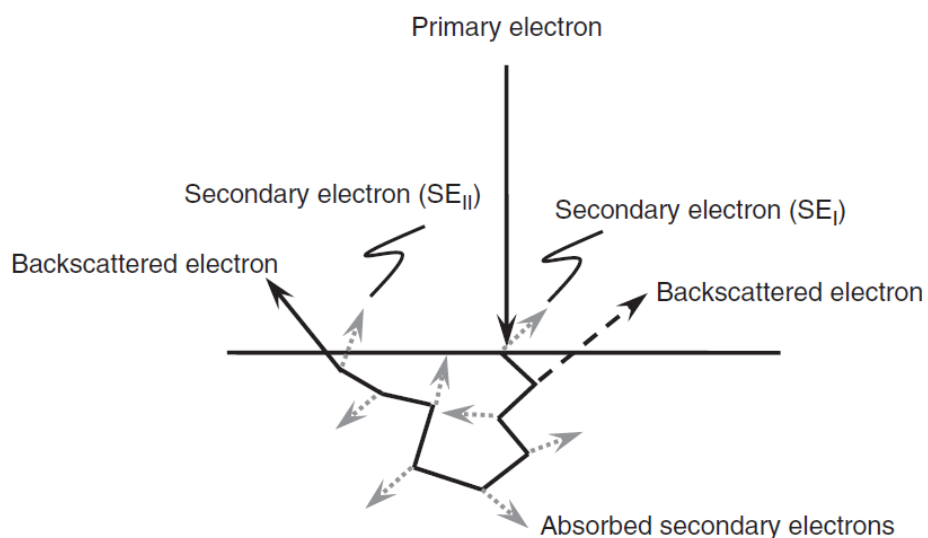
incluem os elétrons que são emitidos, também chamados de secundários, elétrons refletidos conhecidos como *back-scattered electrons* (BSE), elétrons transmitidos, fótons de raios-X e fótons de luz visível (Cátodo Luminescência), entre outros (Stockes, 2008). A **figura 4** mostra, de forma simplificada, o caminho que alguns tipos de elétrons percorrem.

Figura 3 - Tipos de sinais produzidos pelo MEV a partir de elétrons primários.



Fonte: extraído de Stockes, 2008.

Figura 4 – Diagrama esquemático mostrando o caminho dos elétrons primários e a emissão de BSE e elétrons secundários.



Fonte: extraído de Stockes, 2008.



Neste trabalho serão utilizadas imagens em tons de cinza geradas por BSE que refletem mudanças composicionais na região ionizada em estudo, onde: tons claros indicam porções constituídas por elementos com massa atômica relativamente mais pesada do que aqueles com tons mais escuros. Para o estudo de química mineral será utilizada a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) que permite uma análise qualitativa e semiquantitativa das amostras pela assinatura de absorção e emissão de cada elemento químico.

## 5.2. Estado da arte

### 5.2.1. Carbonatitos

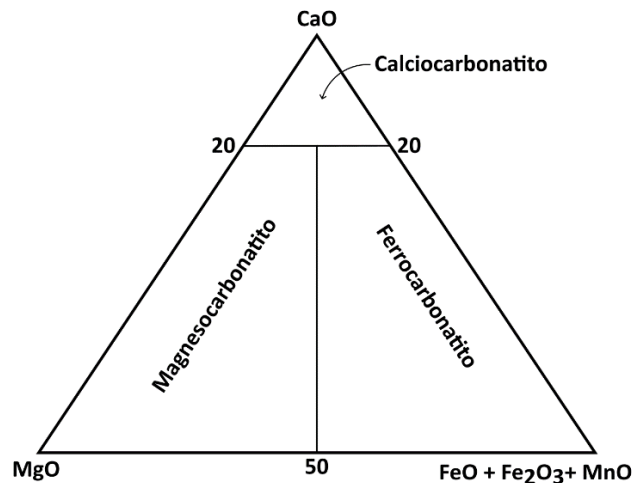
Carbonatitos são rochas ígneas plutônicas ou vulcânicas com mais de 50% de minerais de carbonato. Segundo Le maitre (2002) & Streckeisen (1979), essas rochas podem ser classificadas mineralogicamente da seguinte maneira:

- **Carbonatito Calcítico**, onde o principal mineral de carbonato constituinte é a calcita. Podem ainda ser subdivididos de acordo com a granulometria dos cristais, sendo chamado de **sövito** aqueles com granulometria grossa e **alvikito** aqueles de granulometria de média a fina.
- **Carbonatito dolomítico ou Beforsito**, onde o principal mineral de carbonato é a dolomita.
- **Ferrocronatito**, sendo os principais minerais constituintes aqueles ricos em Fe como a siderita e ankerita.
- **Natrocronatito**, sendo essencialmente composto por carbonatos de Na, K e Ca.

Carbonatitos compostos por cristais de granulometria muito finas para serem determinados ao microscópio, ou possuem soluções sólidas complexas, podem ser classificados quimicamente de acordo com a **figura 5** para carbonatitos com  $\text{SiO}_2 < 20\%$ . Rochas carbonáticas com  $\text{SiO}_2 > 20\%$  são chamados de **silicocronatitos** (Le Maitre, 2002).

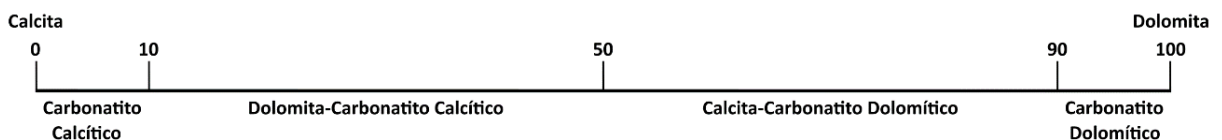
Carbonatitos com misturas de minerais de carbonatos seguem a classificação da **figura 6**. As classificações quanto a ocorrência de outros minerais permanece de forma semelhante as demais rochas ígneas.

Figura 5 - Classificação química de carbonatitos com  $\text{SiO}_2 < 20\%$  usando % em peso de óxidos (Woolley & Kempe, 1989). Carbonatitos com  $\text{SiO}_2 > 50\%$  são silicocarbonatos.



Fonte: extraído e modificado de Le Maitre (2002).

Figura 6 – Classificação de carbonatitos contendo misturas de minerais de carbonatos.



Fonte: extraído e modificado de Streckeisen (1979).

### 5.2.1.1. Morfologia e geotectônica

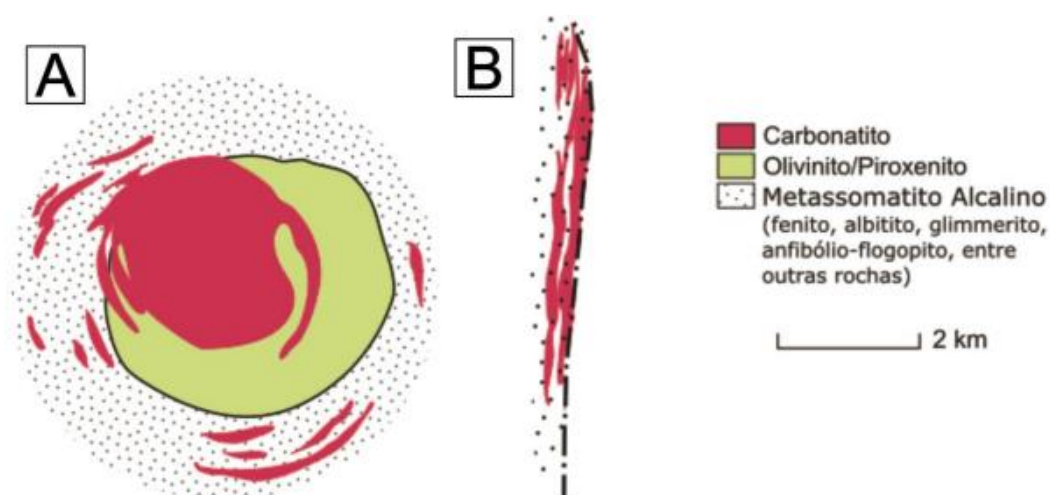
Segundo Lapin et al. (1988), complexos carbonatíticos<sup>1</sup> podem ocorrer em dois extremos principais diferenciados pela sua morfologia, sendo denominados

<sup>1</sup> Devido a grande quantidade de rochas ígneas e metassomáticas associadas aos carbonatitos, optou-se por denominá-los neste trabalho, no sentido *latu sensu*, como complexos carbonatíticos.

como do **tipo linear** e **tipo anelar ou central** (figura 7), os quais diferem muito entre si e refletem seu ambiente de formação:

- I. Os complexos do **tipo linear** possuem uma morfologia alongada e distribuem-se ao longo de falhas profundas, podendo alcançar dezenas de quilômetros de extensão. Sua disposição espacial, denota que estas rochas se formaram em um ambiente tectonicamente ativo, ou seja, antes da consolidação de um ambiente plataformal estável, e podem apresentar-se de forma vulcânica ou plutônica.
- II. Os complexos do **tipo central**, por outro lado, são caracterizados pela forma oval e pelo zoneamento concêntrico, e são compostos por rochas ultrabásicas, ultrabásicas alcalinas, básicas alcalinas e alcalinas, além de metassomatitos associados a intrusão. Ocorrem em porções centrais ou marginais de ambientes plataformais estabelecidos, e apresentam-se em formas de dique e veios anelares ou cônicos, *stocks* e *plugs*.

Figura 7 – Variedade morfológica dos complexos carbonatíticos: A) Complexos do Tipo Central. B) Complexos do Tipo Linear.



Fonte: Extraído de Morales (2017).

Segundo Kravchenko et al. (1988), a morfologia é a principal diferença entre os complexos carbonatíticos, pois está diretamente relacionada com a dinâmica e o ambiente tectônico da região de alojamento. Aqueles do tipo linear, por exemplo, formam-se em ambientes termodinamicamente estacionários devido ao alto fluxo de calor e ao gradiente de temperatura estável ao longo da zona de falha, permitindo uma diferenciação vertical com o desenvolvimento de fácies de temperatura definidas pela profundidade, e a ausência de rochas alcalinas associadas com a presença de apenas pequenas fusões reomórficas de composição sieníticas e nefelina-sieníticas. Por outro lado, aqueles do tipo central forma-se em um ambiente muito contrastante termodinamicamente, devido a intrusões de alta temperatura em uma crosta fria, que em conjunto ao baixo fluxo térmico permite uma grande diferenciação do fluido magmático, podendo permitir a geração das rochas alcalinas associadas.

Dados geológicos indicam que intrusões carbonatíticas podem ocupar grandes volumes em diferentes profundidades (variando de >10km até a superfície). As mineralizações, por sua vez, podem ocorrer ao longo de toda a extensão vertical, ou estarem associadas apenas a uma faixa de profundidade específica. Desta forma, no contexto de profundidade, os complexos carbonatíticos podem ser classificados em facies de profundidade como: facies vulcânica, sub-vulcânica, hipabissal, meso-abissal e abissal. Sendo aqueles do tipo central geralmente formados nas 4 primeiras fácies, enquanto aqueles do tipo linear são geralmente formados na fácies abissal. Portanto, as contrastantes diferenças entre os dois tipos de complexos carbonatíticos apresentados, permitem dizer que aqueles de zonas lineares não são considerados equivalentes àqueles do tipo central encaixados em zonas de falhas profundas, mas sim uma variedade completamente diferente com processos de formação próprios e fora das séries de diferenciação apresentadas para aqueles do tipo central (Kravchenko et al., 1988).

Estudos realizados por Lapin et al. (1988), nos complexos carbonatitos do tipo linear de Tatarskaya, Chernigov e Angico dos Dias, mostram que estas rochas estão: associadas as fazes de deformação de cinturões móveis, alojados em falhas de empurrão ou falhas profundas de alto ângulo ou em intersecções de estruturas

podendo apresentar arranjo em *Echelon*, em alguns casos. Além disso, possuem disposição concordante às rochas encaixantes, apresentam auréolas metassomáticas de fenitos com porções sienitas associadas a reomorfismo e possuem composições minerais relativamente simples apresentando uma única facies de profundidade (abissal).

#### **5.2.1.2. Mineralogia e texturas**

Carbonatitos, em geral, possuem uma mineralogia diversificada que inclui principalmente carbonatos (simples e/ou complexos), e uma vasta gama de minerais de fosfatos, óxidos e silicatos. A mineralogia essencial inclui calcita, dolomita, carbonatos de ferro e magnésio como siderita e ankerita, apatitas, vermiculitas, biotitas, magnetitas, piroxênios e monticellita, além de uma vasta mineralogia acessória (Gold, 1963). Embora calcitas e dolomita sejam os carbonatos principais e carbonatitos calcíticos ainda possuem um predomínio de cerca de 60% em relação as demais ocorrências do planeta, diversos outros carbonatos de composições diversas (Fe, Mg, Ba, Sr, Mn, Ca e ETRs leves) podem localmente ganhar espaço na mineralogia principal. Estudos realizados em diversos carbonatitos mostram que uma série de reações no sistema Ca e Mg pode ocorrer em diferentes pressões e temperaturas. Por exemplo, magmas dolomíticos primários tendem a ser equilibrados com o manto peridotítico e medida que ascendem e evoluem tendem a ser tornarem mais calcíticos devido a alteração metassomática com as rochas encaixantes do conduto ou com a diminuição da pressão que torna a dolomita menos estável (Alves, 2017; Chakhmouradian et al., 2016).

Com poucas exceções, as texturas dos carbonatitos são o resultado complexo de uma gama de processos que envolvem o magma parental, o conduto e as rochas encaixantes, fluidos derivados do magma ou de outras fontes e mudanças no regime tectônico durante e/ou depois do seu alojamento. Além disso, são muito mais reativos e suscetíveis a reequilíbrios químicos e texturais, assim como abrasão, fragmentação e cominuição de grãos, deformações dúcteis, dissolução e outras formas de interação física e química com fluidos, podendo ocorrer em pressões e temperatura mais baixas em relação as demais rochas ígneas. Apesar disso, os reequilíbrios dependem também do tamanho de grão, da taxa de resfriamento, do

fluido percolante e de característica que variam de um caso para o outro, como a composição do magma. Por isso, avaliação das texturas deve ser tratadas com certo cuidado, e de forma diferente das demais rochas ígneas (Chakhmouradian et al., 2016).

### 5.2.1.3. Gênese

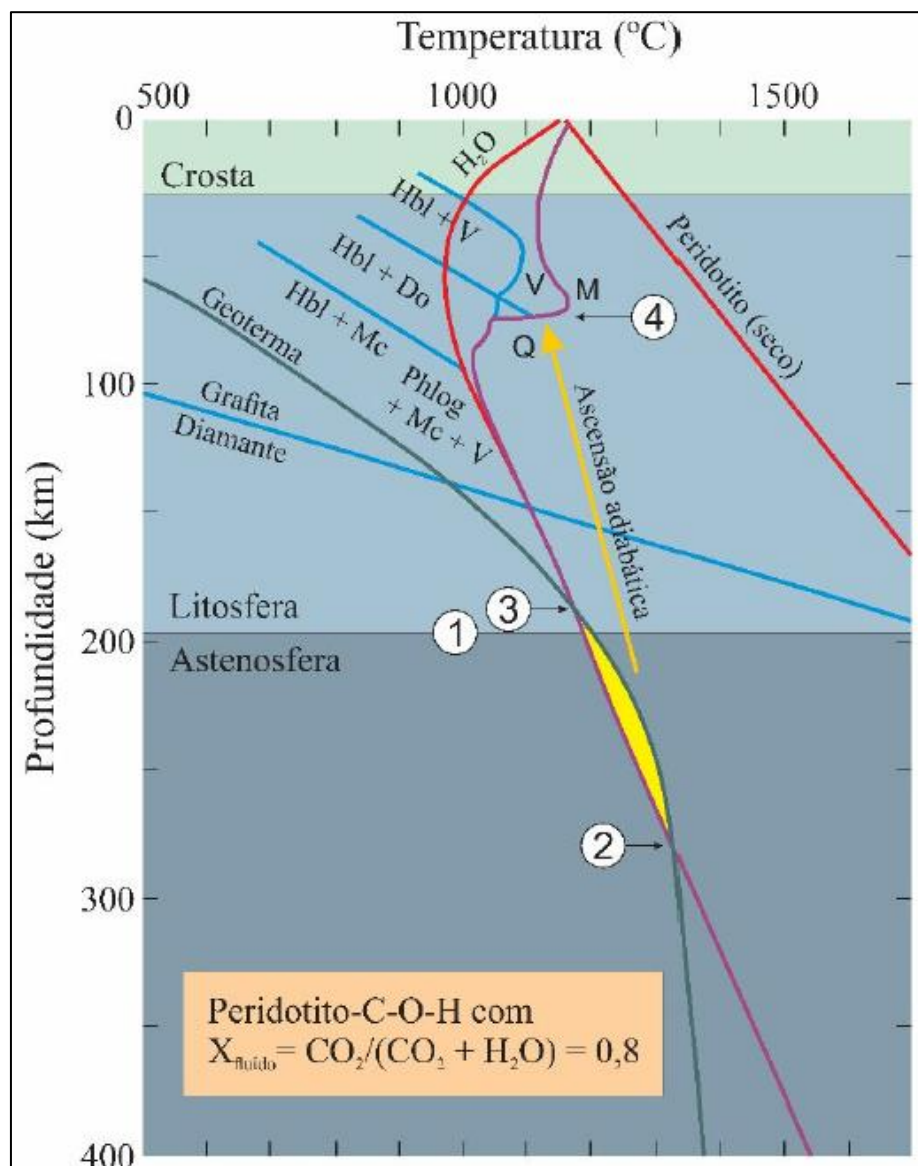
A forma como o carbono se encontra no manto depende da pressão, temperatura e fugacidade do oxigênio a qual é controlada pela concentração de ferro. No manto superior espera-se que o carbono se encontre na forma oxidada de CO<sub>2</sub>, já em maiores profundidades (60 - 150km) a forma esperada para o carbono é o carbonato (mineral ou fundido), dependendo do regime termal. Em profundidades superiores a aproximadamente 150km o manto é muito reduzido para o carbono oxidado e somente diamante ou fluidos C – H reduzidos são encontrados. Desta forma, a profundidade entre 60 e 150km corresponde às zonas onde os magmas carbonatíticos podem ser produzidos e metassomatizar o manto circundante, contudo esses limites podem mudar em alguns casos. Todo o CO<sub>2</sub> envolvido em fusões do manto é de origem superficial, desta forma, é necessário o envolvimento de outras litologias para o fornecimento de carbono, que ocorre através da tectônica de placas em zonas de subducção e convecção do manto (Alves, 2017).

Apesar de grandes controvérsias e pouco conhecimento sobre a gênese dos carbonatitos, Bogo (2020) cita três possibilidades de geração de magmas carbonatíticos no manto:

- I. Estudos realizados por Winter (2001) mostram que há a possibilidade de geração de magmas carbonatíticos através de fusões parciais **diretas do manto** de peridotitos-lherzolíticos sob condições oxidantes. Fases C-O-H podem existir como mistura de fluidos contendo H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>. A reação de silicatos com o CO<sub>2</sub> em função da P e T possibilita uma janela de fusão de magmas silicáticos e carbonatíticos (**figura 8**). Esses magmas tendem a se acumular na base da crosta ou aproveitar condutos que os possibilitem ascender. A desgaseificação gerada pela

crystalização possibilita o metassomatismo das rochas encaixantes e a evolução do magma. Magmas dolomíticos são mais compatíveis com o manto peridotítico, contudo com a diminuição da pressão e a evolução deste, tendem a se tornarem mais calcíticos (Chakhmouradian et al., 2016);

Figura 8 - Gráfico de temperatura versus profundidade mostrando a posição do peridotito-C-H-O (Vermelho) com razão  $\text{CO}_2/\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  igual a 0,8 extrapolada para altas pressões. A porção amarela entre os pontos 2 e 3 corresponde a possibilidade de fusão parcial do manto com uma fase carbonatada.



Fonte: extraído de Bogo (2020).

- II. A entrada de H<sub>2</sub>O na estrutura de anfibólios alcalinos no manto peridotítico hidratado causa a fusão precoce desses minerais e liberação de álcalis tendo como produtos primários da fusão nefelinitos e melilitos. A adição de CO<sub>2</sub> ao sistema aumentaria as condições prováveis de P e T para isso ocorrer. Desta forma, através da **cristalização fracionada** de fases não carbonatadas deste magma poderiam concentrar CO<sub>2</sub> na fase residual até o ponto de saturação do carbonato resultando em um líquido carbonatítico residual.
- III. A **imiscibilidade de líquidos** entre magmas silicáticos e carbonatíticos é fortemente dependente da pressão de CO<sub>2</sub> e pode ser alcançada juntamente através da fusão parcial, cristalização fracionada e desgaseificação / metassomatismo do magma parental.

#### 5.2.1.4. Fenitos e rochas associadas

Rochas carbonatíticas e alcalinas geralmente são encontradas próximas a auréolas de rochas encaixantes alteradas metassomaticamente em alta temperatura, chamadas de fenitos (Elliott et al., 2018). Rochas alcalinas também podem ser encontradas em complexos carbonatíticos, contudo, estão geralmente associadas aquelas do tipo central (**tabela 2**), aquelas associadas a complexos lineares geralmente são sienitos reomórficos (Lapin et al., 1988; Kravchenko et al., 1988). Estas auréolas de alteração apesar de geralmente não serem economicamente exploráveis, têm grande importância prospectiva, pois podem indicar presença de corpos carbonatíticos não aflorantes (Elliott et al., 2018).

Brögger (1921), definiu fenitização como o processo de metassomatismo alcalino associado a atividade ígnea geralmente alcalina. Carbonatitos não são reconhecidos geralmente como rochas alcalinas por conter baixos conteúdos de álcalis, contudo, a alcalinidade do magma parental pode ter sido perdida durante o processo de fenitização, (ver Le Bass (2008) no item **5.2.1.3.**) através de vários pulsos de fluidos ricos em álcalis, expelidos por magmas alcalinos ou carbonatíticos no momento de seu resfriamento (Elliott et al., 2018).



Tabela 2 - Sete principais litologias que acompanham os carbonatitos ao redor do mundo.

Litologia	Descrição
<b>Nefelinito-ijolito</b>	<b>Nefelinito</b> é uma rocha extrusiva ou hipoabissal de granulação fina ou porfirítica, primariamente composta de nefelina e piroxênio. <b>Ijolito</b> é uma rocha rica em nefelina e piroxênio, com conteúdo de nefelina entre 30 e 70%.
<b>Fonolitosienito feldspatoidal</b>	<b>Fonolito</b> é uma rocha constituída essencialmente por feldspato alcalino, feldspatoides e minerais máficos. (LE MAITRE, 2002)
<b>Traquitosienito</b>	<b>Traquito</b> é uma rocha vulcânica composta essencialmente por feldspato alcalino. Sienito é uma rocha plutônica que consiste principalmente de feldspato alcalino, com quantidades subordinadas de plagioclásio sódico, biotita, piroxênio, anfibólio e ocasionalmente faialita. (LE MAITRE, 2002)
<b>Melilitito-melilitolito</b>	Um grupo de rochas máficas, extrusivas/plutônicas, usualmente sem olivina, compostas por melilitito e augita ou outros minerais máficos que componham mais de 90% da rocha. Este tipo de rocha pode conter quantidades menores de feldspatóides, apatita, calcita, e em alguns casos plagioclásio e flogopita.
<b>Lamprófiro</b>	Grupo de rochas porfiríticas com minerais máficos (biotita, anfibólios, piroxênios) em uma matriz de feldspato alcalino. (LE MAITRE, 2002)
<b>Kimberlito</b>	Rocha ultramáfica composta por grandes quantidades de olivina serpentinizada e conteúdos variáveis de flogopita, ortopiroxênio, clinopiroxênio, carbonato e cromita. (LE MAITRE, 2002)
<b>Basanito</b>	Termo originalmente usado para um basalto porfirítico contendo fenocristais de piroxênio, posteriormente utilizado para designar um grupo de rochas compostas de clinopiroxênio, plagioclásio e olivina. (LE MAITRE, 2002).
<b>Ijolito</b>	Rocha composta por nefelina e piroxênio com um conteúdo de nefelina entre 30 e 70%. Rochas que contém mais de 70% de nefelina são classificadas como <b>urtitos</b> e aquelas com menos de 30% são denominadas <b>melteigitos</b> .

Fonte: extraído de Morales (2017).

Fenitos são geralmente caracterizados pela presença de feldspato alcalino, albita, piroxênios alcalinos e/ou anfibólios alcalinos e podem apresentar carbonatos e microminerais de ETRs e Nb. Podem ser classificados em potássicos, geralmente associados a carbonatitos calcíticos com cerca de 90% de feldspatos alcalinos, ou

sódicos e/ou sódico-potássicos com mineralogia mais variada. Contudo, a composição final dos fenitos dependem de características intrínsecas às rochas encaixantes, como mineralogia, textura, estrutura, porosidade e permeabilidade da rocha, e de características do fluido hidrotermal, como composição, temperatura e pressão (Le Bass, 2008; Elliott et al., 2018). Além disso, o grau de fenitização é controlado pelo contraste químico entre a rocha e o fluido de alteração, sendo mais intenso e efetivo em químicas contrastantes. O fluido hidrotermal pode aproveitar a distribuição de estruturas de alta permeabilidade e ocorrer de forma venulada, em stockworks ou brechas, levando a distribuição assimétrica de auréolas feníticas, mas respeitando essas as estruturas. Aproveitamento de espaços intercristalinos podem ocorrer também, tornando a rocha mais homogênea (Elliott et al., 2018).

### **5.2.2. Depósitos associados**

Os depósitos associados a complexos carbonatíticos podem ser gerados de forma magmática, metassomática ou estar concentrados em perfis de alteração supergênica. Aqueles de forma magmática são formados a partir da cristalização do magma que permite a concentração de minerais de minério, por outro lado, aqueles formados em auréolas metassomáticas estão relacionados a zonas feníticas geradas em função do magma carbonatítico. Aqueles relacionados a perfis supergênicos são gerados a partir alteração de complexos carbonatíticos - incluindo as zonas metassomáticas - que acaba por concentrar metais de interesse. (Richardson et al., 1996; Elliott et al., 2018; Mitchell, 2014).

De acordo com o Natural Environment Research Council (NERC, 2011), são conhecidos mais de 200 minerais que carregam consigo algum elemento de Terras Raras. Entretanto, os principais minerais fornecedores de ETR em volume econômico são xenotima, monazita e bastnaesita, sendo os dois últimos fonte predominantemente de ETRs leves. Martins et al. (2014) lembram que a xenotima, assim como algumas argilas portadoras de terras-raras adsorvidas sob forma iônica, produzem especialmente ETRs pesados. Segundo Mitchell (2014), atualmente existe cerca de 195 minerais portadores de Nb reconhecidos pela Associação Mineralógica Internacional (IMA), entre ocorrem óxidos e silicatos complexos, muitos

contendo vacâncias, grupos de hidróxidos e flúor e água. Dentro dos óxidos, os minerais principais são aqueles do grupo do pirocloro, da peroviskita ou wodiginta e da columbita-tantalita e como substituições em óxidos de titânio como ilmenita, rutilo e zircolinita. Em silicatos o Nb é concentrado principalmente por minerais do grupo da eudialita, sendo comum também a substituição em muitos titanossilicatos como esfeno, baotita, lamprofillita e chevkinita.

A concentração de ETRs (Verplanck et al., 2011) e Nb (Mitchell, 2014) pode ser explicada pela hipótese de que esses metais estão presentes no magma parental no momento da fusão parcial e que à medida que este evolui através da cristalização fracionada, poderia concentrar estes elementos na porção residual. Para depósitos de Nb, Mitchell (2014) explana que em magmas não evoluídos existem pouco minerais que podem incluir Nb em sua estrutura pela capacidade deste de formar ânions complexos ( $\text{NbO}_4^{3-}$ ;  $\text{NbO}_6^{7-}$ ;  $\text{Nb}_2\text{O}_6^{2-}$ ) e que não podem ser acomodados em sites de redes comuns de minerais como olivina, piroxênio, feldspato e carbonatos. Os depósitos de fosfatos estão relacionados a solos lateríticos em perfis de alteração supergênica como no caso dos complexos carbonatíticos alcalinos de Catalão em Goiás, os quais concentram os minerais mais resistentes ao intemperismo como apatitas (Fendley et al., 2021).

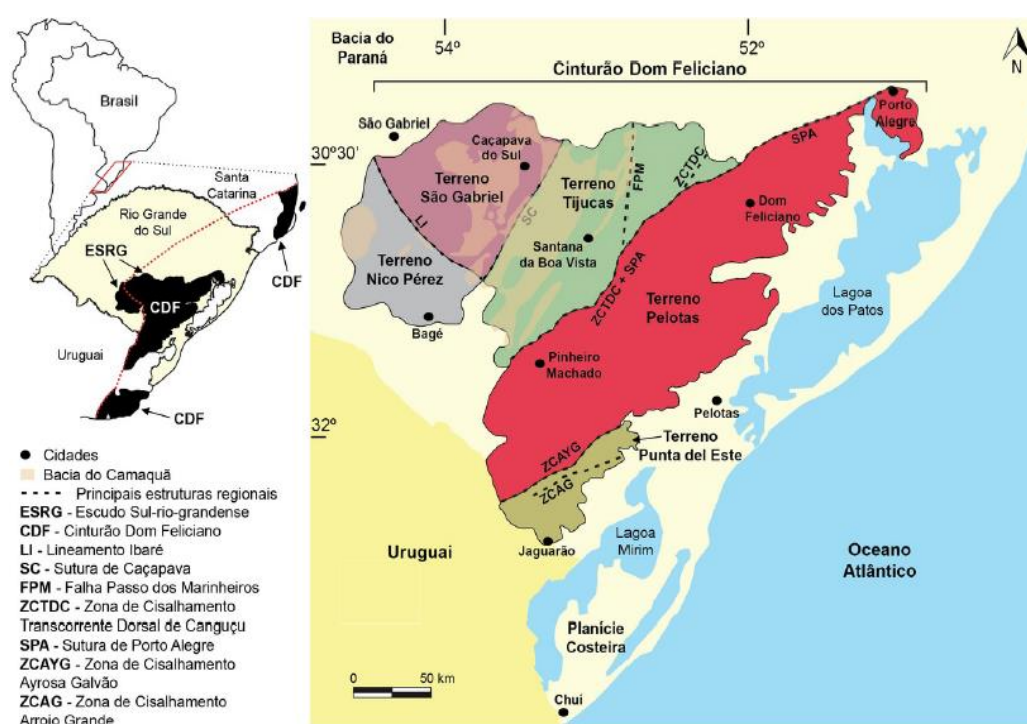
### **5.3. Contexto Geológico**

#### **5.3.1. Geologia regional**

A Província Mantiqueira (Almeida et al., 1981), possui uma área que se estende desde a Bahia até o Uruguai, totalizando cerca de 700km<sup>2</sup>. Esta província tectônica é constituída por um sistema orogênico formado durante o Ciclo Transamazônico (Paleoproterozóico, sendo posteriormente retrabalhado no Ciclo Brasileiro (Neoproterozóico). Pode ser dividida em três cinturões principais, sendo eles: o cinturão Araçuaí (norte), cinturão Ribeira (central) e cinturão Tijucas ou Dom Feliciano (Meridional). O Escudo Sul Riograndense (ESRG) compõe a porção meridional da província no estado do Rio Grande do Sul. Esta região é dominada pelos eventos Neoproterozóicos e pode ser compreendida como resultado dos eventos colisionais entre os crátons Kalahari e Rio de La Plata, os quais implicaram

em intensa acreção crustal, geração de bacias vulcanosedimentares, metamorfismo e intensa granitogêneses tardia (Chemale, 2000). O ESRS é particionado em cinco terrenos de acordo com seu significado geotectônico, sendo eles: Terreno Nico Pérez ou Taquarembó, Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas, Batólito Pelotas e Terreno Punta del Este (Ramos et al., 2018) (**figura 9**).

Figura 9 - Mapa geotectônico, ilustrando a disposição dos terrenos que compartimentam o Escudo Sul Rio-Grandense e as principais estruturas que os dividem.



Fonte: Extraído de Koester et al. (2021).

O Terreno São Gabriel (TSG), o qual se encontra a área de estudo deste trabalho, se mostra coberto à norte pela Bacia do Paraná e limitado a sudoeste e leste do terreno Nico Pérez, pelo lineamento Ibaré (LI), e a sudeste e leste do Terreno Tijucas, pela Zona de Cisalhamento/Sutura de Caçapava do Sul (SC). Este terreno é composto por três arcos magmáticos neoproterozóicos e complexos ofiolíticos remanescentes, sendo posteriormente recobertos por sequências vulcanosedimentares compreendidas pela Bacia do Camaquã e posteriormente intrudidas por granitos tardio a pós-colisionais (Philipp et al., 2016).

Segundo Bogo (2020), no ESRG afloram sete corpos carbonatíticos como mostrado na **tabela 3**, tendo todos eles potencial para fosfato ( $P_2O_5$ ). Estas intrusões podem ser divididas em dois grupos, um deles formado por carbonatitos deformados com presença de foliação e bandamento gnáissico (Três Estradas, Santa Clara, Picada dos Tocos e Passo Feio), e o outro por carbonatitos indeformados ou com deformação incipiente (Joca Tavares, Santa Inês e Porteira), o que segundo Chakhmouradian et al., (2016) é extremamente raro de ocorrer.

Tabela 3 – Coordenadas, bibliografias e idades definidas e estimadas das intrusões carbonatíticas do ESRG.

<b>Complexo Carbonatítico</b>	<b>UTM E</b>	<b>UTM N</b>	<b>Datum/ Zona</b>	<b>Referência Bibliográfica</b>	<b>Idade</b>
<b>Três Estradas</b>	767.719	6.577.362	SAD-69/ 21S	Monteiro (2020)	1.110±4,8 Ma, U-Pb em zircão (Bogo, 2020)
<b>Santa Clara</b>	763.221	6.579.044	SAD-69/ 21S	Aguia Resources Ltd. 2017	Sem datação. Estimada como Mesoproterozoico (Bogo ,2020)
<b>Picada do Tocos</b>	269.457	6.619.303	SAD-69/ 22S	Estimado a partir de Alves (2017)	603,2±4,5 Ma, U-Pb em zircão (Cerva-Alves et al., 2017)
<b>Passo Feio</b>	267.530	6.607.080	SAD-69/ 22S	Estimado a partir de Morales et al. (2019)	Sem datação. Estimada como Neoproterozoico (Cerva-Alves et al., 2017; Morales et al., 2019)
<b>Porteira</b>	228.612	6.564.885	SAD-69/ 22S	Aguia Resources Ltd. 2017	Sem datação. Estimada nesta tese como Neoproterozoico ou mais jovem
<b>Santa Inês</b>	231.006	6.566.546	SAD-69/ 22S	Aguia Resources Ltd. 2017	Sem datação. Estimada nesta tese como Neoproterozoico ou mais jovem
<b>Joca Tavares</b>	234.096	6.566.729	SAD-69/ 22S	Monteiro (2020)	Sem datação. Estimada nesta tese como Neoproterozoico ou mais jovem

Fonte: Extraído e modificado de Bogo (2020).

### **5.3.2. Geologia Local**

O contexto geológico local da área de estudo é dominado por duas unidades principais: o Complexo Metamórfico Passo Feio e o Complexo Granítico Caçapava do Sul como mostrado na **figura 1**.

#### **5.3.2.1. Suíte Granítica de Caçapava do Sul**

A suíte granítica Caçapava do Sul (SGCS) é caracterizada por um corpo ígneo de afinidade cálcio-alcalina alto-K, de proporções batolíticas e formato elíptico, com seu maior eixo disposto NE-SO, e cercado pelas rochas metamórficas do Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) as quais intrude (Bitencourt, 1983). A SGCS é composta por leucogranitos, monzogranitos, e granodioritos principalmente, com pequenas porções de tonalitos e quartzodioritos (Remus et al., 2000).

Ao redor do corpo, ocorrem diversos outros corpos graníticos, tratados por Ribeiro et al. (1966) como apófises do próprio batólito. A maior deles foi denominada pelos mesmos autores como Granito Santo Ferreira. Esta massa de forma elíptica em planta foi mais tarde formalizada por Ribeiro (1970) como um “stock”.

Esta suíte está incorporada na Associação Vulcano-Sedimentar-Plutônica Seival e representa os estágios tardios a Pós-Orogênicos do evento colisional Dom Feliciano que intrudiram o TSG (Philipp et al., 2016). Remus et al. (2000) propõe uma idade SHRIMP de  $562 \pm 8$  Ma para a SGCS, idades mais antigas, com de cerca de 620 Ma, foram interpretadas como xenocristais de zircões.

#### **5.3.2.2. Complexo Metamórfico Passo Feio**

O Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) é uma formação composta por uma sequência de rochas intensamente deformadas, dispostas em uma estrutura antiformal na qual o centro se encontra a SGCS (Bitencourt, 1983).

Remus et al. (2000) define o CMPF como uma formação de sucessões vulcanossedimentar metamorfozada com grau metamórfico variado sob condições de fácies xisto verde à anfíbolito, mas predominantemente sob fácies anfíbolito inferior,

constituída por ardósias, filitos, xistos pelíticos, xistos grafiticos, mármore, quartzitos, metaconglomerados, rochas cálcio-silicáticas, anfíbolitos, além da ocorrência subordinada de metabasaltos e xistos magnesianos.

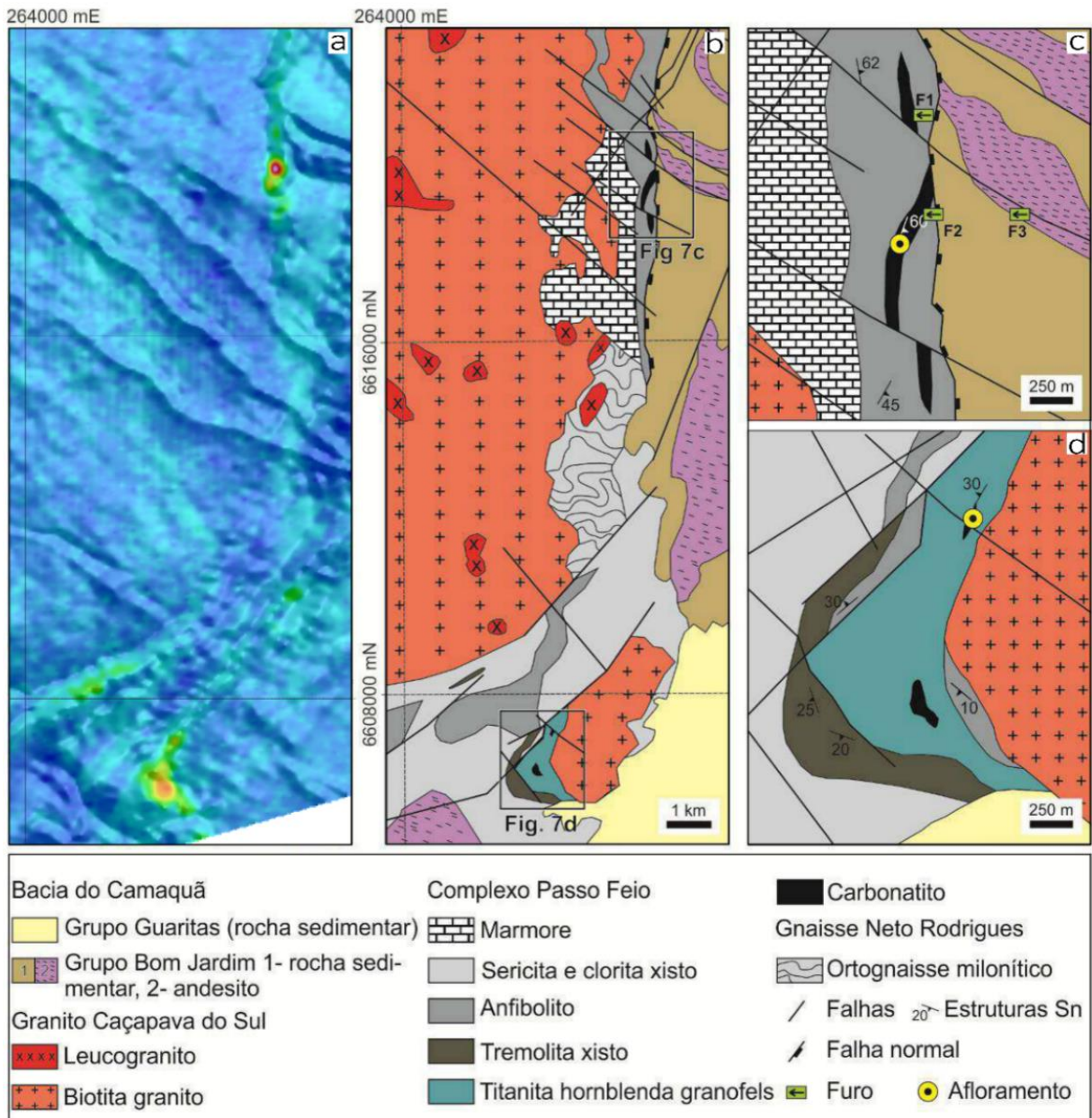
O CMPF é interpretado como um arco de ilhas de margem continental, originado no fechamento do Oceano Charrua (Philipp et al., 2016). Soliani Jr (1986) fornece três idades de K-Ar para este complexo metamórfico: 666 ±20 m.a. (rocha total – microdiorito), 593 ± 22 m.a. (rocha total – metabasalto) e 556 ±9 m.a. (muscovita – muscovita quartzito).

### 5.3.2.3. Carbonatitos

Os complexos carbonatíticos atualmente chamados de Picada dos Tocos (CCPT) e Passo Feio (CCPF), foram inicialmente descobertos pelo Grupo Mining Ventures Brasil (GMVB) no projeto Primavera. A descoberta do CCPT ocorreu através de geoquímica de solo, que acusou altos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, seguido de um mapeamento geológico e auxílio de cintilometria terrestre. Pesquisas geofísicas de gamaespectrometria na região próxima ao CCPT revelaram anomalias no canal de eTh semelhantes na porção sudeste do granito Caçapava, revelando a presença do CCPF. Estas rochas, estudados por Alves (2017) e Morales (2017), são hospedadas pela Formação Passo Feio e afloram nas porções leste e sudeste, muito próximo a área de estudo.

Segundo Alves (2017), o CCPT encontra-se inserido na zona de falha normal N-S, a qual define o contato entre o CMPF e o Grupo Bom Jardim. É formado por um corpo tabular com cerca de 2,2km de comprimento por 80m de largura mergulhando para sul (110°/40° a 60°) e concordante com o acamamento e xistosidade das rochas da região. O CCPF por sua vez, encontra-se controlado por falhamentos NE-SO e NO-SE com estruturas que sugerem um mergulho de 30° para noroeste. É formado por diques ou *sills* e encontra-se concordante com as estruturas da rocha hospedeira anfíbolítica (**figura 10**).

Figura 10 – a) Mapa gamaespectrométrico (eTh) e magnetométrico (RTP); (b) Mapa geológico da região (c) Complexo Carbonatítico Picada dos Tocos e (d) Complexo Carbonatítico Passo Feio.



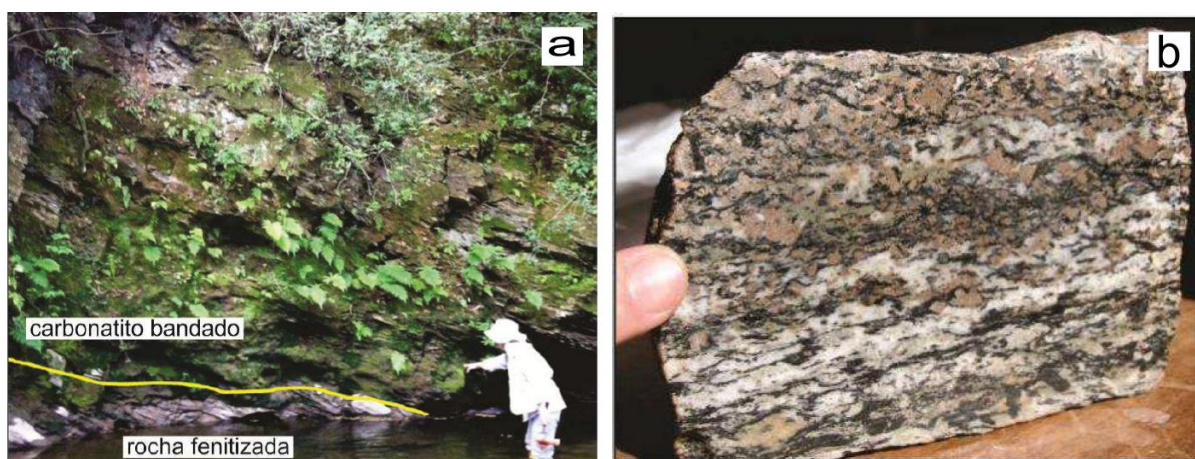
Fonte: extraído e modificado de Alves (2017).

Através de furos de sondagem foi possível observar que o CCPT se encontra encaixado em rochas classificadas como biotita anfibolito, com porções intensamente hidrotermalizadas com carbonatação da matriz e aumento significativo de apatita e magnetita, formando estruturas em stockwork em certos casos, caracterizando assim uma zona fenítica. No CCPF a rocha encaixante é homogênea



de coloração verde com textura fanerítica média, localmente grossa ou porfirítica, e megacristais de hornblenda e esfeno, classificada como titanita hornblenda granofels. Ocasionalmente foram encontrados blocos próximos ao contato com os carbonatitos com porções albitizadas caracterizando uma fenitização sódica **figura 11**. Devido à escassez de afloramentos os contatos foram de difícil demarcação. A presença de poucas zonas fenitizadas pode indicar corpos pequenos ou magmas muito indiferenciados (Alves, 2017).

Figura 11 - a) Fotografia do afloramento de carbonatito Picada dos Tocos, ilustrando o contato entre a camada de carbonatito e a rocha fenitizada. b) fotografia de uma amostra de granada-titanita hornblenda granofels albitizado (fenitização sódica), coletada próximo ao contato com o carbonatito Passo Feio.



Fonte: extraído de Alves (2017).

As estruturas e texturas observadas através da petrografia microscópica no carbonatito Passo Feio variam de maciço a fortemente foliado, com uma leve porosidade formada por espaços de cerca de 0,7mm. A mineralogia é composta por apatitas, flogopitas e tremolitas, rodeados por uma massa carbonática que ora preenche fraturas, e pela presença de opacos preenchendo cavidades. As camadas máficas que intercalam com os carbonatos é composta principalmente por tremolitas. Através das análises em MEV-EDS foi possível observar que os carbonatos são predominantemente calcíticos caracterizando a rocha como um alvikito. Além disso, foram identificados cristais de monazitas-(Ce), aeschynita-(Ce),

zircões, sulfetos de Fe associados a óxidos de Fe-Ti e sulfatos de Ba (Morales, 2017). O CCPT é composto por duas fases principais. A primeira é formada por alvikitos de coloração rosa com predomínio de calcita, tendo como minerais acessórios e traço: apatita, magnetita, ilmenita, rutilo, zircão, badeleita, barita, torita, pirocloro e minerais de elementos terras raras como monazita, pirocloro rico em Nb e Th, bastnaesita e allanita. Pirita, calcopirita, clorita, hematita, quartzo e biotita também estão presentes em diferentes proporções, na matriz ou como stockwork. A segunda é formada por beforitos composta por aproximadamente 80% de dolomita e possui os mesmos minerais acessórios e traço descritos nos alvikito (Alves, 2017).

A idade SHIRIMP de  $603,2 \pm 4,5\text{Ma}$  obtida para o CCPT e estimada para o CCPF (Neoproterozóico) (**tabela 3**), os enquadra em um evento mundial magmático alcalino pós-colisional, entre 650 e 500Ma, descrito por Veevers (2004, 2007), como associações entre carbonatitos, granitos tipo A e nefelina sienitos relacionados a sistemas de arcos, em ambientes de riftes extensionais. Segundo o mesmo autor, no Rio Grande do Sul, eventos magmáticos pós colisionais incluem magmatismo alcalino saturado (sienitos) a supersaturados (granitóides e alcali-gnaisses), e rochas alcalinas isoladas (granitos tipo A a sienogranitos). Podendo haver, portanto, alguma relação genética entre os carbonatitos descritos e as rochas alcalinas acima citadas (Alves, 2017).

## **6. MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente trabalho foi organizado em etapas de pré-campo, etapas de campo e etapas pós-campo. Contudo, este não foi um trabalho linear e as diversas etapas se intercalaram com o avanço do trabalho e à medida que o conhecimento da região de estudo aumentou, assim como deve ser um trabalho de prospecção. Mesmo assim, os tópicos foram divididos de forma a facilitar a leitura.

### **6.1. Atividades pré-Campo**

#### **6.1.1. Revisão bibliográfica**

Assim como em qualquer trabalho de prospecção a revisão bibliográfica é fundamental, pois permite o conhecimento prévio da área de estudo e as possíveis

técnicas para atacar qualquer alvo com maior assertividade. Através do estudo de artigos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses e capítulos de livros foi possível entender melhor as características geológicas da região e das rochas carbonatíticas, além de atentar o autor para indicadores prospectivos, como rochas metassomáticas e anomalias geofísicas características. Desta forma, a revisão bibliográfica foi o ponto inicial deste trabalho que se perdurou até sua conclusão, pois muitas dúvidas e novas publicações surgiram durante a pesquisa. No final, procurou-se comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriores aplicados na região, para a melhor interpretação dos dados.

### **6.1.2. Análise geofísica**

Carbonatitos apresentam uma mineralogia muito variada como apresentado no item **5.2.1.2** deste trabalho. Grande parte dessa mineralogia possui presença de elementos radioativos, e emissores de raios gama, em sua composição, como as apatitas, monazitas e outros fosfatos, além de zircões. Devido a boa resposta dos carbonatitos ao método da gamaespectrometria, principalmente no canal de eTh, este foi empregado no planejamento de campo e na escolha das áreas de estudo.

### **6.1.3. Planejamento do trabalho de campo**

Cada atividade de campo, tanto para mapeamento geológico quanto para coleta de solo, foi previamente planejada principalmente em ambiente SIG, através de softwares como ArcGis, QGis e Google Earth também. Desta forma, foram realizadas elaboração de malhas para coleta de solo, rotas de acesso, delimitação de vegetação densa, reconhecimento de afloramentos e de drenagens e determinação da dinâmica de campo. Vale salientar que este também foi um trabalho contínuo, pois com à medida que o estudo avançou e novos dados foram coletados em campo, foram necessárias outras abordagens e novos planejamentos para as atividades de campo seguintes.

Todo o projeto foi realizado com a utilização do datum WGS84 e com o sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) na zona 22J.

## 6.2. Atividades de campo

As atividades de campo incluíram o mapeamento geológico de todas as áreas de estudo com a coleta de amostras de rocha. Também foi realizado uma coleta de solo com o intuito de auxiliar no mapeamento de rochas não aflorantes.

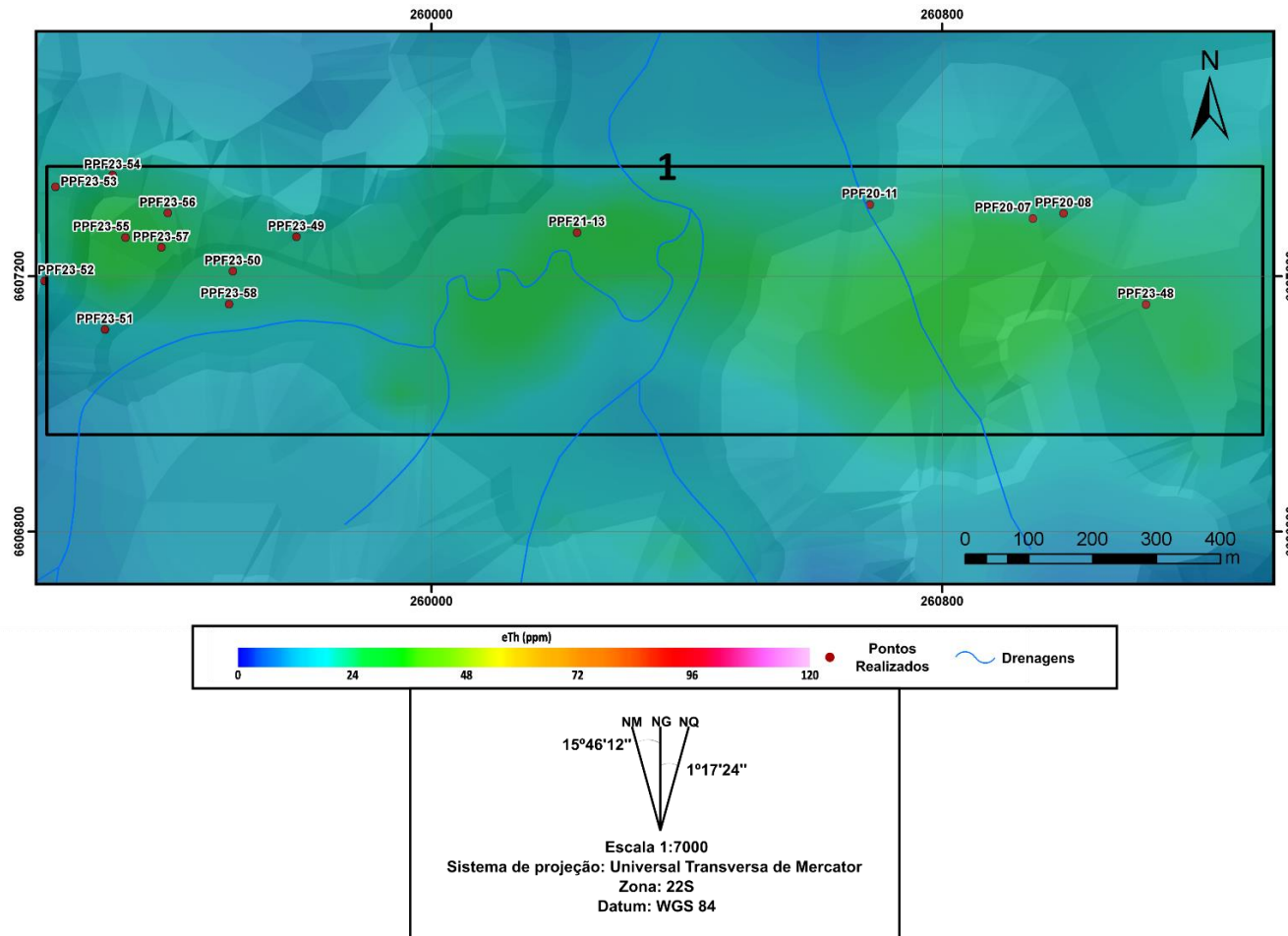
### 6.2.1. Mapeamento geológico

O mapeamento geológico foi realizado em uma escala de detalhe de mais ou menos 1:10.000 nas quatro áreas de estudo. Foi realizado um caminhamento irregular limitado pelas anomalias gamaespectrométricas de eTh totalizando 83 pontos. Além disso, foram realizados 2 pontos na região do carbonatito passo feio para reconhecimento. As **figuras, 12, 13, 14 e 15** mostram a distribuição dos pontos realizados no mapeamento de campo em cada uma das áreas de estudo.

Todos os pontos possuem o prefixo “PPF” e uma distância não inferior a 50m entre eles descontando zonas de contato. O principal critério para a realização de pontos foi a presença de afloramentos, sendo realizado apenas uma pequena quantidade de pontos de controle. Em cada ponto marcado foram descritas a geomorfologia, vegetação e a litologia (quando presente), foram também coletadas amostras de rocha para descrição macro e micro em laboratório. Cada amostra coletada foi devidamente embalada e catalogada incluindo o ano da coleta. As amostragens repetidas em um mesmo ponto foram catalogadas com uma letra do alfabeto como sufixo. Além disso, estruturas de foliação e fraturas foram medidas quando presentes em afloramentos *in situ*. Toda esta etapa foi realizada com auxílio de cadernetas de campo, mapas impressos, martelos petrográficos, bússolas e softwares como Avenza Maps e Google Earth.

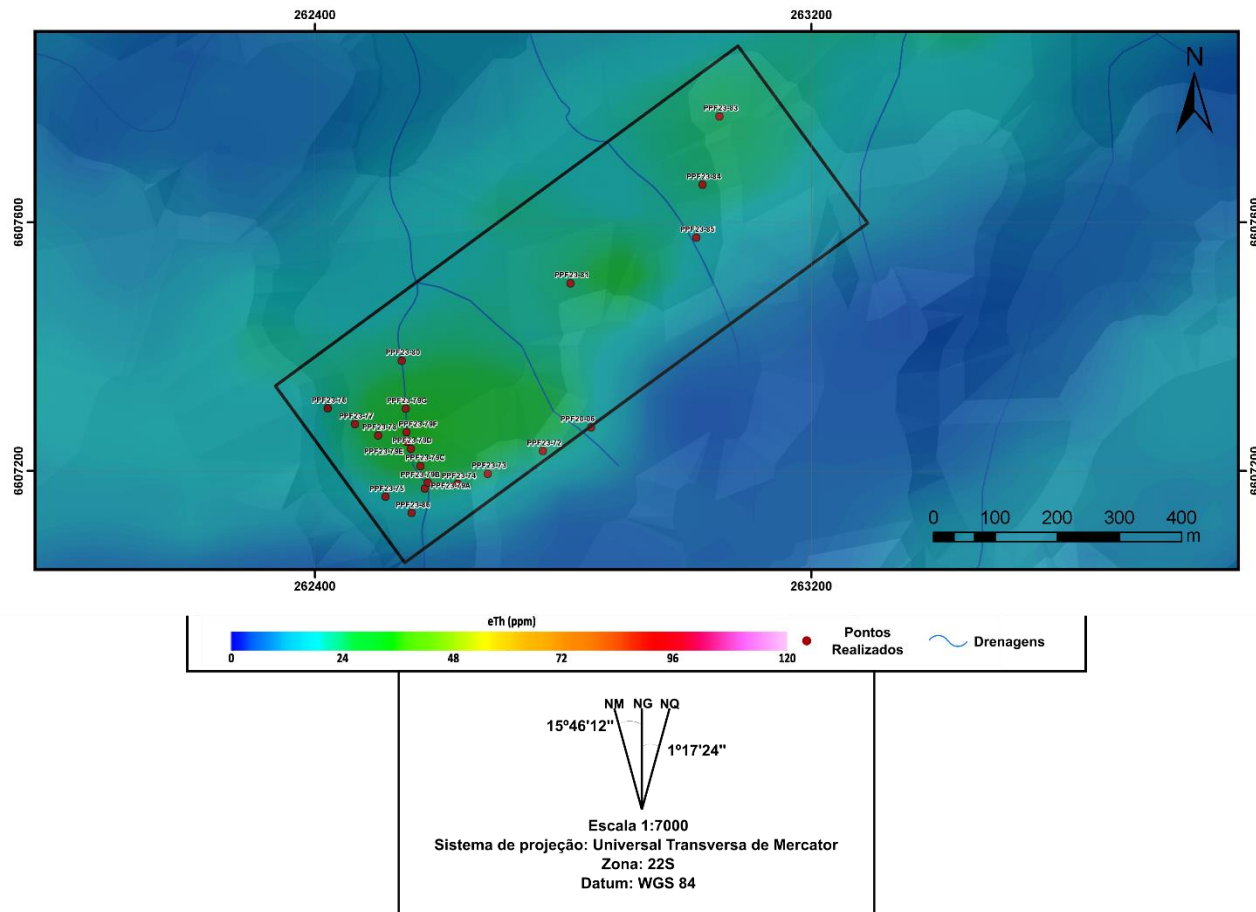
Vale salientar que a área 1 já possuía um mapeamento parcial prévio elaborado pelo GMVB. Desta forma, foi realizado um mapeamento na região oeste da área (**figura 16**) e coletadas algumas amostras nas demais porções apenas para validação das litologias previamente mapeadas.

Figura 12 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 1 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



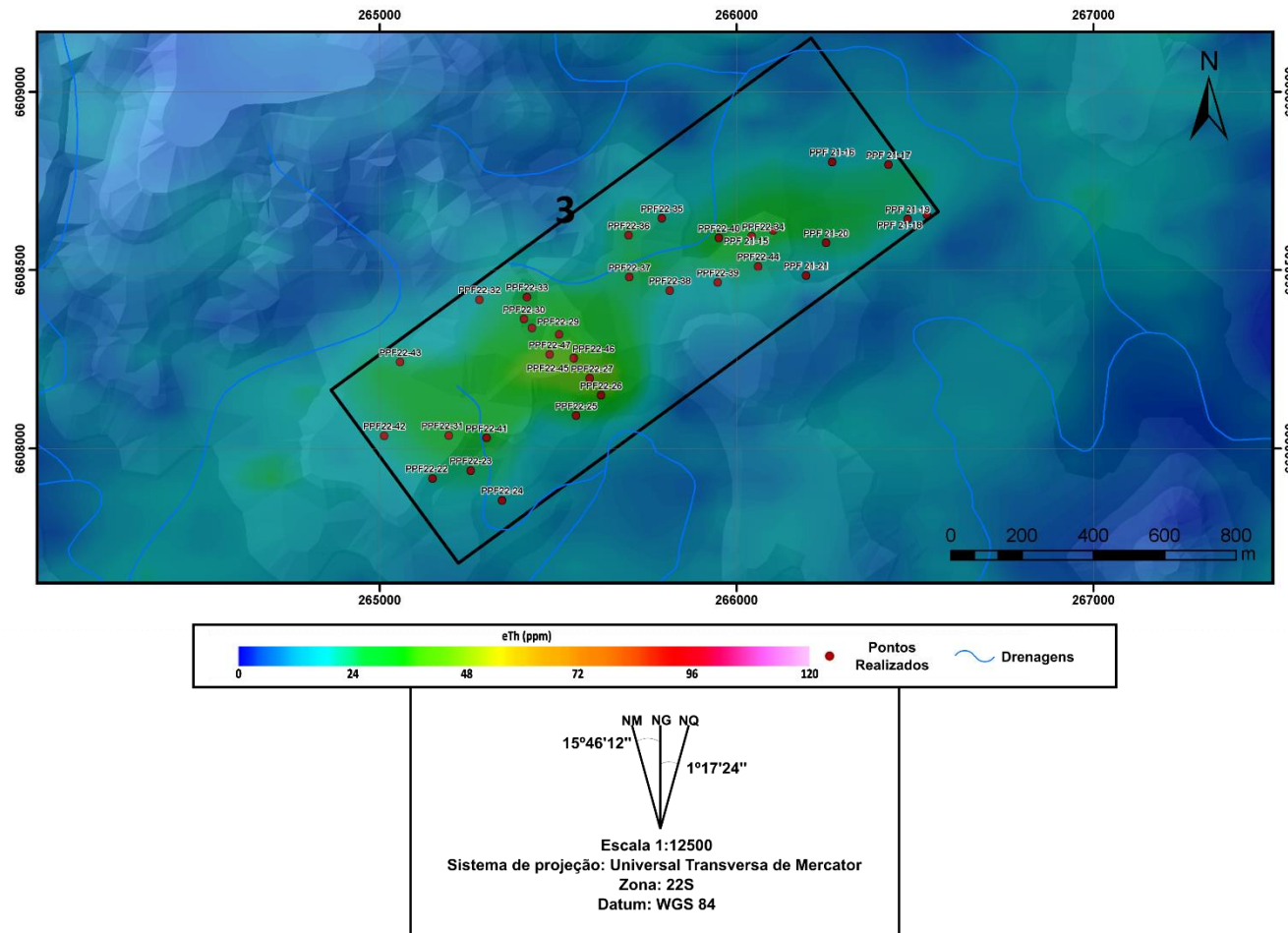
Fonte: autor.

Figura 13 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 2 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



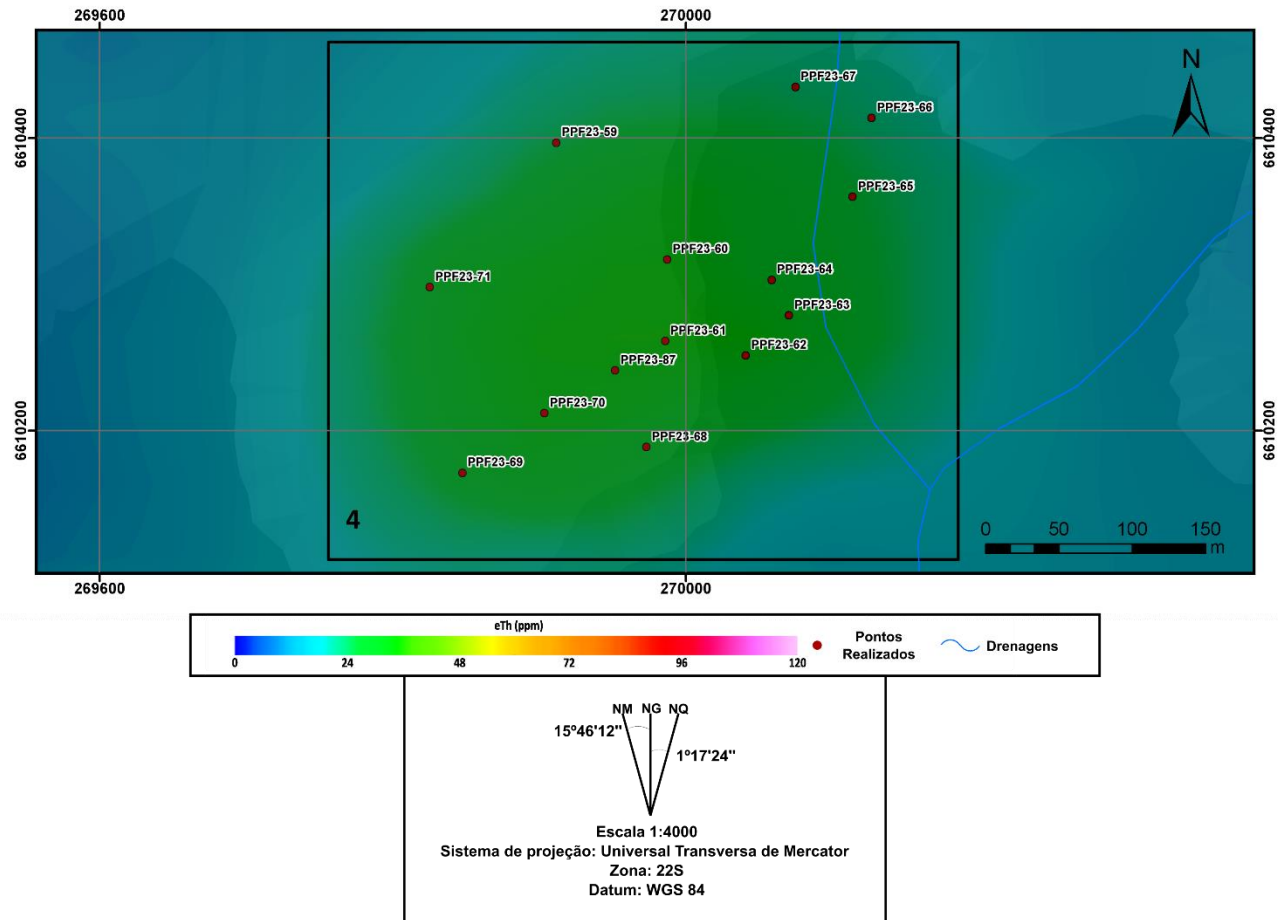
Fonte: autor.

Figura 14 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 3 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



Fonte: autor.

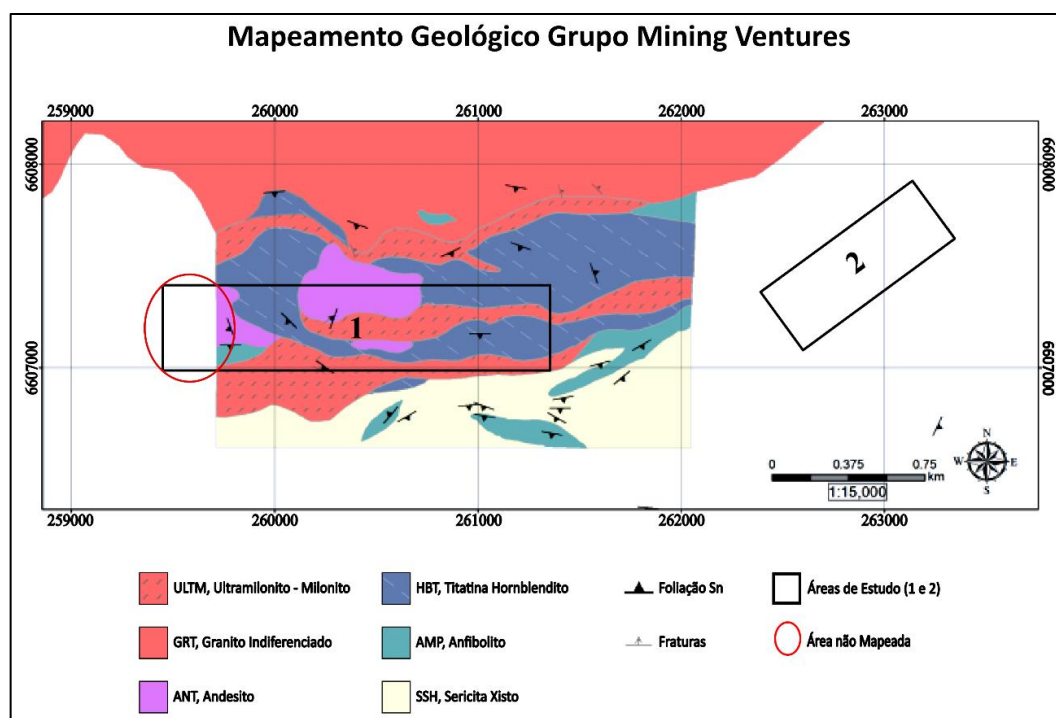
Figura 15 – Mapa de pontos do mapeamento geológico realizado na área 4 em conjunto com imagem gamaespectrométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



Fonte: autor.



Figura 16 – Mapeamento geológico realizado pelo Grupo MVB. Os polígonos pretos mostram as áreas 1 e 2, o círculo vermelho mostra a parte ainda não mapeada.

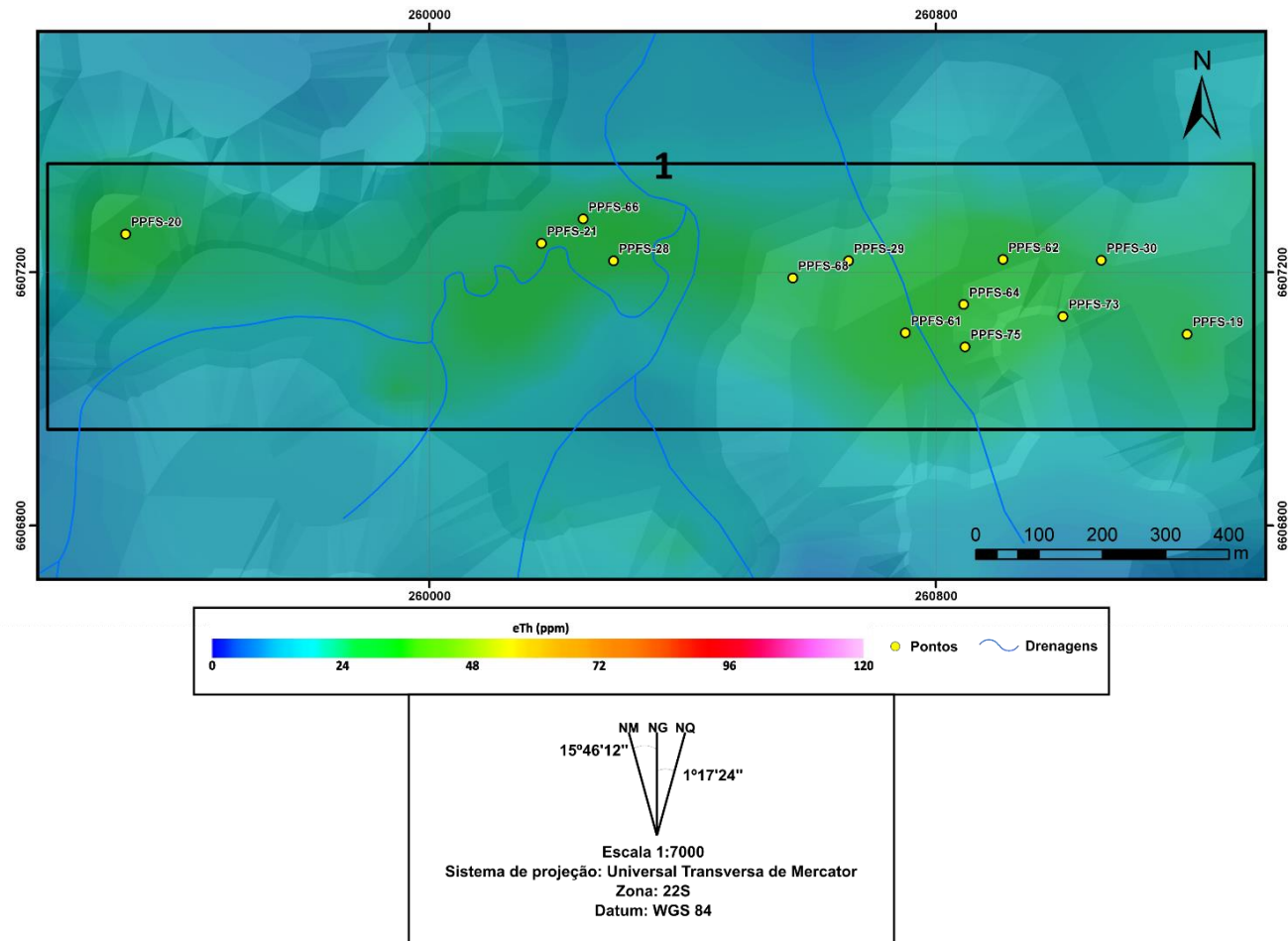


Fonte: extraído e modificado de Rocha et al. (2013).

### 6.2.1.1. Coleta de solo

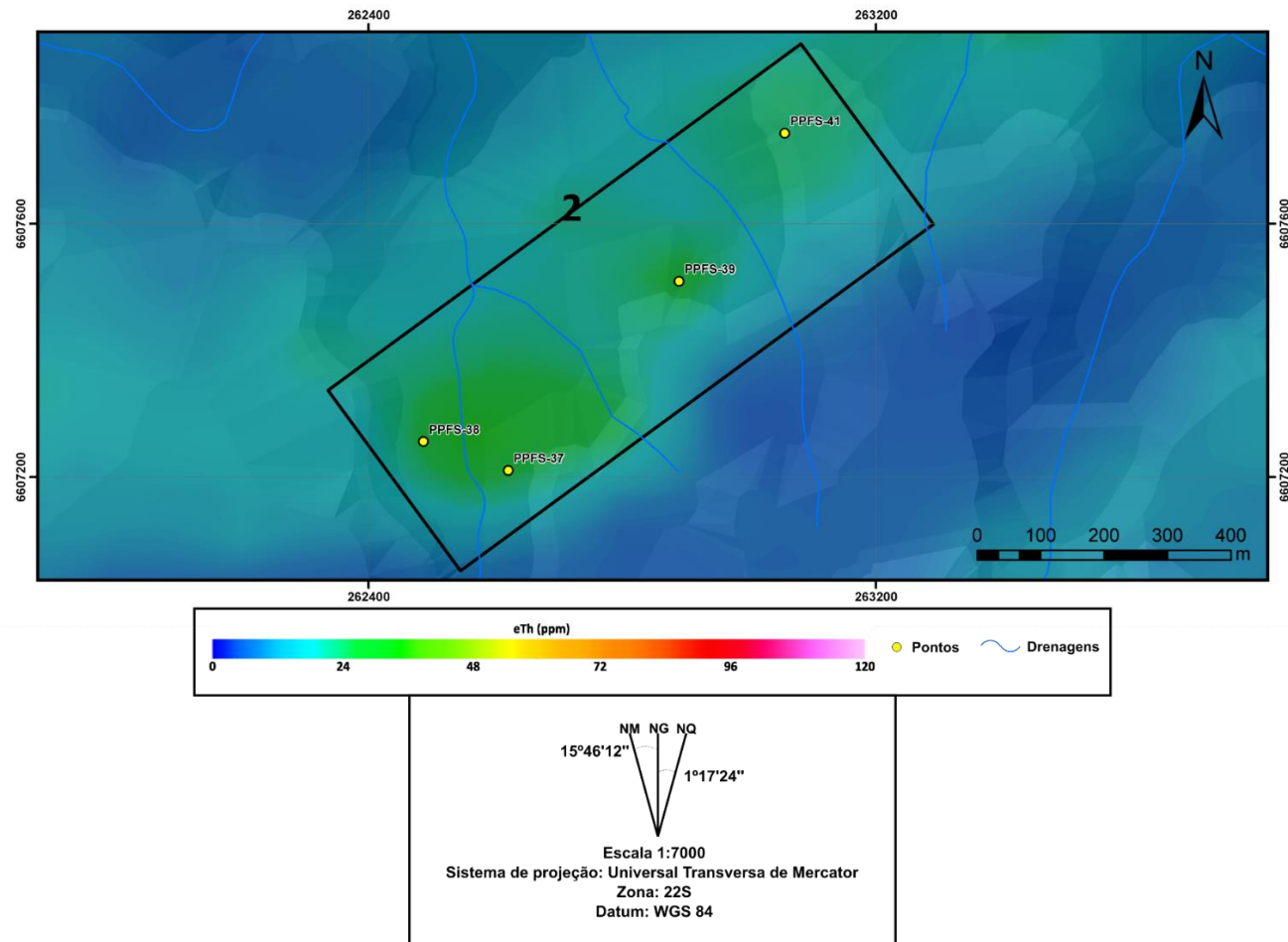
A coleta de solo foi realizada com diferentes metodologias para cada área de estudo, elaboradas pelas diferentes condições de acesso e o conhecimento litológico prévio da área. Na área 1, primeira a ser abordada pelo estudo, foram coletadas 46 amostras em 20 pontos de forma a contornar e acompanhar a anomalia gamaespectrométrica de eTh (**figura 17**). A área 2 foi a de mais difícil acesso devido a grande quantidade de zonas de lavoura, desta forma, foram coletadas 6 amostras em 4 pontos na tentativa de abranger ao máximo os locais de eTh anômalos (**figura 18**). Para a área 3 foi realizado um mapeamento geológico prévio com a identificação das principais atitudes geológicas, desta forma, optou-se pela coleta de solo em 3 perfis perpendiculares as camadas de foliação das rochas totalizando 9 pontos com a coleta de 11 amostras (**figura 19**). Na área 4 foram realizados dois perfis perpendiculares, devido à falta de conhecimento estrutural, procurando abranger toda a região anômala em eTh, foram coletadas 10 amostras em 6 pontos (**figura 20**).

Figura 17 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 1 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



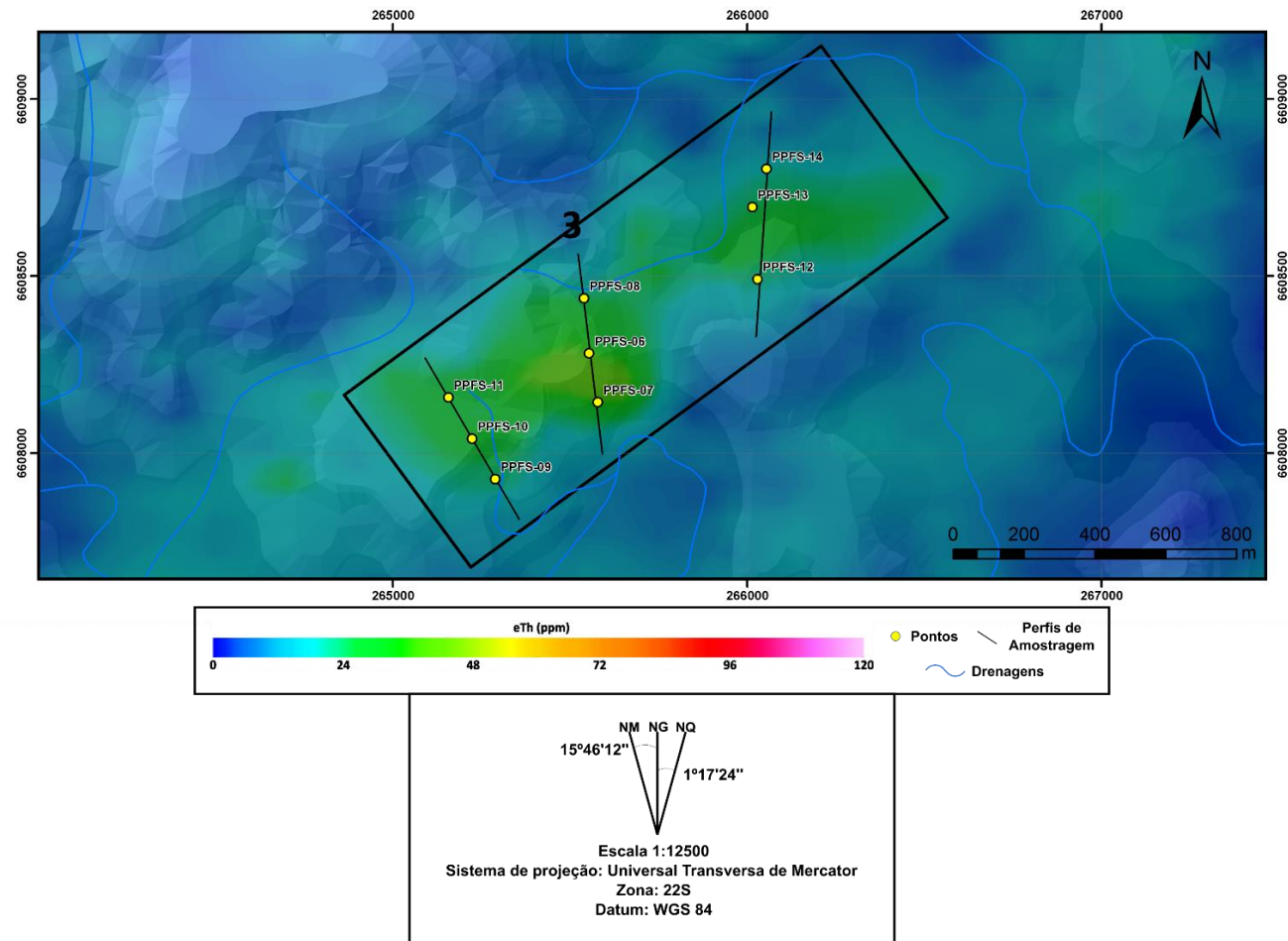
Fonte: autor.

Figura 18 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 2 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



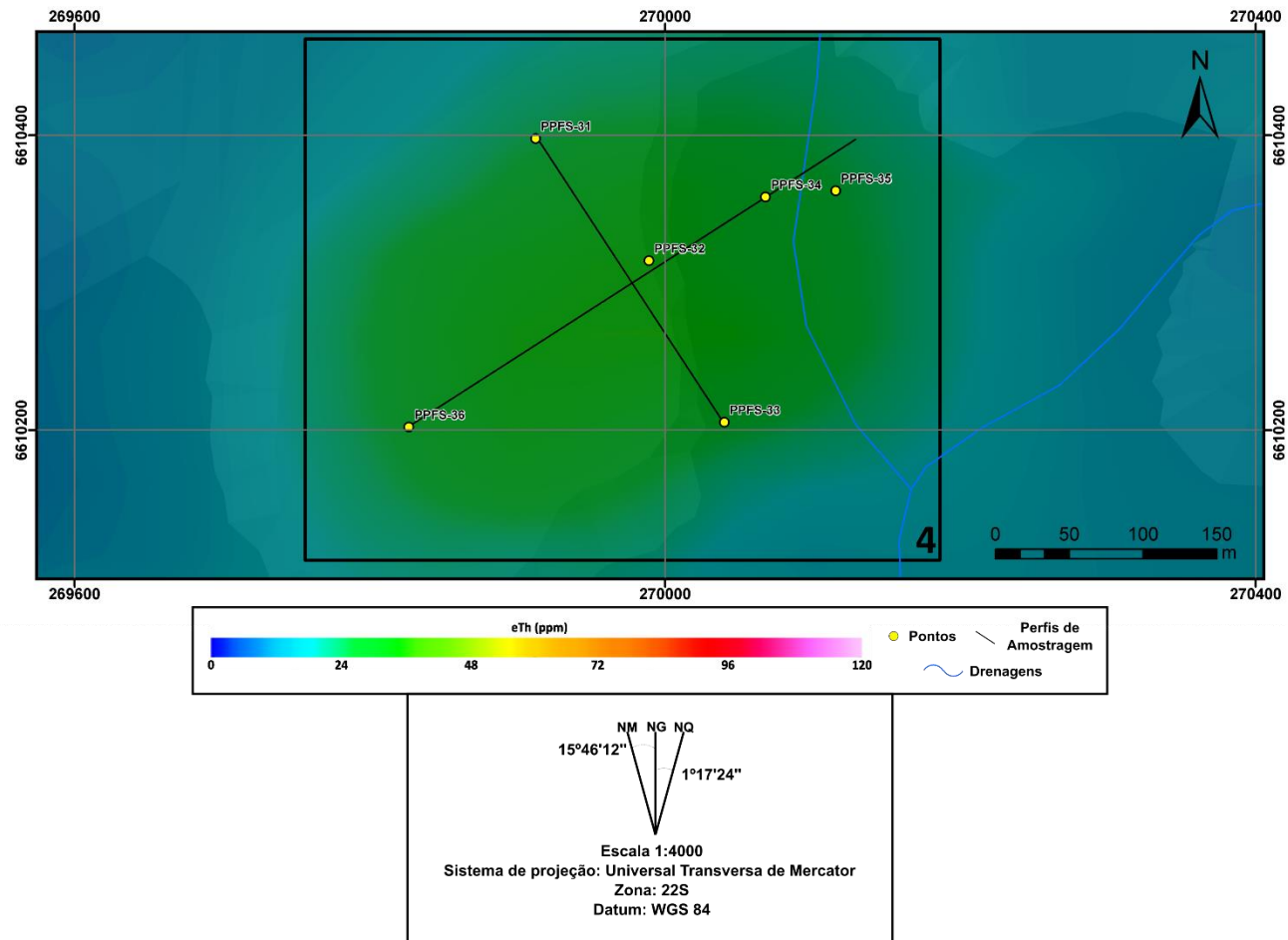
Fonte: autor.

Figura 19 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 3 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado..



Fonte: autor.

Figura 20 – Mapa de pontos de amostragem de solo realizada na área 4 em conjunto com imagem gamaespectométrica no canal de eTh e relevo sombreado.



Fonte: autor.

Cada ponto de amostragem recebeu uma identificação com o prefixo “PPFS”. Todas as amostras foram embaladas em sacos plásticos e identificadas segundo o ponto de amostragem junto a um sufixo A, B ou C do ponto mais raso ao mais profundo, respectivamente. Para a coleta de amostras foi utilizado um trado manual de metal, o qual foi limpo com álcool a cada coleta (**figura 21**). Também foi realizada a retirada da matéria orgânica e as primeiras porções do solo, para uma análise mais fidedigna da litologia em subsuperfície. Para o controle de amostragem em campo, foi utilizada uma planilha para apontar a profundidade final da amostra, coordenadas, vegetação e relevo de cada ponto, além de possíveis estruturas importantes. Foi levado em conta uma tolerância de cerca de 20m de diferença entre a localização do ponto coletado e o ponto de amostragem planejado.

Figura 21 – Realização de amostragem de solo com trado manual.



Fonte: autor.

### **6.3. Atividades pós campo**

Esta etapa envolveu todas as atividades de tratamento e preparação de amostras para análise e toda a elaboração e apresentação dos resultados, além da, interpretação dos dados gerados.

### 6.3.1. Descrição macroscópica

Todas as amostras coletadas em campo foram descritas macroscopicamente em laboratório e classificadas, totalizando 94 amostras (**figura 22**). Após esta etapa, cada amostra foi fotografada e registrada. Para classificação litológica procurou-se utilizar as mesmas terminologias utilizadas no mapeamento geológico do GMVB (Erro! Fonte de referência não encontrada.) com algumas modificações: os anfibolitos e titanita-hornblenditos foram ambos classificados somente como anfibolitos e os sericita-xistos como xistos micáceos.

Figura 22 – Amostras coletadas em campo e descritas macroscopicamente.



Fonte: autor.

### 6.3.2. Confecção e descrição lâminas delgadas

A partir das descrições macroscópicas foram confeccionadas 14 lâminas delgadas das litologias consideradas mais importantes para o trabalho. Todas as lâminas foram descritas em microscópio petrográfico de acordo com seus aspectos mineralógicos, estruturais e texturais. A descrição microscópica auxiliou no entendimento e classificação das litologias de interesse através de uma visão mais detalhada.

### 6.3.3. Estudo de química mineral

A partir das descrições microscópicas foram selecionadas 8 amostras de interesse para o estudo de química mineral em MEV-EDS. As amostras selecionadas foram principalmente de rochas com presença de carbonatos ou com

indícios de zonas feníticas. A preparação de amostras para esta etapa envolveu o polimento de cada lâmina e a marcação de minerais de interesse para análise no equipamento MEV-EDS. Posteriormente as amostras foram metalizadas com ouro no Laboratório de Isotopia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde também foram analisadas. Ao todo foram realizados quatro dias de análises em um total de 8 lâminas.

#### **6.3.4. Confeção do mapa geológico**

Os mapas geológicos foram confeccionados integrando os vários dados obtidos durante o estudo. Estes dados são compostos por imagens geofísicas de levantamentos de magnetometria e gamaespectrometria realizados pelo GMVB no projeto Primavera, pelas descrições de caderneta, descrição de amostras coletadas e dados estruturais medidos em campo. Além disso, na área 1 foi utilizado também o mapeamento mostrado na **figura 16**.

A maioria dos contatos geológicos foram aferidos pela meia distância entre os pontos, levando em consideração a anisotropia das rochas observada em campo.

#### **6.3.5. Perfis geológicos**

Foram confeccionados dois perfis geológicos interpretativos na área 2 de direção praticamente N-S. Ambos os perfis foram construídos sem exagero vertical. Também foi realizada a conversão para o mergulho aparente das estruturas observadas em campo.

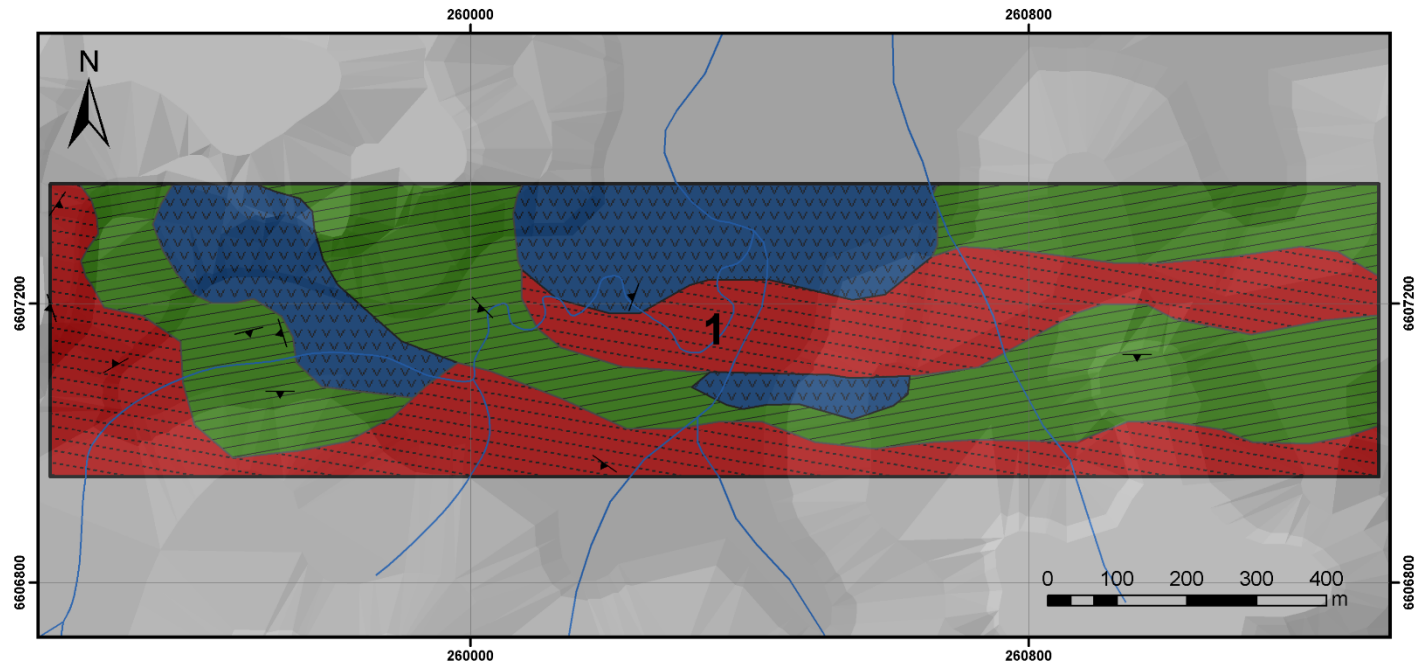
## **7. RESULTADOS**

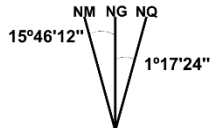















### **7.1. Mapeamento Geológico**

As **figuras 23, 24, 25, e 26** mostram os mapas geológicos confeccionados para cada uma das áreas de estudo a partir da interpretação dos diversos dados obtidos. Os dados obtidos durante todo estudo possibilitaram determinar a presença de 4 litologias sendo elas: granitos ultramilonizados, anfibolitos, micaxistos e andesitos.



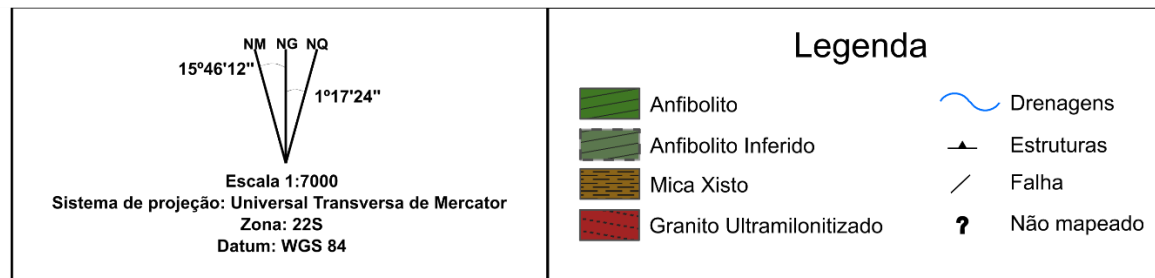
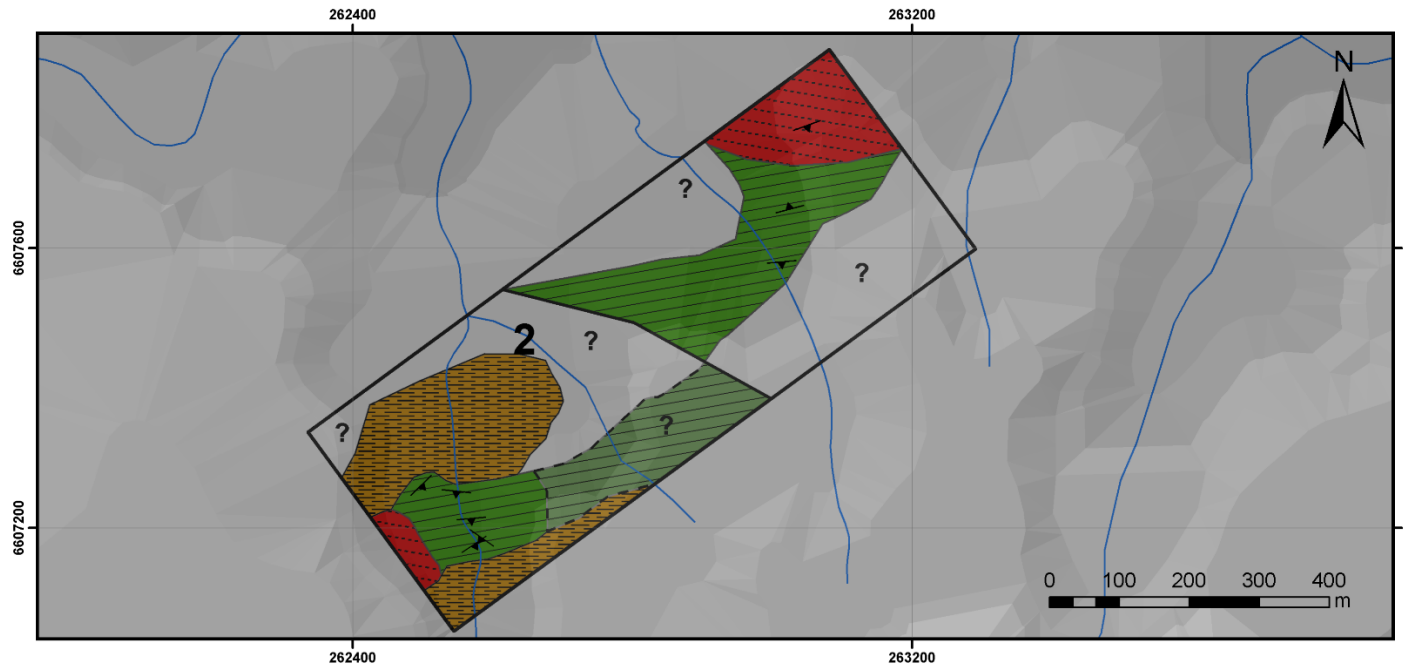
Figura 23 – Mapa geológico da área 1 com relevo sombreado.



 <p>Escala 1:7000 Sistema de projeção: Universal Transversa de Mercator Zona: 22S Datum: WGS 84</p>	<h3>Legenda</h3> <table><tr><td> Andesito</td><td> Drenagens</td></tr><tr><td> Anfibolito</td><td> Estruturas</td></tr><tr><td> Granito Ultramilonizado</td><td></td></tr></table>	 Andesito	 Drenagens	 Anfibolito	 Estruturas	 Granito Ultramilonizado	
 Andesito	 Drenagens						
 Anfibolito	 Estruturas						
 Granito Ultramilonizado							

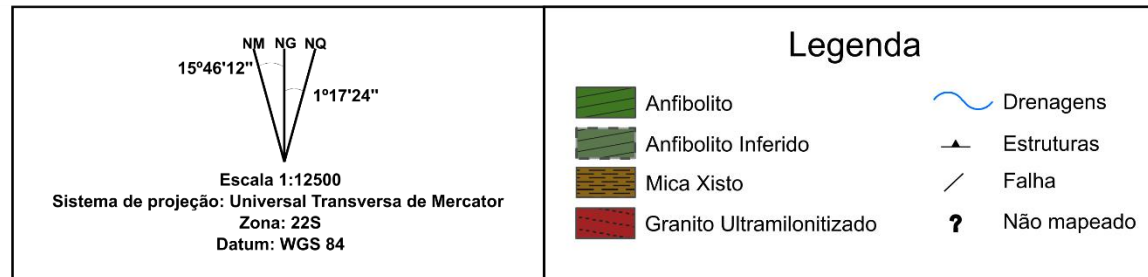
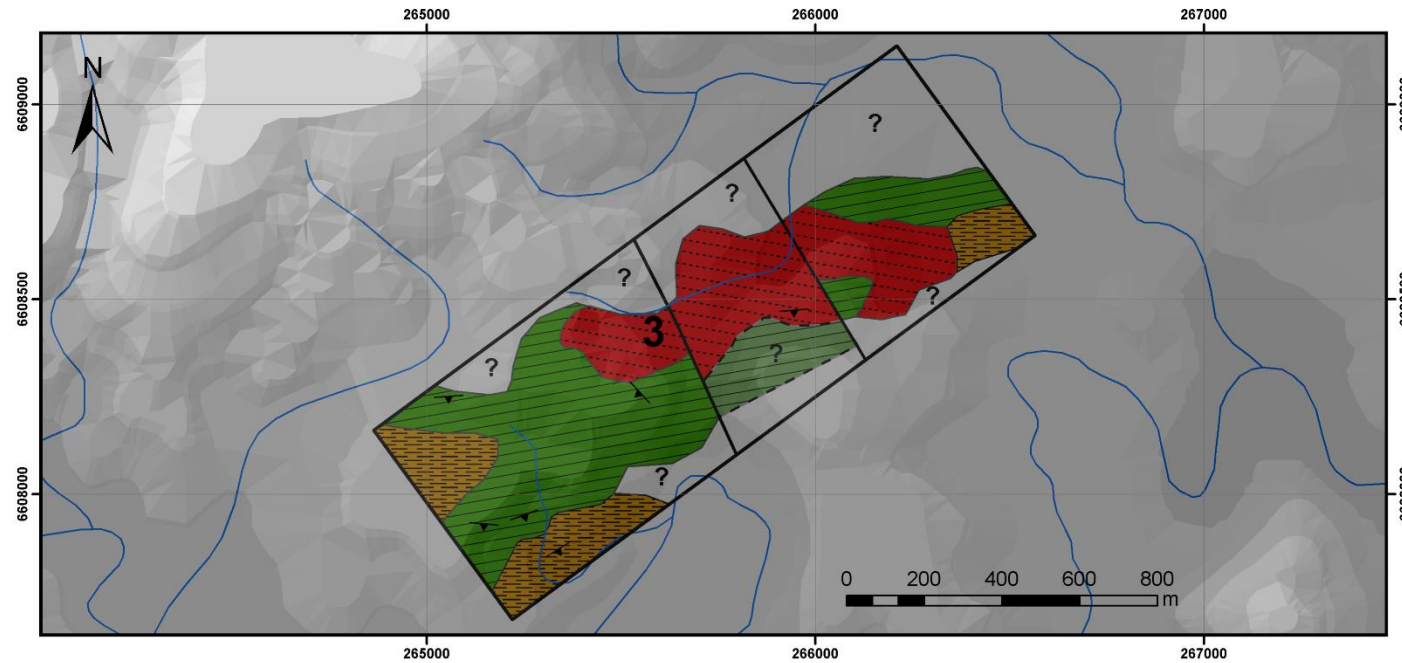
Fonte: autor.

Figura 24 – Mapa geológico da área 2, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.



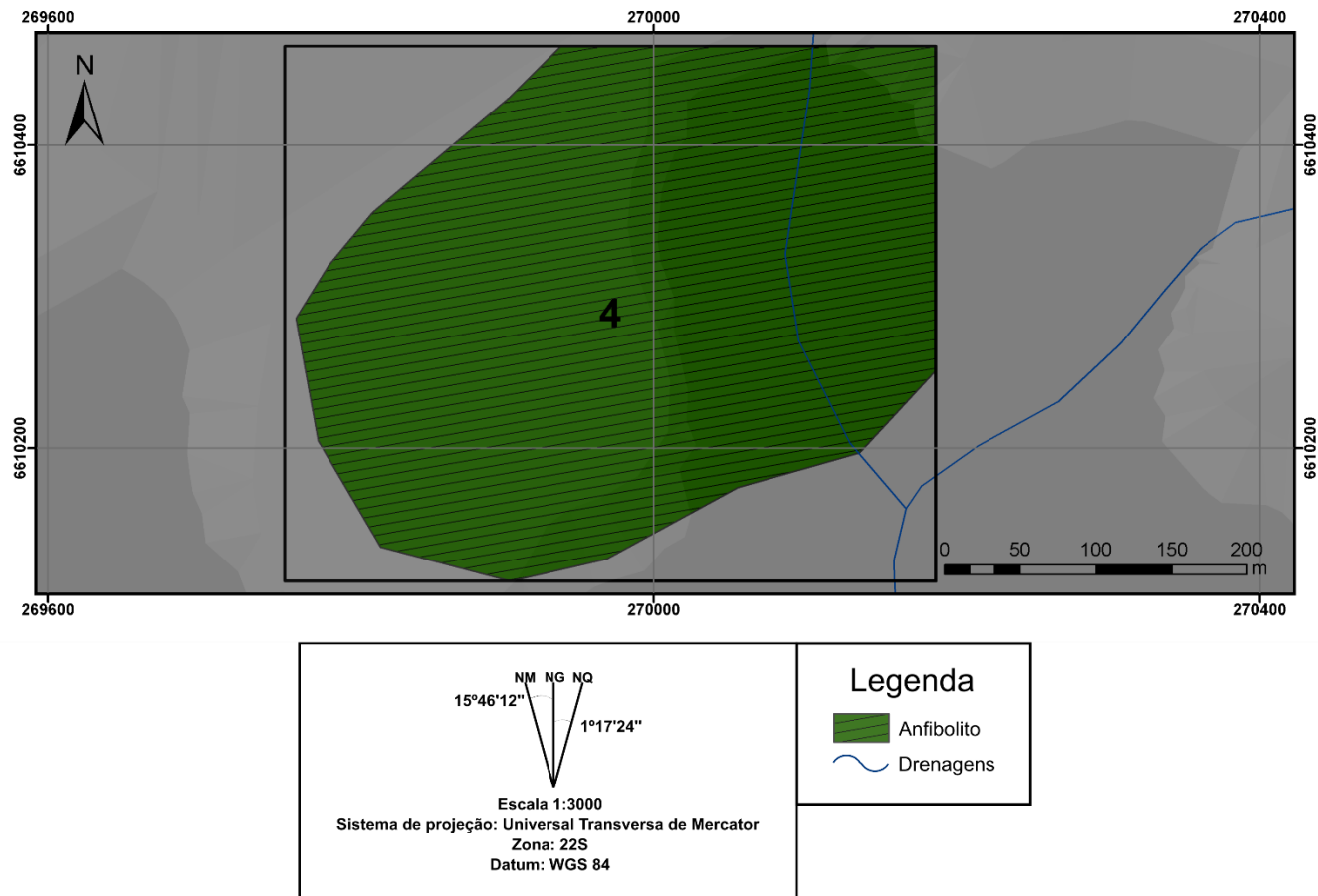
Fonte: autor.

Figura 25 – Mapa geológico da área 3, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.



Fonte: autor.

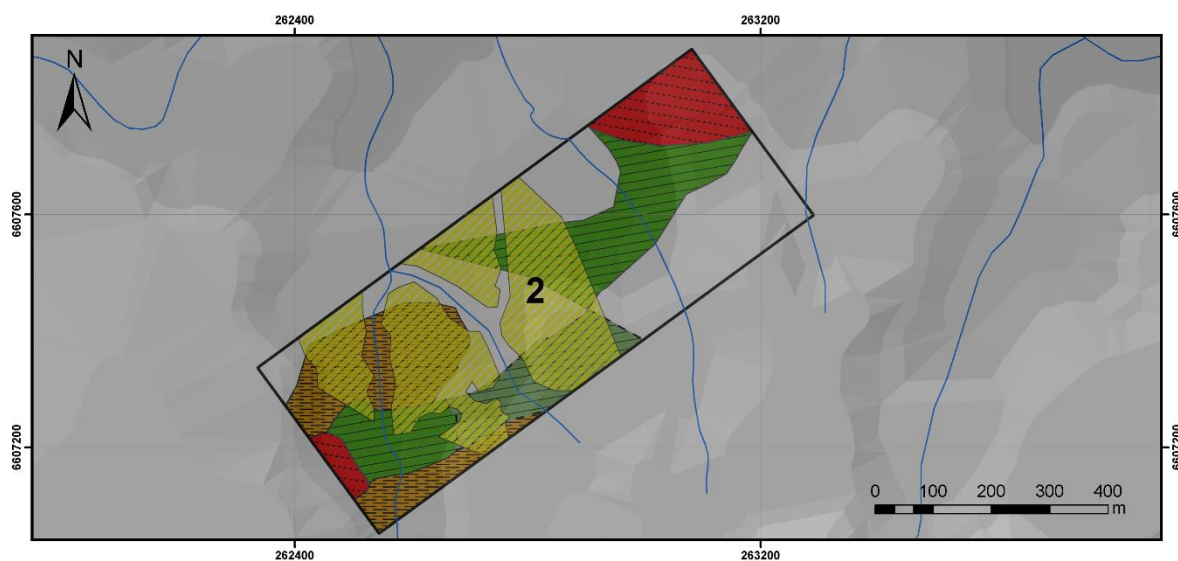
Figura 26 – Mapa geológico da área 4, limitado pela anomalia gamaespectrométrica de eTh e com relevo sombreado.



Fonte: autor.

Houve uma certa dificuldade para a determinação dos contatos geológicos devido à falta de afloramentos da região. Um outro empecilho para a interpretação geológica e demarcação de contatos foi a falta de dados devido a presença de zonas inacessíveis ou regiões de lavoura que ocorreram principalmente na área 2 (**figura 27**).

Figura 27 – Mapa geológico da área 2 salientando em amarelo hachurado as zonas inacessíveis de lavoura, ou zonas sem afloramentos.



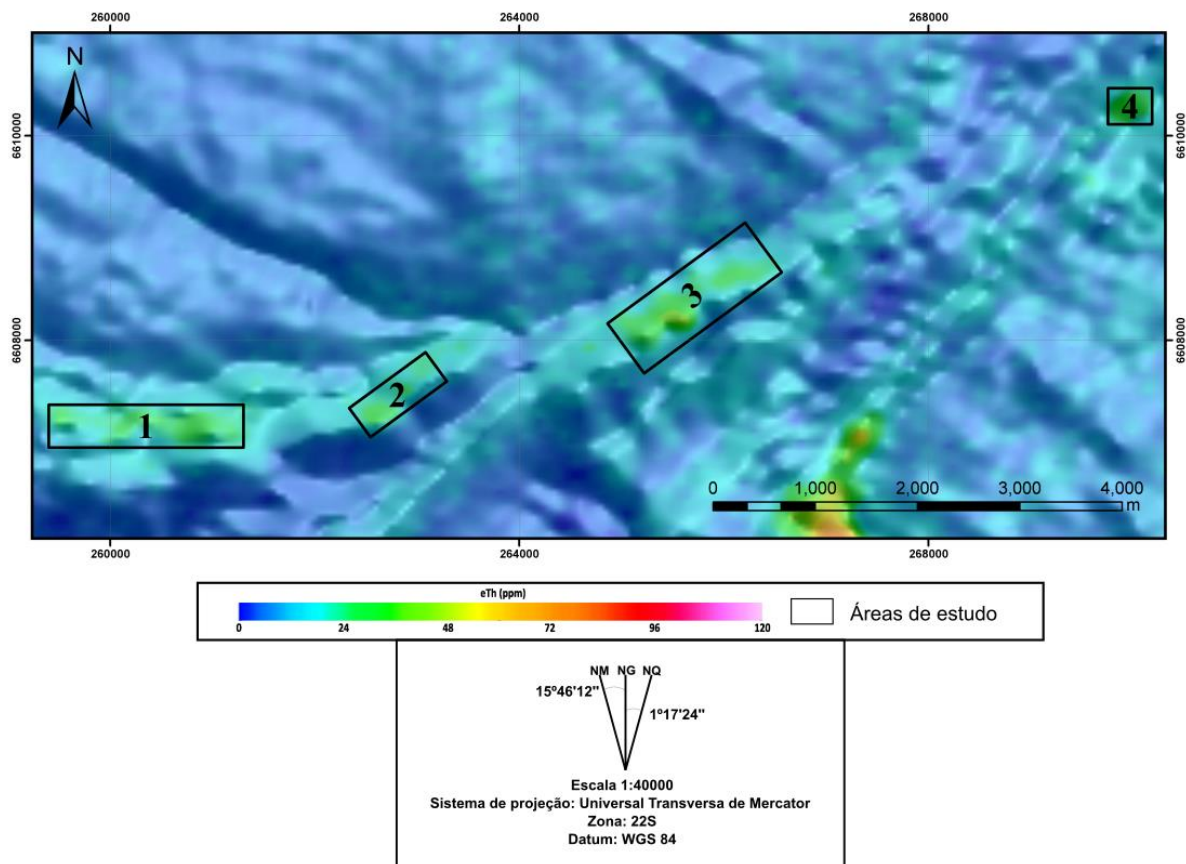
Fonte: autor.

A maioria dos contatos geológicos foram inferidos a partir da meia distância dos pontos descritos. Apesar disso, é notável que as rochas da região de estudo se apresentam encaixadas em estruturas L-O e NO-SE (**figura 28**). Estruturas de foliação metamórfica, lineação e milonitização foram medidas em campo, apresentando uma direção de mergulho preferencial entre S e SE ou N e NO quando dobradas, e com ângulo de mergulho médio de  $46^\circ$ . Estas estruturas ajudaram a definir uma anisotropia praticamente L-O para a aferição dos contatos. Além disso, ocorre por toda a região a presença de fraturas perpendiculares a foliação das rochas com strike preferencial N-S. A presença destas fraturas pode indicar a presença de falhas geológicas de mesma direção. Em muitas porções foi possível observar grande quantidade de blocos rolados de quartzo leitoso, essas características em conjunto com a magnetometria e o mapeamento lotológico

possibilitou inferir uma falha praticamente N-S na área 2 e 3 falhas menores na área 3.

A geoquímica de solo é uma ferramenta muito importante para auxiliar no mapeamento de rochas não aflorantes, apesar disso as análises das amostras coletadas serão realizadas em um trabalho futuro.

Figura 28 - Mapa mostrando as estruturas observadas na magnetometria (FVD-RTP-Residual) que cortam as áreas de estudo. Em conjunto à imagem gamaespectrometria no canal de eTh.



Fonte: autor.

## 7.2. Litologias

### 7.2.1. Andesito

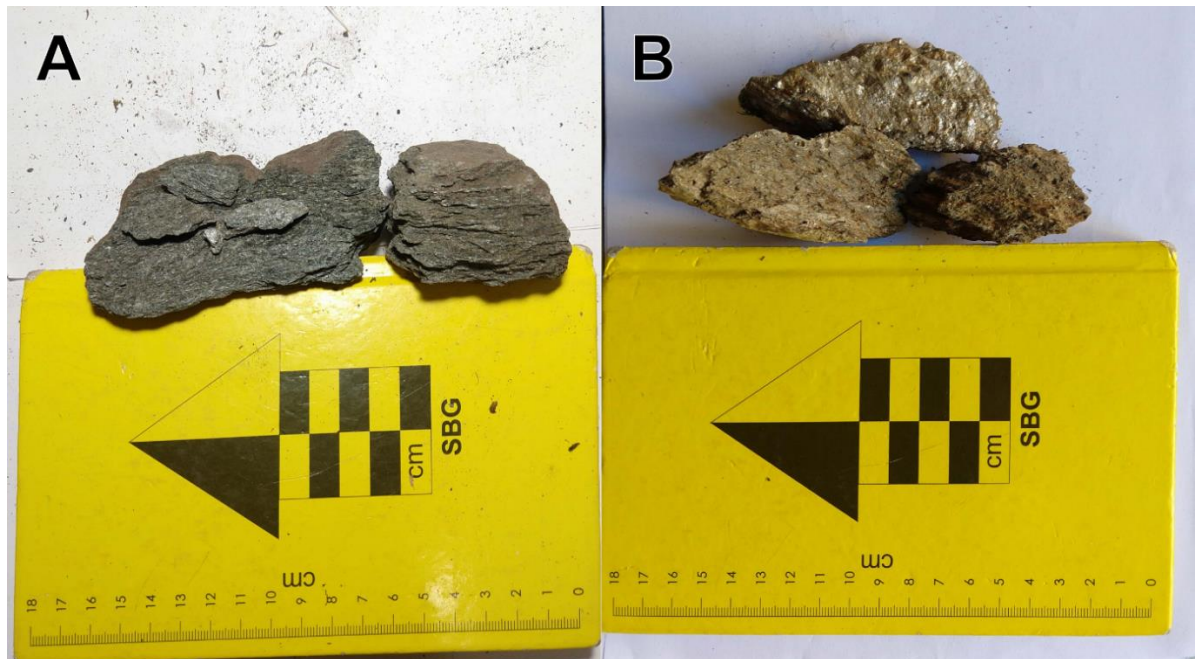
As rochas andesíticas foram observadas apenas na área 1. Ocorrem de forma foliada ou maciça e apresentam cristais muitos finos e quase imperceptíveis a olho nú ou à vista armada. Apresentam uma mineralogia semelhante aos anfibolitos

composta por quartzo, anfibólios, biotita e plagioclásio e por minerais acessórios de pirita e magnetita. Óxidos de alteração também são comuns e vênulas de sílica.

### 7.2.2. Mica xisto

Os mica xistos se apresentam com uma coloração verde alaranjada e extremamente foliados. A mineralogia destas rochas é composta principalmente por cristais de muscovita com algumas amostras contendo anfibólios ou granada nos planos de foliação, sendo possível notar a presença de grande quantidade de óxidos de ferro por todo a rocha também (**figura 29**).

Figura 29 – Amostras de xistos. A) Mica Xisto com anfibólios. B) Mica Xisto com granadas.



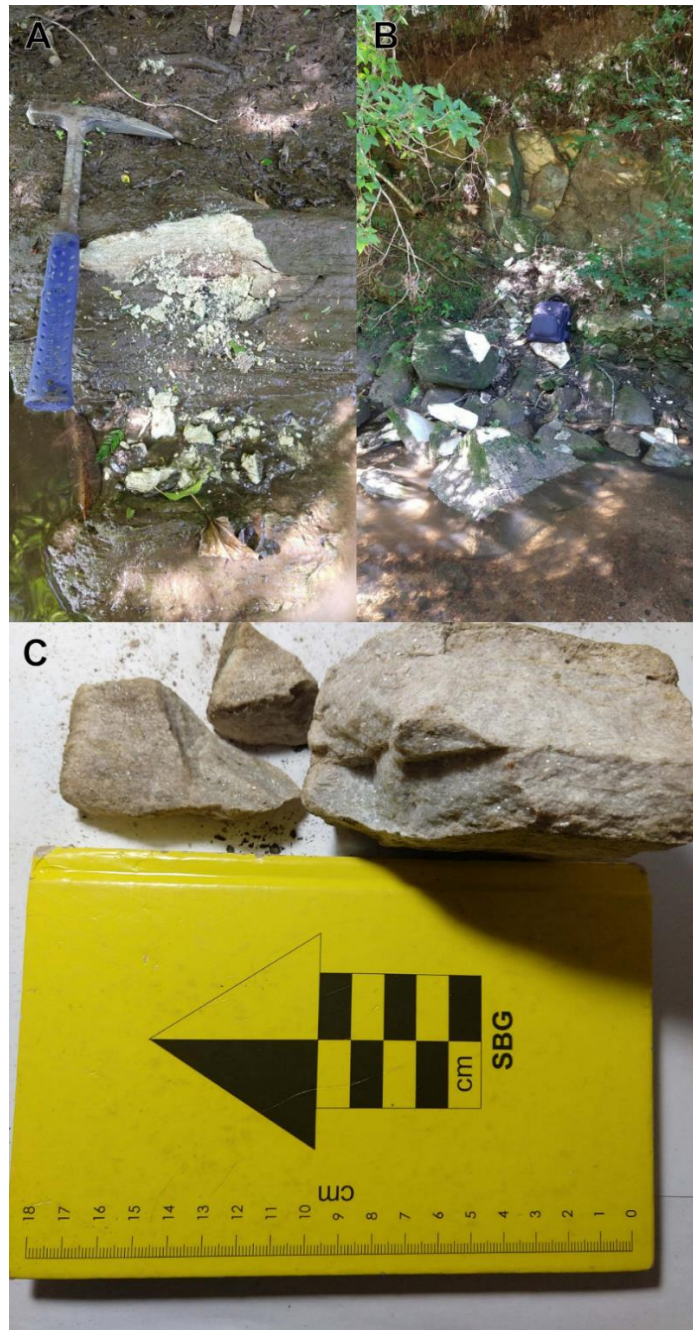
Fonte: autor.

### 7.2.3. Mármore

Ao norte da área 2 e fora da anomalia gamaespectrométrica de eTh foi encontrado um afloramento em drenagem composto por mármore como mostrado na **figura 30**. As amostras analisadas são compostas em totalidade por cristais de carbonato, que compõem cerca de 99% da rocha, e cristais de muscovita inseridos

nos planos de foliação. A foliação segue o trend analisado em todas as áreas de estudo e apresenta um mergulho de 62°.

Figura 30 – Fotos do afloramento de mármore (A e B) e da amostra coletada (C).

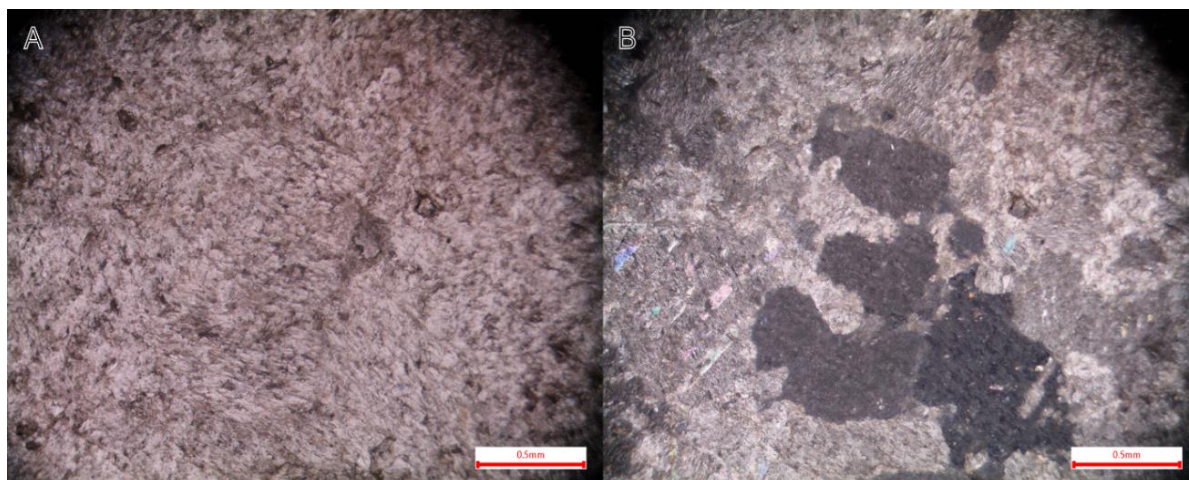


Fonte: autor.

As amostras analisadas através da microscopia mostraram uma mineralogia totalmente composta por cristais de carbonato em maioria deformados e anédricos (figura 31).



Figura 31 – Lâmina petrográfica de mármore. A) à nicóis paralelos. B) e nicóis cruzados. Aumento de 5x.



Fonte: autor.

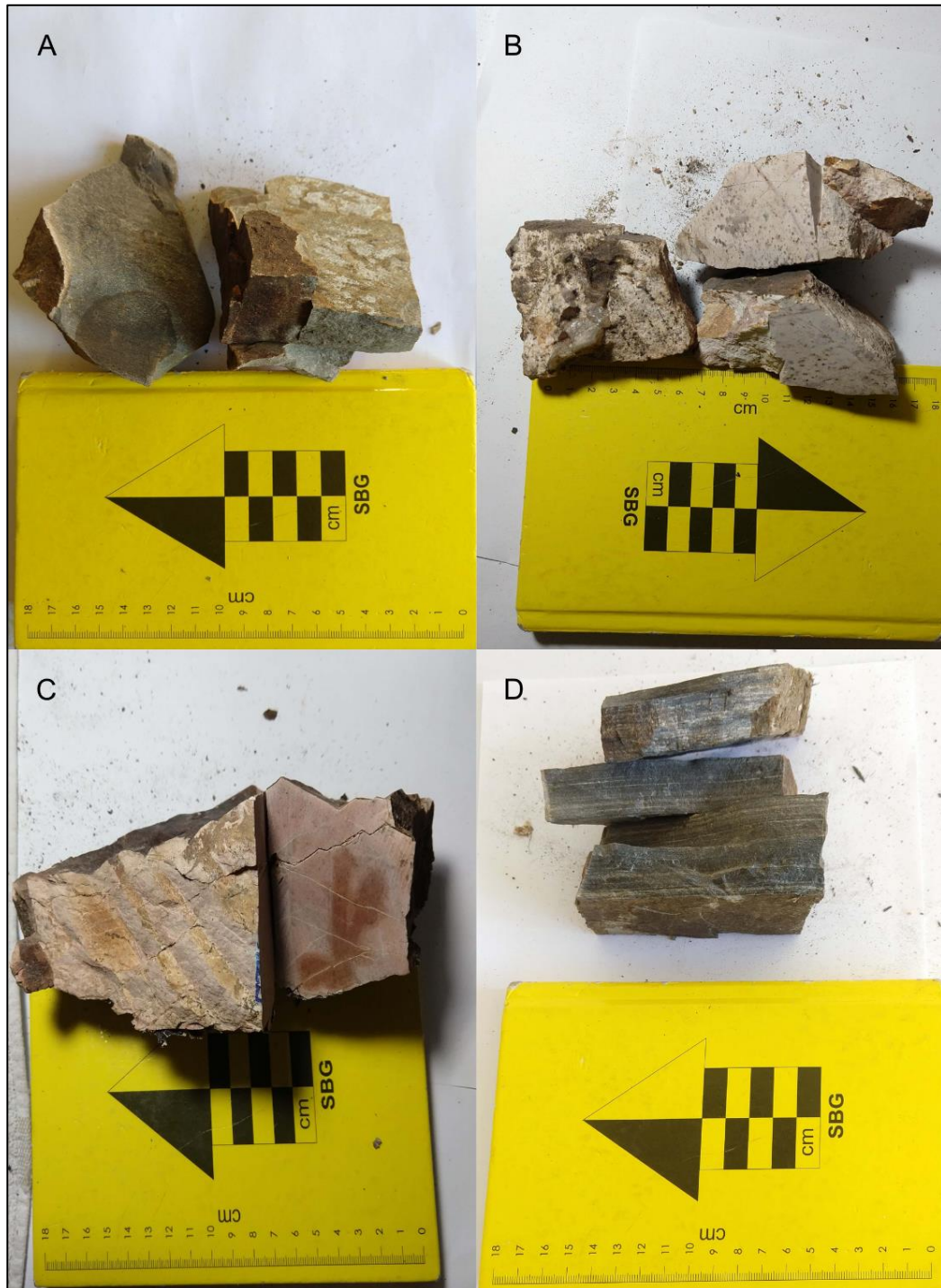
#### 7.2.4. Granito ultramilonitizado

Os granitos ultramilonitizados observados macroscopicamente ocorrem com três colorações diferentes sendo elas ou branca, ou rosa, ou cinza-azulado ou ainda com uma alternância entre essas cores (**figura 32 A, B e C**), caracterizando diferentes fácies. Foi observado uma foliação marcada pelo estiramento e orientação de cristais, por vezes de forma quase incipiente. Em outras porções, a deformação gera uma foliação formada por bandas de minerais máficos e félsicos intercaladas (**figura 32 D**). Os contatos entre essas diferentes fácies ocorre de forma abrupta ou gradual. Em muitas amostras ocorre a presença de segregações centimétricas de quartzo, além da presença de fraturas preenchidas por plagioclásio e óxidos.

Nas análises ao microscópio e em MEV-EDS realizadas foi possível identificar presença de cristais com textura granoblástica, porfiroblástica e textura ultramilonítica (**figura 33**). As fácies de coloração branca e rosa apresentam uma mineralogia composta por cristais de plagioclásio, feldspato alcalino, hematita, quartzo, biotita e zircão. As fácies de coloração cinza-azulado ocorrem com maiores quantidade anfibólios. Minerais opacos cúbicos (pirita?) também foram observados. Ambos apresentam cristais muito finos no geral. Não foram identificados nenhum

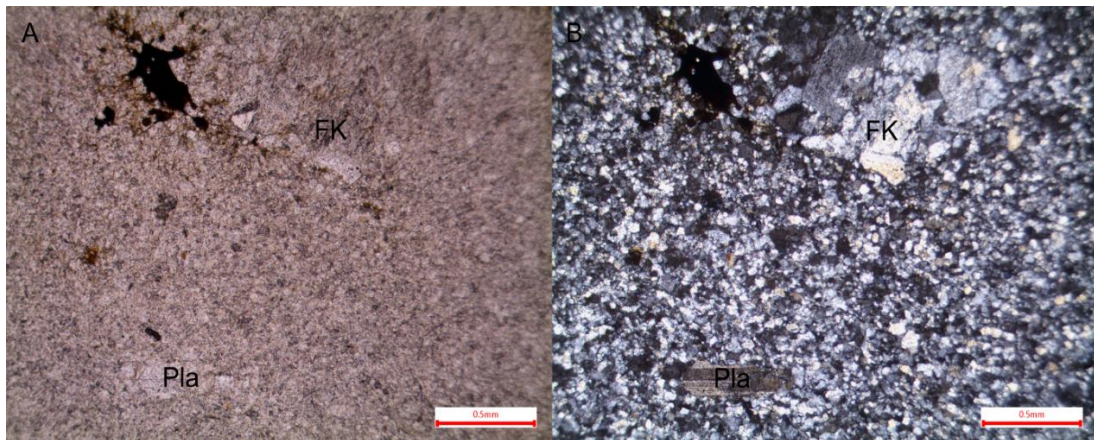
traço de fenitização ou presença de carbonatos ou fosfatos, apenas vênulas posteriores compostas por plagioclásio.

Figura 32 – Amostras de granitos ultramilonitizados. A) Amostra de coloração azulada; B) Amostra de coloração branca; C) Amostra de coloração rosada. D) Amostra com estrutura bandada.



Fonte: autor.

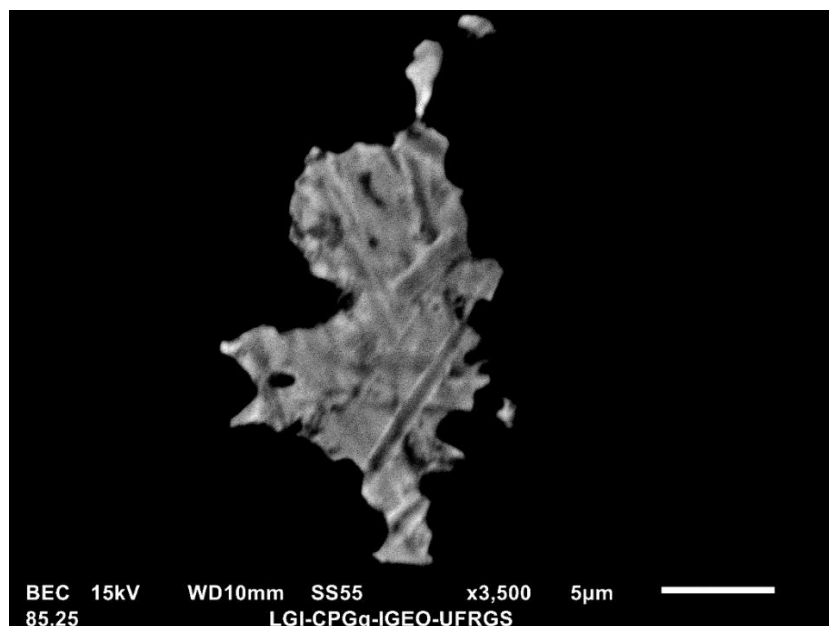
Figura 33 – Fotomicrografia de uma amostra de granito ultramilonitizado. A) nicóis paralelos; B) Nicóis cruzado. Aumento de 5x. Pla=Plagioclásio; FK=Feldspato alcalino.



Fonte: autor.

Vale salientar que, nas análises em MEV-EDS foi observado a presença de xenotimas(Y) e pequenas concentrações de ouro e prata associadas a sílica. Além disso, foi observado uma forte silicificação da rocha marcada pelo aumento de sílica em diversos cristais. Os cristais de xenotimas(Y) observados em MEV-EDS (**figura 34**) apresentam concentrações médias de 77.14% de Y e baixas concentrações médias de gadolínio (0.32%) segundo Xu, (1995), como mostrado na **tabela 4**.

Figura 34 – Imagem de BSB de um cristal de xenotima.



Fonte: autor.

Tabela 4 – Valores de amplitude e média de 4 análises de MEV-EDS realizadas em xenotimas.

<b>Xenotimas</b>		
<b>Composição</b>	<b>Amplitude (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>P2O5</b>	18.76 - 21.77	20.64
<b>Al2O3</b>	0 - 2.45	1.22
<b>Y2O3</b>	75.46 - 78.75	77.14
<b>Gd2O3</b>	0 - 0.79	0.32
<b>n=4</b>		

Fonte: autor.

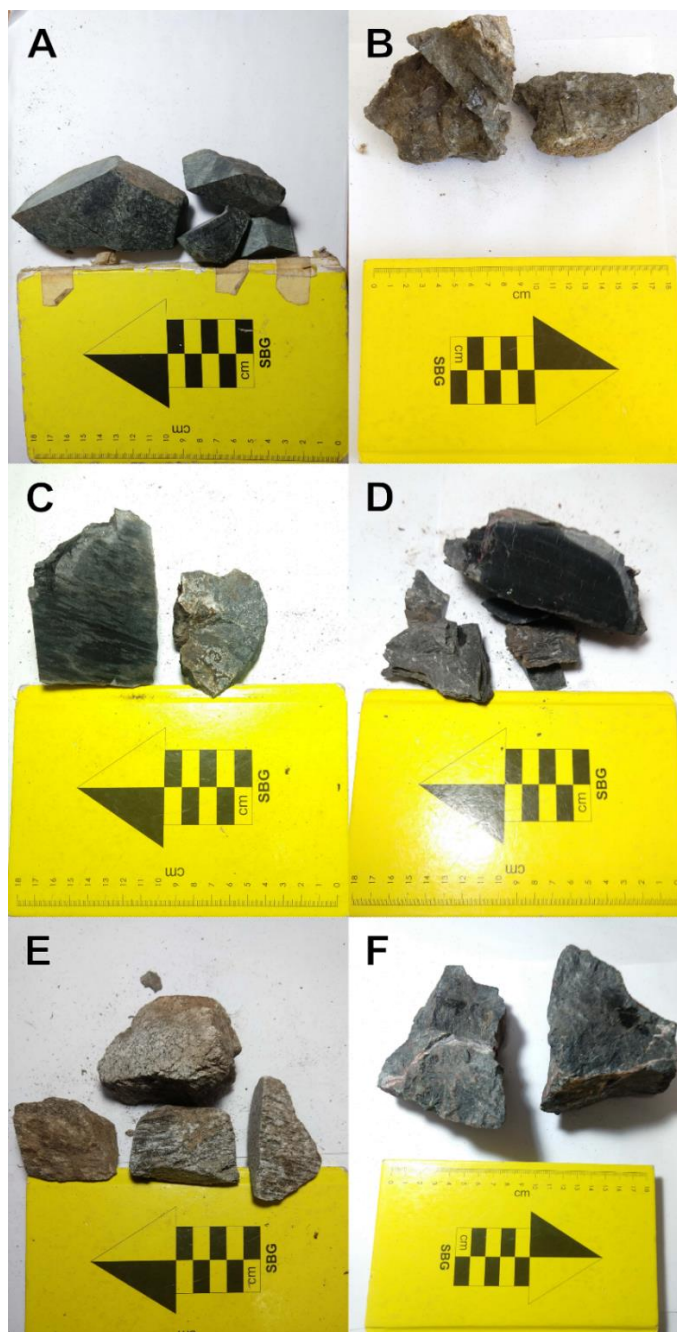
### 7.2.5. Anfibolitos

Os anfibolitos apresentaram a maior ocorrência em todo o estudo. Ocorrem com uma coloração variando de cinza claro a quase preto e possuem diferentes graus de deformação (**figura 35**). A maioria dessas rochas ocorrem com estruturas de foliação ou lineação e poucos com estrutura maciça, as quais apresentam uma mineralogia de granulometria muito fina associada.

As análises petrográficas e de MEV-EDS mostraram uma mineralogia muito variada para estas rochas, composta por cristais de tremolita, actinolita, biotitas e, plagioclásio (oligoclásio em maioria) e feldspato alcalino que em muitas amostras ocorrem em bandas lineares ou boundins. Minerais acessórios ocorrem como esfeno, zircão, carbonatos (calcita e ankerita), apatitas, monazitas, allanita, wollastonita, baritas, além de sulfetos compostos por pirita, calcopirita, galena e óxidos de ferro e titânio (magnetita, hematita, ilmenita e rutilo) que ocorrem com cerianita associada. Em muitas amostras ocorrem minerais de alteração compostos por clorita, ghoetita, hematita e argilominerais (caulinita).

Notou-se a presença de fraturas perpendiculares a foliação em muitos afloramentos e amostras coletadas. Essas fraturas ocorrem na maioria das vezes preenchidas por carbonatos, plagioclásio, feldspato alcalino e anfibólios. Apesar disso, a área 4 apresentou rochas intensamente fraturadas em arranjo stockwork, na maioria das vezes preenchidas por óxidos, em menor quantidade, por carbonatos, plagioclásio, feldspato alcalino e anfibólios (**figura 35 F**).

Figura 35 – Imagens das amostras de anfibolitos. A) Estrutura maciça. B) Com porfiroblastos de biotita. C) Amostra carbonatada. D) Amostra carbonatada com textura “muro de tijolos”. E) Amostra carbonatada com bandas de plagioclásio. F) Amostra com arranjo stockwork de carbonatos.

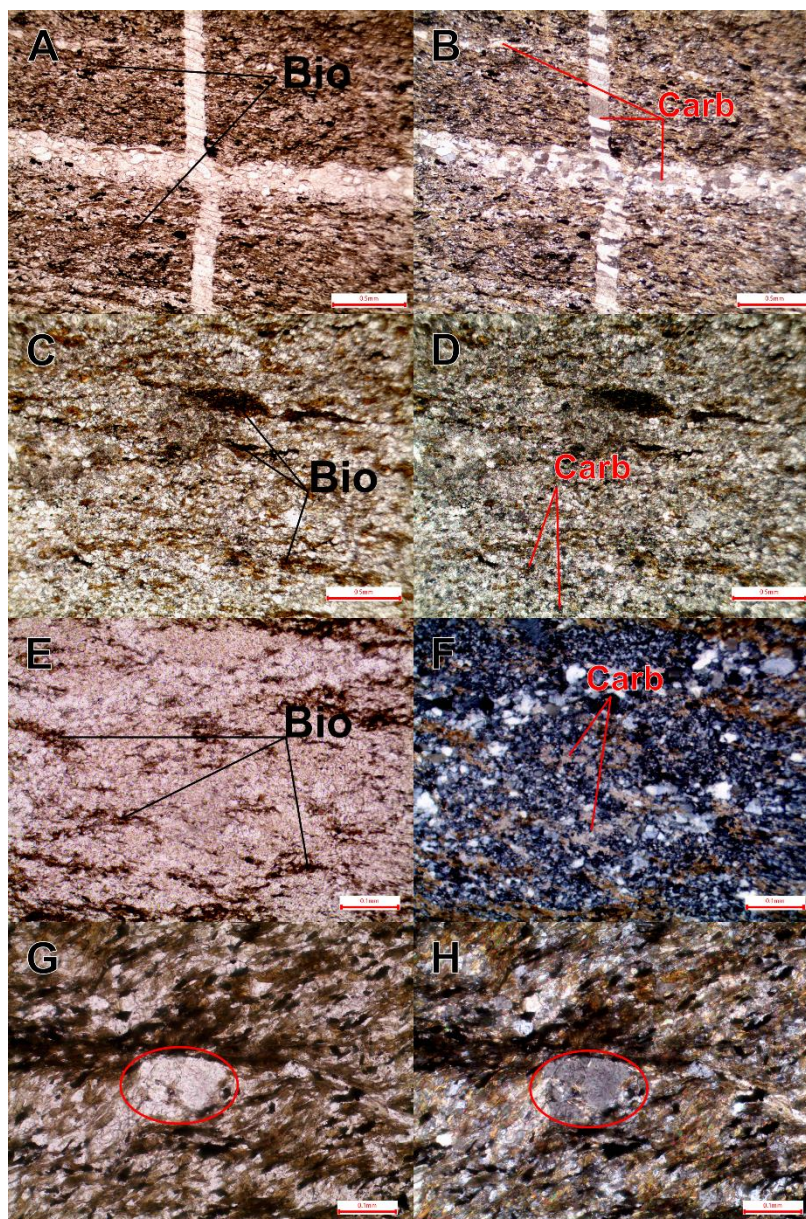


Fonte: autor.

A ocorrência de carbonatos nos anfibolitos geralmente está associada a um aumento significativo no conteúdo de biotita (**figura 36**). Em muitos casos é notável

a presença de pirita e calcopirita também associados. Os carbonatos se distribuem ou na matriz, orientados segundo os planos da foliação e por vezes como granoblóstos, ou nas fraturas perpendiculares anteriormente descritas, à exceção da área 4, onde ocorrem associados a fraturas em arranjo stockwork.

Figura 36 – A e B) Amostra exibindo carbonatos na foliação e em vênulas de perpendiculares (textura muro de tijolos). C e D) Amostra com carbonatação da matriz em menor quantidade, aumento de 5x. E e F) Amostra com pequenas massas de carbonatos, aumento de 20x. G e H) Amostra mostrando a ocorrência de reabsorção de cristais (em vermelho), aumento de 20x. Nicóis paralelos nas imagens à esquerda. Nicóis cruzados nas imagens à direita.



Fonte: autor.

Nas análises feitas por microscopia óptica das amostras carbonatadas, foi possível notar uma variação no conteúdo de carbonatos que as compõem. Nas amostras mais carbonatadas os carbonatos ocorrem inseridos tanto nos planos de foliação quanto em fraturas ortogonais, formando uma estrutura semelhante a um muro de tijolos (**figuras 35 D e 36 A, B**). O conteúdo de carbonatos decresce gradativamente até porções com muita pouca concentração, onde estes ocorrem como pequenas massas. Apesar disso, nessas amostras ocorrem bandas de plagioclásio intercaladas com as bandas biotíticas, como mostrado nas **figuras 35 E e 36 E, F**. Um outro aspecto interessante observado é a presença de minerais reabsorvidos pela matriz carbonática e biotítica nos extremos mais carbonatados. Um Processo semelhante foi descrito por Morales (2017) em apatitas no CCPF.

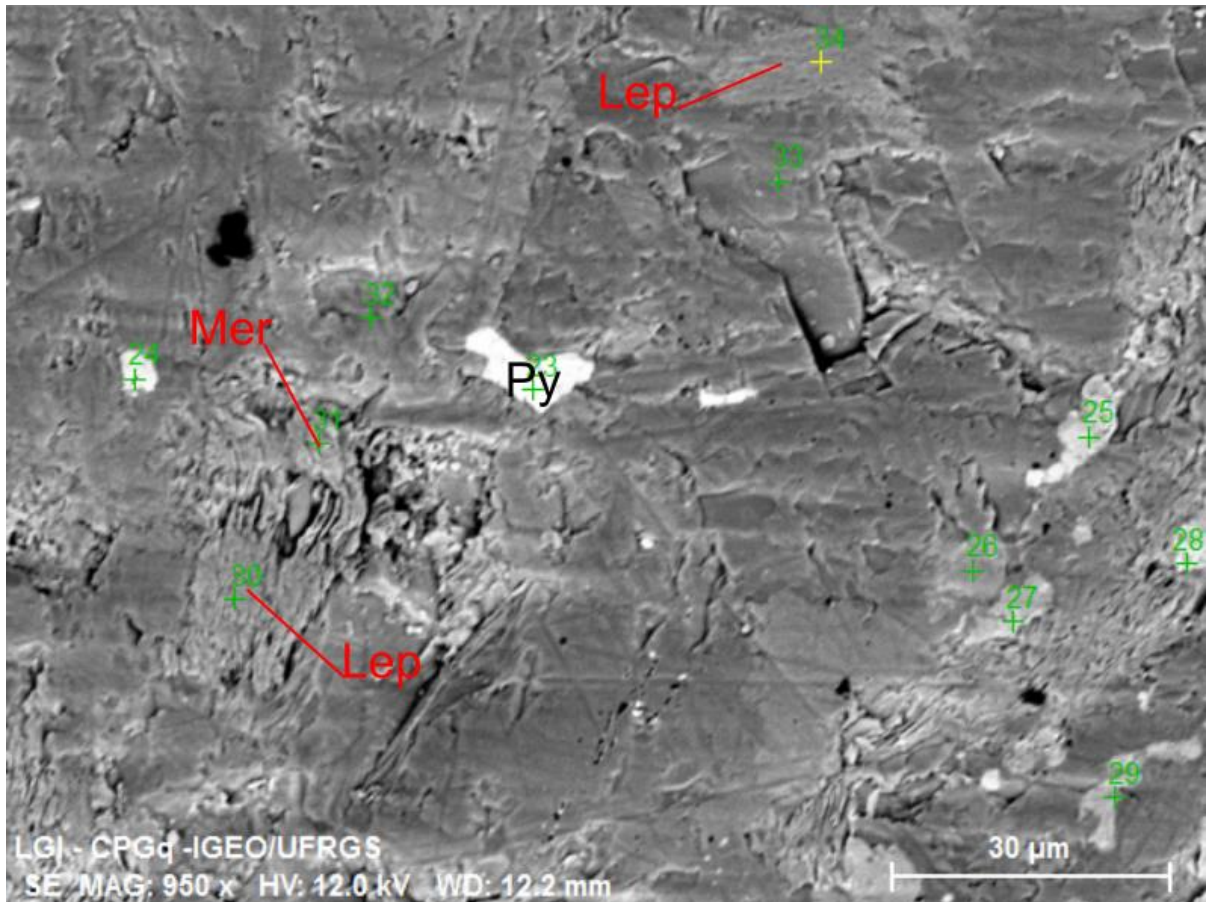
#### **7.2.5.1. Análise de química mineral**

As análises em MEV-EDS dos anfibolitos foram realizadas nas amostras PPF22-23, PPF22-32 e PPF22-46. Ambas as amostras estão associadas a rochas com aumento expressivo de biotitas e apresentam maiores ou menores quantidades de carbonatos.

##### **7.2.5.1.1. Biotitas**

Biotita é o nome dado para uma série mineral de micas composta por flogopita, meroxeno, lepidomelano e siderophyllita de acordo com seus conteúdos de FeO e MgO. Os cristais de biotita observados ocorrem ou como granoblastos, ou como cristais menores junto a matriz orientado segundo a foliação, ou ainda formando uma massa junto aos carbonatos como mostrado na **figura 36**. As análises em MEV-EDS mostraram concentrações variadas de FeO e MgO e a presença de cristais de meroxeno, lepidomelano, siderophyllita. (**figura 37**).

Figura 37 – Imagem de BSB mostrando a distribuição dos diferentes tipos de biotita na matriz da rocha. Mer=Meroxeno; Lep=Lepidomelano; Py=Pirita.



Fonte: autor.

Segundo as análises realizadas em MEV-EDS foi possível notar um aumento gradual de CaO e W relacionado ao aumento gradual de MgO. Nos cristais de meroxeno (mais magnesianos) as concentrações médias de CaO e W são de 0,59% e 1,02%. Além disso, nesses cristais ocorre a presença de concentrações médias de 0,99% de Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A **tabela 5** mostra a composição média dos diferentes cristais de biotita encontrados nas amostras.



Tabela 5 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos diferentes cristais de biotita.

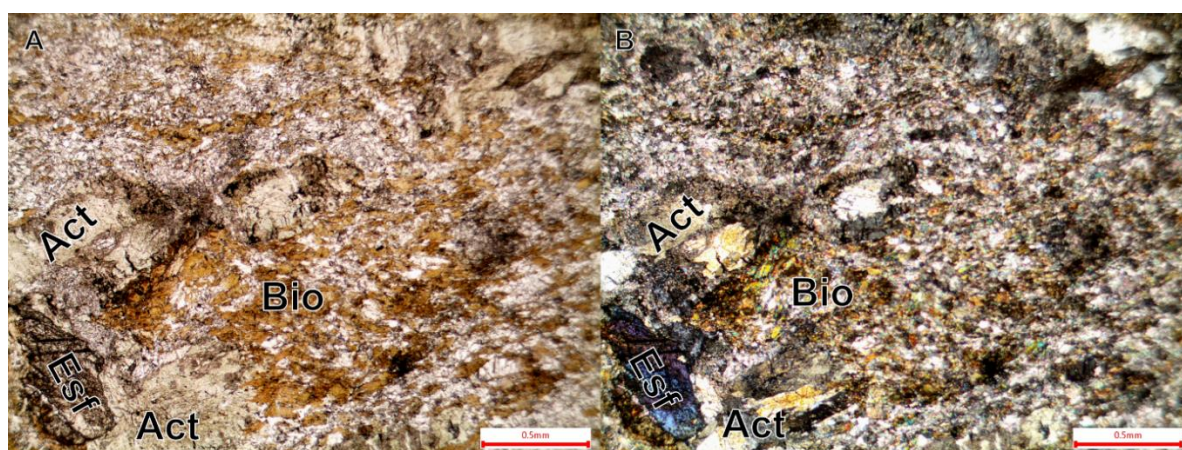
Composição	Siderophyllitas		Lepidomelanos		Meroxenos	
	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.85 - 32.78	18.84	12.079 - 19.70	16.49	12.93 - 17.53	14.55
SiO <sub>2</sub>	10.68 - 48.52	36.90	29.24 - 41.30	36.06	34.27 - 43.58	39.31
TiO <sub>2</sub>	0 - 7.93	2.45	1.41 - 7.68	3.53	0 - 5.50	4.18
KO <sub>2</sub>	1.37 - 8.73	5.84	5.11 - 8.42	7.22	4.98 - 10.31	7.96
MgO	0.66 - 6.49	4.57	7.23 - 19.78	12.02	12.23 - 20.78	17.08
FeO	9.31 - 69.87	31.40	20.08 - 29.59	23.77	12.22 - 18.73	14.30
W	-	-	0 - 6.54	0.59	0 - 7.17	1.02
CaO	-	-	0 - 5.38	0.32	0 - 4.14	0.59
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0 - 6.95	0.99
	n=7		n=17		n=8	

Fonte: autor.

### 7.2.5.1.2. Actinolitas

O grupo da actinolita é formada por uma solução sólida entre a tremolita, a actinolita e a ferroactinolita de acordo com suas concentrações de FeO e MgO. Nas amostras analisadas, os cristais de actinolita ocorrem distribuídos ou na matriz ou como porfiroblastos, ambos orientados segundo a foliação da rocha (**figura 38**).

Figura 38 – Amostra PPF22-46 mostrando a distribuição dos cristais de actinolita observados. Bio=Biotita; Esf=Esfeno; Act=Actinolita.



Fonte: autor.

As análises de 7 exemplares realizadas em MEV-EDS resultaram na classificação destes cristais como actinolitas devido a seus conteúdos de FeO e

MgO. Além disso, pequenas concentrações de NaO<sub>2</sub> e W ocorrem associado. A **tabela 6** mostra as amplitudes e os conteúdos médios medidos nesses cristais.

Tabela 6 – Valores de média e amplitude para 7 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de actinolita.

Actinolitas		
Composição	Amplitude (%)	Média (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 7.44	3.82
SiO <sub>2</sub>	49.2 - 61.63	55.61
CaO	10.43 - 15.24	12.37
FeO	6.47 - 9.98	8.30
W	0 - 8.17	1.17
NaO <sub>2</sub>	0 - 1.11	0.28
MgO	17.1 - 19.8	18.30
<b>n=7</b>		

Fonte: autor.

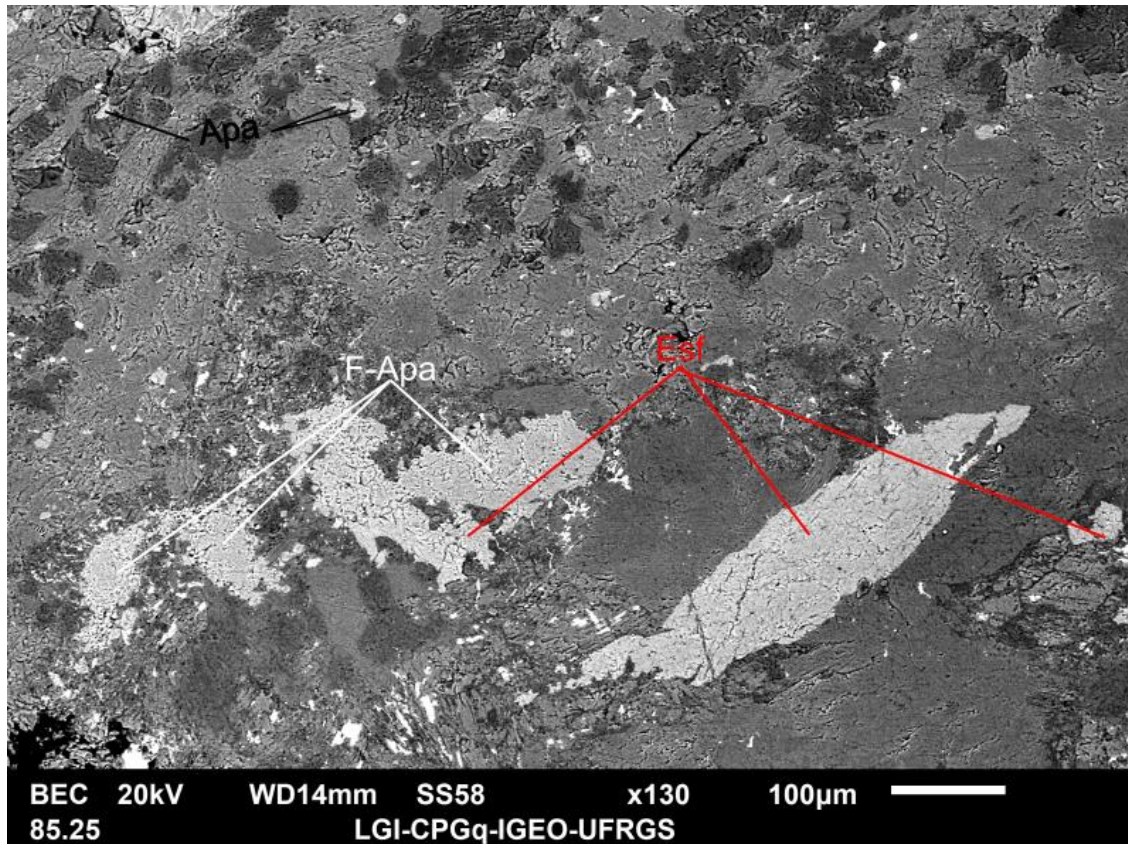
#### 7.2.5.1.3. Esfenos

Os cristais de esfeno ocorrem em grande maioria como porfiroblastos. Apresentam um grau de formação de subédrico a anedricos sem um aspecto de deformação. Muitos deles ocorrem alterando para óxidos ou leucoxênio. Além disso, muitos deles geralmente estão em contato com apatitas (**figura 39**).

Foram realizadas 24 análises em MEV-EDS nesses cristais. É possível notar a presença de conteúdos de fosfato com média de 0,46% relacionado a sua alteração para leucoxênio, além de concentrações W, FeO, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Também foi observado concentrações de Nb com média de 0.28%, consideradas baixas nestes cristais segundo Liferovich (2005). A **tabela 7** mostra a amplitude e o conteúdo médio resultante das análises.

A **figura 40** mostra um mapa composicional gerado para ETRs leves (La, Ce e Pr) nestes cristais. Apesar da ocorrência desses elementos nos cristais de esfeno sua concentração é muito baixa e não foi detectada nas análises da **tabela 7**.

Figura 39 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de esfeno (em vermelho) junto a apatitas. Esf=Esfeno; F-Apa=Apatita-(CaF).



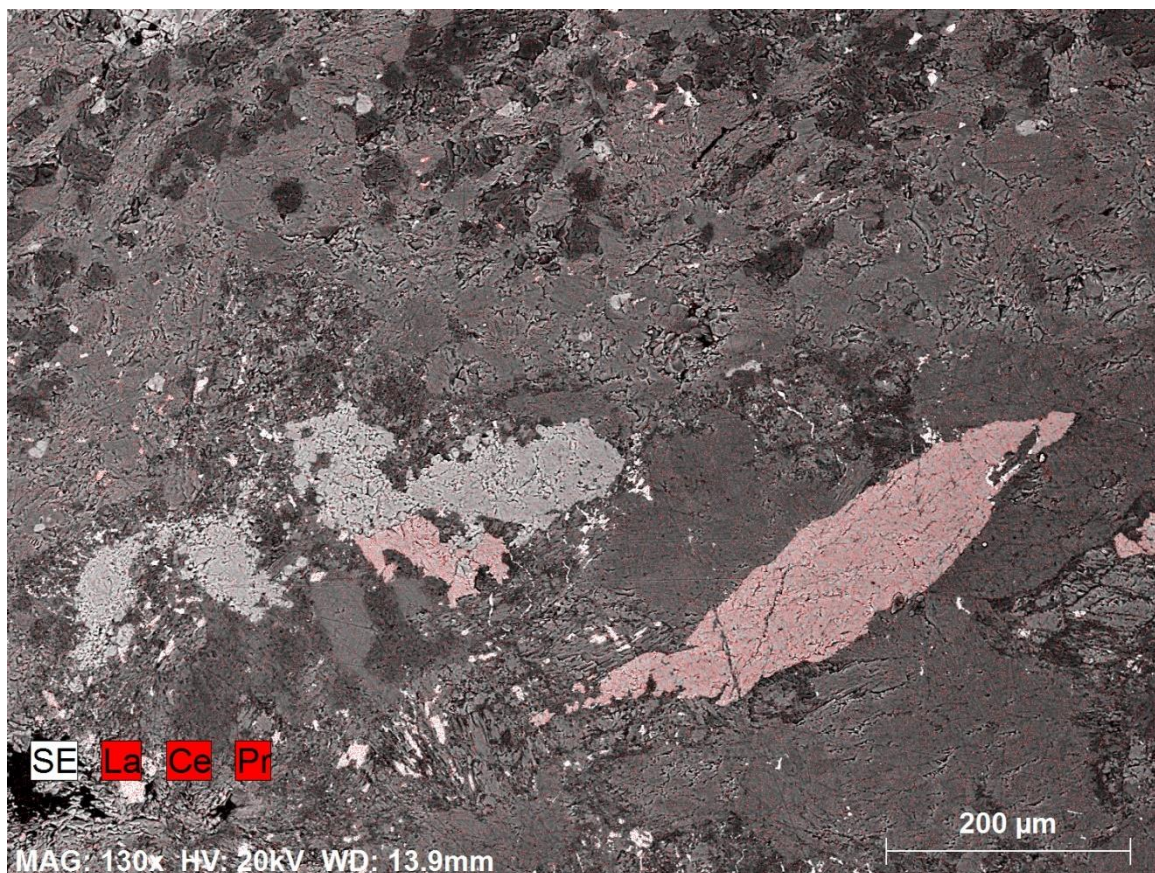
Fonte: autor.

Tabela 7 – Valores de média e amplitude para 24 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de esfeno.

Esfenos		
Composição	Amplitude (%)	Média (%)
W	0 - 4.92	0.70
SiO <sub>2</sub>	23.09 - 40.56	29.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 3.69	1.37
CaO	24.19 - 36.72	28.73
TiO <sub>2</sub>	27.14 - 43.68	38.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 - 12.04	0.46
FeO	0 - 1.00	0.23
MgO	0 - 1.62	0.06
Nb	0 - 3.81	0.28
<b>n=24</b>		

Fonte: autor.

Figura 40 – Imagem de BSB em conjunto com mapa composicional gerado em MEV-EDS para La, Ce e Py.



Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.4. Carbonatos

Os carbonatos ocorrem com concentrações variadas chegando a totalizar cerca de 50% da composição modal de algumas amostras. Os cristais ocorrem ou como uma massa fina dispersa na matriz, ou em cristais maiores dispostos segundo os planos de foliação, ou preenchendo fraturas perpendiculares. É possível notar a presença de reabsorção de cristais pela matriz carbonática como mostrando na **figura 36 G e H**.

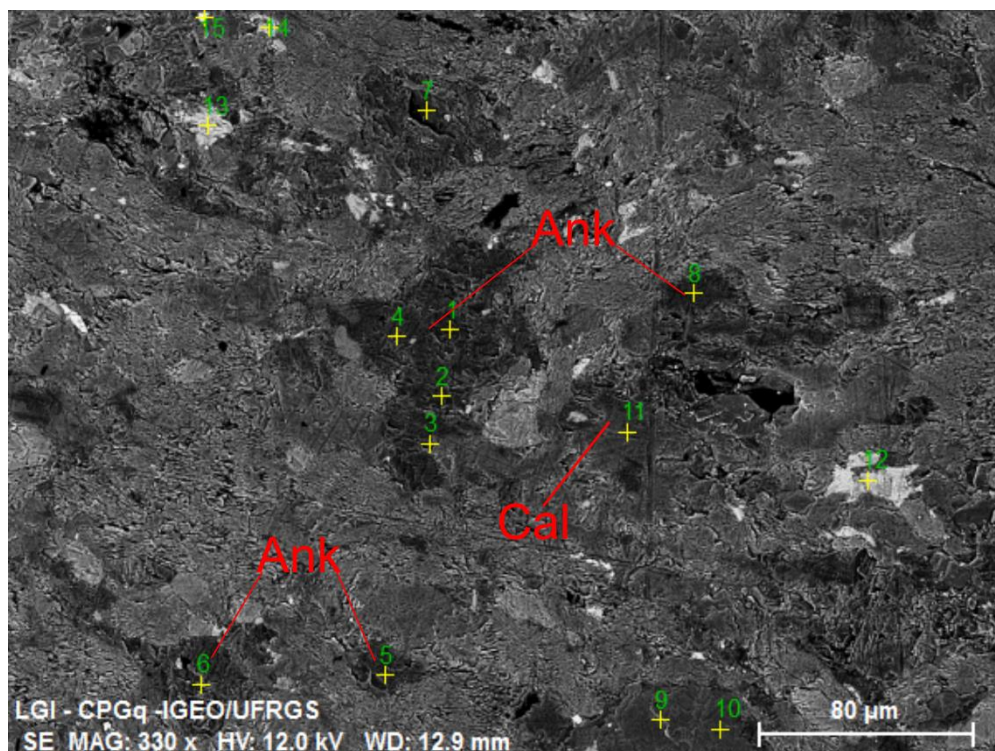
Nas análises de MEV-EDS foram identificados a presença de cristais de calcita e pequenos cristais de ankerita, segundo a **figura 41**. Os cristais de ankerita ocorrem dispersos na matriz ou em pequenos cristais bem formados e apresentam concentrações de arsênio (**tabela 8**).

Tabela 8 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de calcita e ankerita.

Composição	Calcitas		Ankeritas	
	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)
CaO	87.80 - 100	96.10	52.15 - 58.36	51.85
FeO	0 - 8.90	0.82	9.38 - 38.70	14.76
MgO	0 - 3.79	1.63	23.27 - 37.39	29.89
As	-	-	0 - 6.94	3.50
W	0 - 1.08	0.09	-	-
SiO <sub>2</sub>	0 - 3.36	0.44	-	-
TiO <sub>2</sub>	0 - 4.86	0.41	-	-
	<b>n=12</b>		<b>n=16</b>	

Fonte: autor.

Figura 41 - Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de calcita e ankerita. Ank=ankerita; Cal=Calcita.



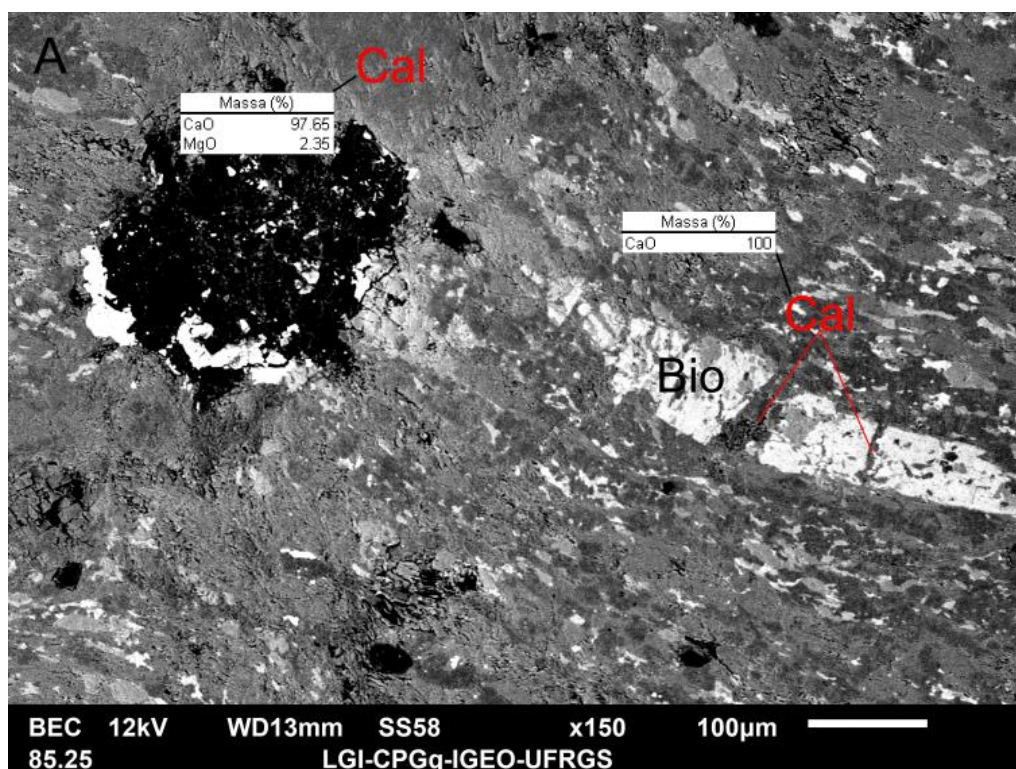
Fonte: autor.

Os cristais de calcitas ocorrem tanto na matriz como preenchendo fraturas. Aqueles dispersos na matriz apresentam um pequeno acréscimo na concentração

de magnésio em relação àqueles que preenchem fraturas. Além disso, foram observados minerais de calcita como produto de alteração de esfenos.

Pequenas concentrações de ferro foram observadas em alguns cristais como mostrado na **tabela 8**. Apesar disso, não foram observados cristais de ankerita preenchendo fraturas (**figura 42**).

Figura 42 - Imagem BSB mostrando a distribuição e diferença composicional dos cristais de calcitas dispersos na matriz e aqueles preenchendo fraturas perpendiculares. Cal=Calcita; Bio=Biotita; Bar=Barita.



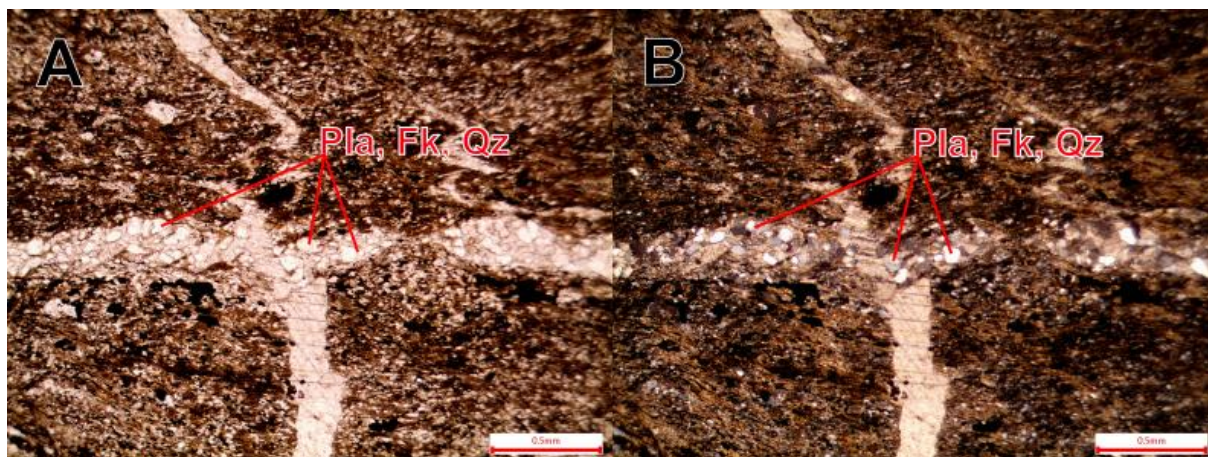
Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.5. Plagioclásios, feldspatos alcalinos e quartzo

Os cristais de plagioclásio, feldspato alcalino e quartzo são observados por toda a amostra. Estes cristais ocorrem juntos formando agregados e distribuídos ou na matriz com textura granoblástica, ou como bandas de porfiroblastos, ou ainda associados a vênulas e bandas de carbonatos quando presentes (**figura 43**).

Os minerais de plagioclásio foram classificados como oligoclásio devido suas concentrações de CaO e NaO<sub>2</sub>. A **tabela 9** mostra as composições médias destes minerais.

Figura 43 – Fotomicrografia de uma amostra com vênulas de carbonatos e presença de feldspato alcalino, plagioclásio e quartzo.



Fonte: autor.

Tabela 9 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas em 5 cristais de oligoclásio e 13 cristais de feldspato alcalino.

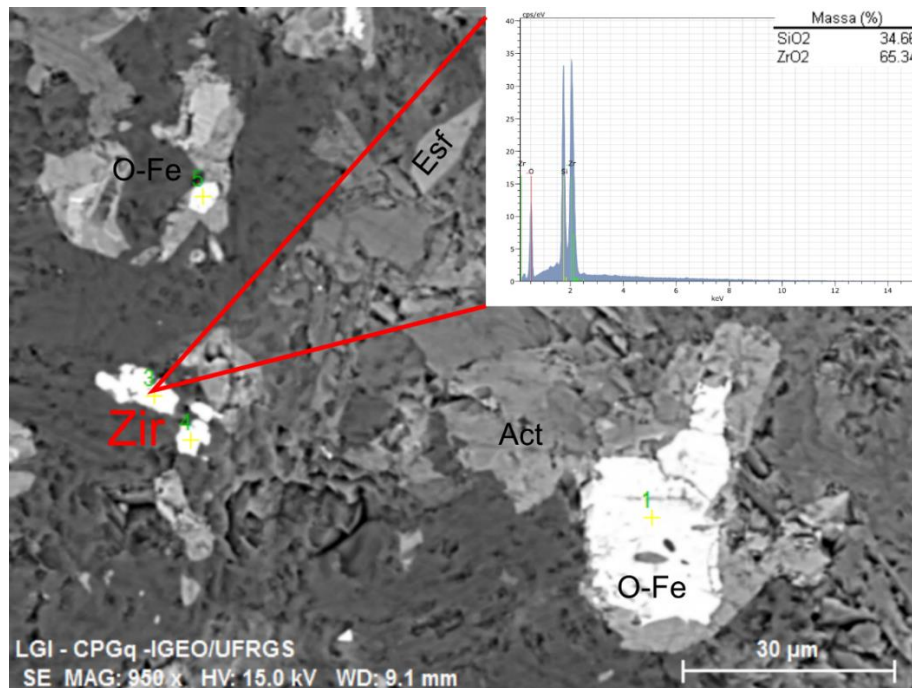
Composição	Oligoclásios		Feldspatos Alcalinos	
	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)
SiO <sub>2</sub>	56.79 - 67.82	64.75	61.10 - 70.71	68.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.88 - 22.66	20.70	18.10 - 19.13	18.67
NaO <sub>2</sub>	6.82 - 10.87	9.31	1.20 - 11.07	8.84
KO <sub>2</sub>	0 - 0.65	0.05	0 - 12.12	2.53
CaO	1.01 - 5.01	2.95	-	-
TiO <sub>2</sub>	0 - 6.70	0.64	-	-
Cl	0 - 1.34	0.10	-	-
W	0 - 9.82	1.50	0 - 9.73	1.95
	<b>n=13</b>		<b>n=5</b>	

Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.6. Zircões

Os cristais de zircão ocorrem como pequenos cristais distribuídos pela matriz. Muitos cristais analisados ocorrem associados a outros minerais como carbonatos, apatitas e esfenos (**figura 44**). A **tabela 10** mostra a composição média dos cristais de zircão analisados, com concentrações de MgO, CaO e TiO<sub>2</sub>.

Figura 44 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de zircão. Zir=Zircão; O-Fe=Óxido de ferro; Esf=Esfeno.



Fonte: autor.

Tabela 10 – Valores de média e amplitude para 16 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de zircão.

Zircões		
Composição	Amplitude (%)	Média (%)
SiO <sub>2</sub>	32.21 - 40.7	35.13
CaO	0 - 6.73	0.90
TiO <sub>2</sub>	0 - 7.69	0.79
MgO	0 - 5.60	0.43
ZrO <sub>2</sub>	52 - 66.14	62.75
<b>n=16</b>		

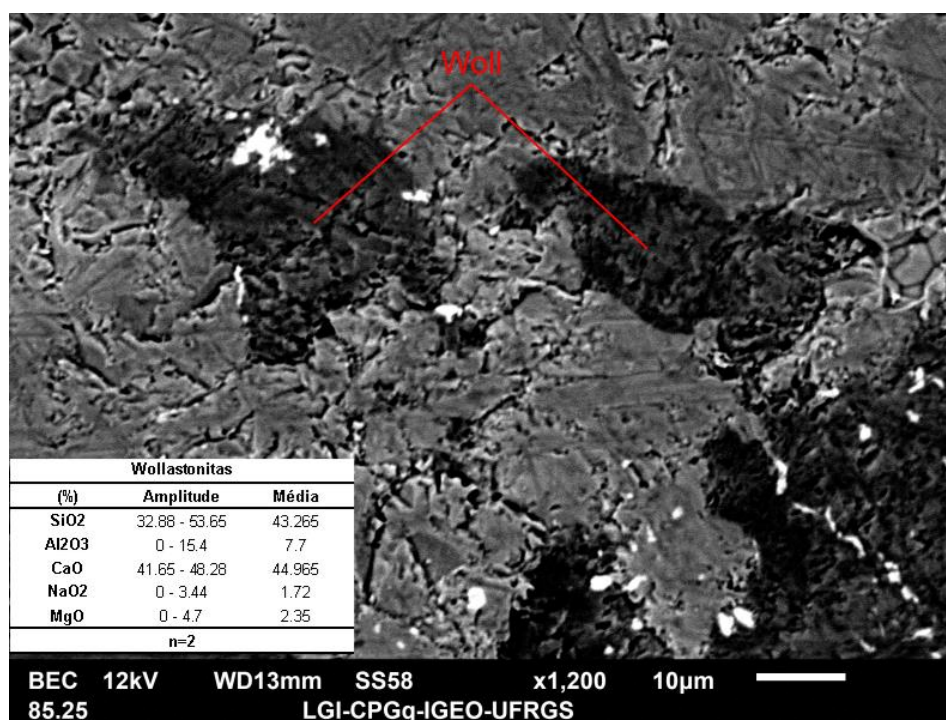
Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.7. Wollastonitas

Apenas dois exemplares de cristais de wollastonita foram observados nas análises de MEV-EDS. Esses cristais ocorrem associados a cristais de esfeno e barita. A **figura 45** mostra os cristais de wollastonita com presença de concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO e NaO<sub>2</sub>.



Figura 45 – Imagem de BSB mostrando cristais de wollastonita junto a valores médios e amplitude observados em MEV-EDS. Woll=Wollastonita; Bar=Barita; Esf=Esfeno.

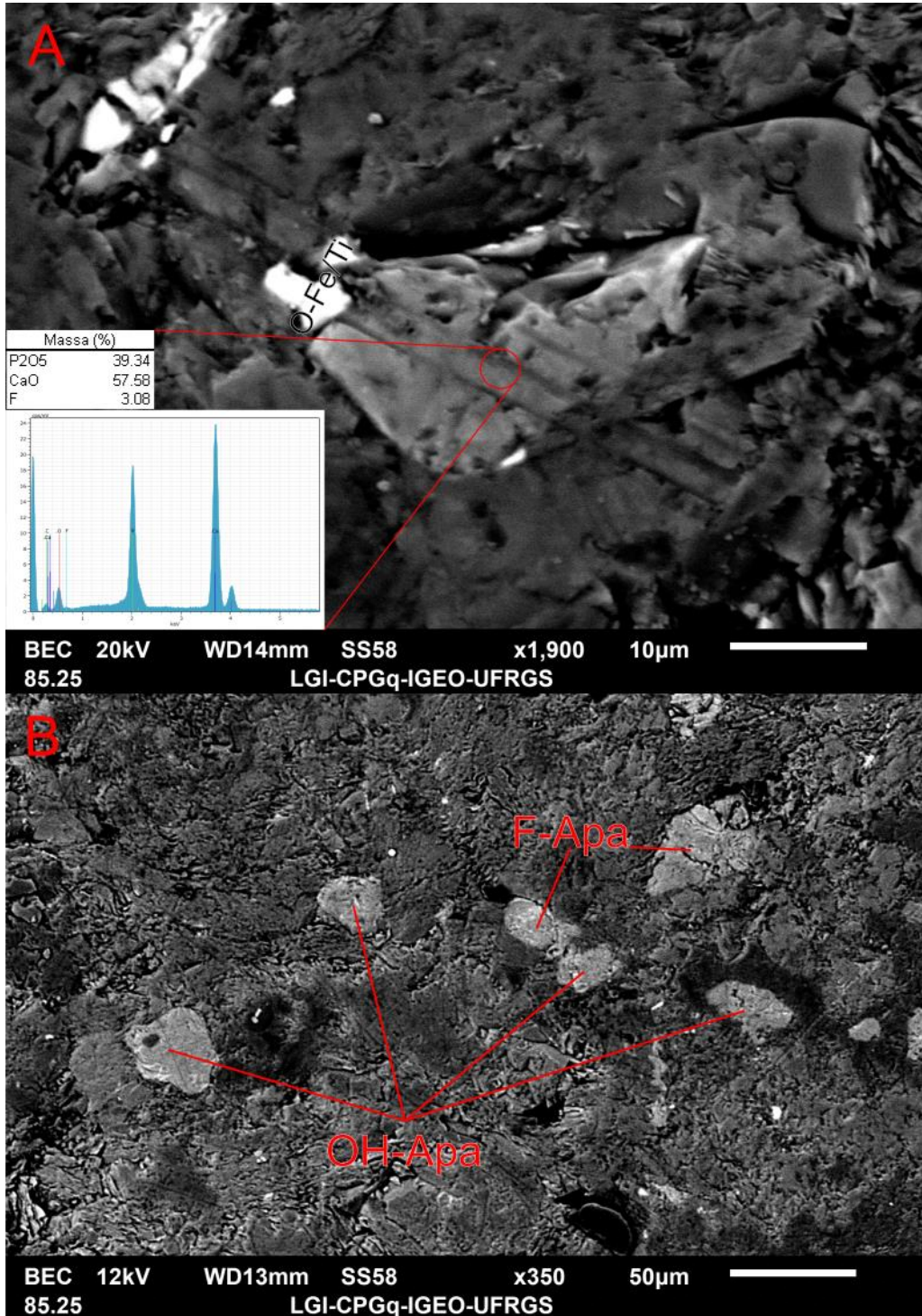


Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.8. Apatitas

Os cristais de apatita foram identificados em várias amostras de anfibolitos, tanto na petrografia quanto nas análises de MEV-EDS. Ocorrem como cristais aciculares ou prismáticos com cerca de 0,5cm ou como cristais menores dispersos na matriz. Além do mais, segundo as imagens geradas em MEV estes cristais ocorrem na maioria das vezes bordejando cristais de esfeno ou óxidos de ferro e titânio (**figura 46**). As análises de MEV-EDS mostraram a ocorrência de dois tipos de apatitas, sendo elas apatita-(CaF) e apatita-(CaOH) devido as suas diferentes concentrações de F. Os cristais de apatita-(CaF) ocorrem em maior quantidade e apresentam conteúdos variáveis de Cl. Os cristais de apatita-(CaOH) ocorrem com menor frequência e apresentam conteúdos menores de MgO que os cristais de apatita-(CaF). Em ambos os tipos foram observadas elevadas concentrações de ZrO<sub>2</sub> e concentrações menores de SiO<sub>2</sub>. Além disso, nenhum exemplar analisado apresentou conteúdos de ETRs. A **tabela 11** mostra a composição média observada em MEV-EDS desses cristais.

Figura 46 – A) Imagem BSB mostrando um cristal de apatita com sua composição e espectro. B) Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de apatita-(CaF) e apatita-(CaOH). F-Apa= Apatita-(CaF); OH-Apa=apatita-(CaOH); O-Fe/Ti=Óxido de ferro/Titânio.



Fonte: autor.

Tabela 11 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de apatita.

Composição	Apatitas-(CaF)		Apatitas-(CaOH)	
	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)
F	1.61 - 5.82	3.78	-	-
Cl	0 - 0.75	0.08	-	-
CaO	47.7 - 58.48	55.29	51.05 - 58.98	55.83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18.75 - 40.87	34.41	19.25 - 41.14	30.93
SiO <sub>2</sub>	0 - 5.36	0.32	0 - 4.78	1.77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0 - 1.00	0.25
MgO	-	-	0 - 1.30	0.33
ZrO <sub>2</sub>	0 - 24.1	6.12	0 - 22.61	10.90
	<b>n=21</b>		<b>n=4</b>	

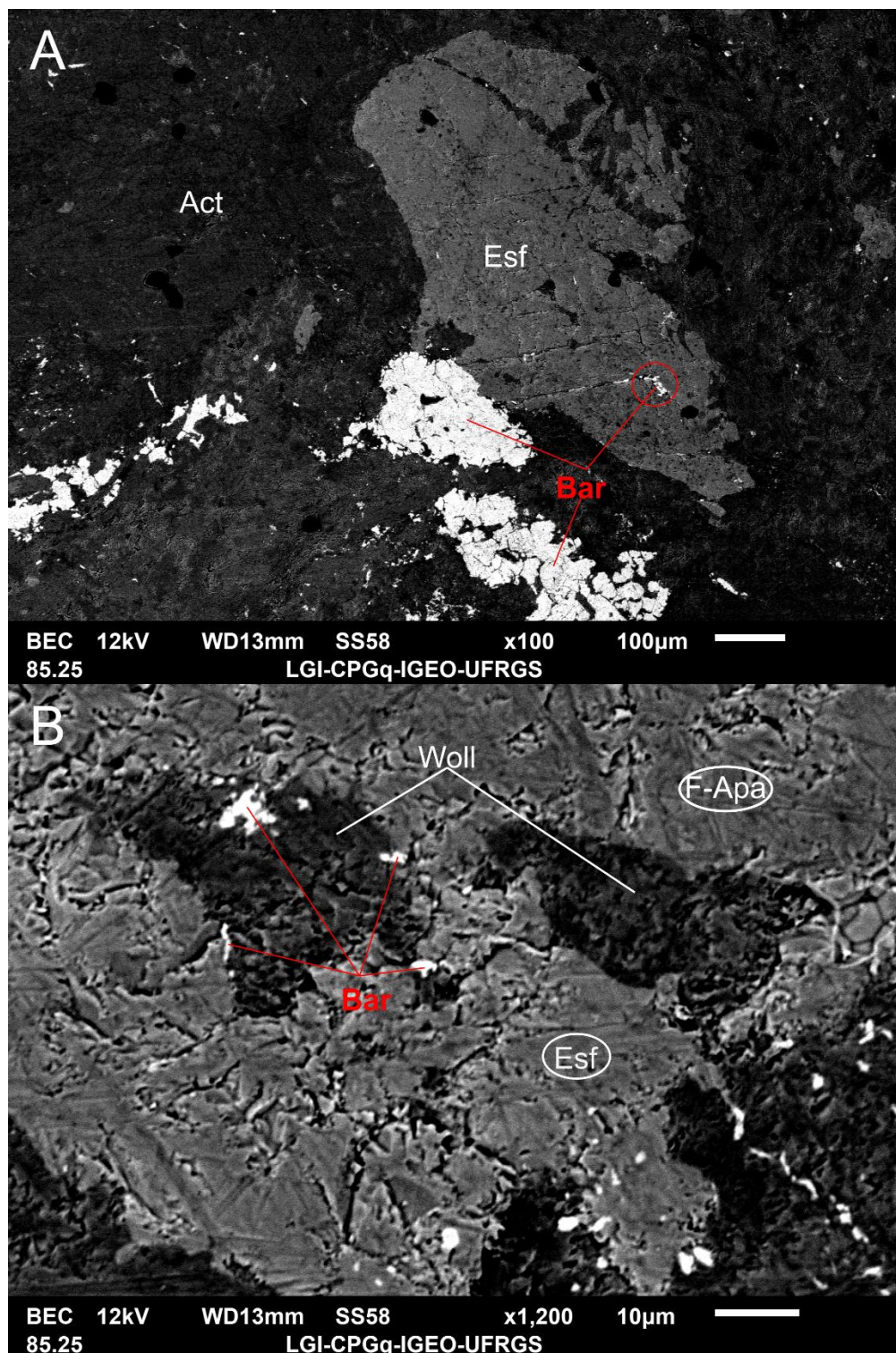
Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.9. Baritas

O grupo da barita é formado por, entre outros, uma solução sólida completa entre barita (BaSO<sub>4</sub>) e celestina (SrSO<sub>4</sub>). Além do mais, ambos cristais podem formar uma solução com a anidrita (CaSO<sub>4</sub>). Segundo as análises em MEV-EDS foram identificados cristais de barita, celestina e cristais com composições variáveis de SrO e BaO. Além disso, muitos desses cristais ocorrem com conteúdos de CaO.

As imagens de BSB da **figura 47** mostram que esses cristais ocorrem como uma massa amorfa preenchendo espaços vazios da rocha. Os 13 exemplares analisados em MEV-EDS mostraram presença de Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Nb com concentrações médias de 0.83% e 0.42%, respectivamente. Além do mais, foram observadas concentrações variadas de MgO, FeO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W e Re como mostrado na **tabela 12**.

Figura 47 – A) Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de barita na borda e nos planos de clivagem dos cristais de esfeno. B) Imagem de BSB mostrando cristais de barita de forma amorfa preenchendo espaços na rocha. Bar=Barita; Apa=Apatita; Esf=Esfeno; Act=Actinolita; Woll=Wollastonita.



Fonte: autor.

Tabela 12 – Valores de média e amplitude para 13 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de barita.

<b>Baritas</b>		
<b>Composição</b>	<b>Amplitude (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>W</b>	0 - 25.58	7.93
<b>Re</b>	0 - 15.83	1.22
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0 - 8.78	2.14
<b>SO<sub>3</sub></b>	22.9 - 42.53	31.85
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0 - 4.91	1.32
<b>CaO</b>	0 - 7.55	1.71
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0 - 16.1	2.22
<b>FeO</b>	0 - 9.55	1.64
<b>MgO</b>	0 - 8.43	2.70
<b>SrO</b>	0 - 61.62	23.12
<b>BaO</b>	0 - 41.45	22.90
<b>Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0 - 9.54	0.83
<b>Nb</b>	0 - 5.51	0.42
<b>n=13</b>		

Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.10. Allanitas

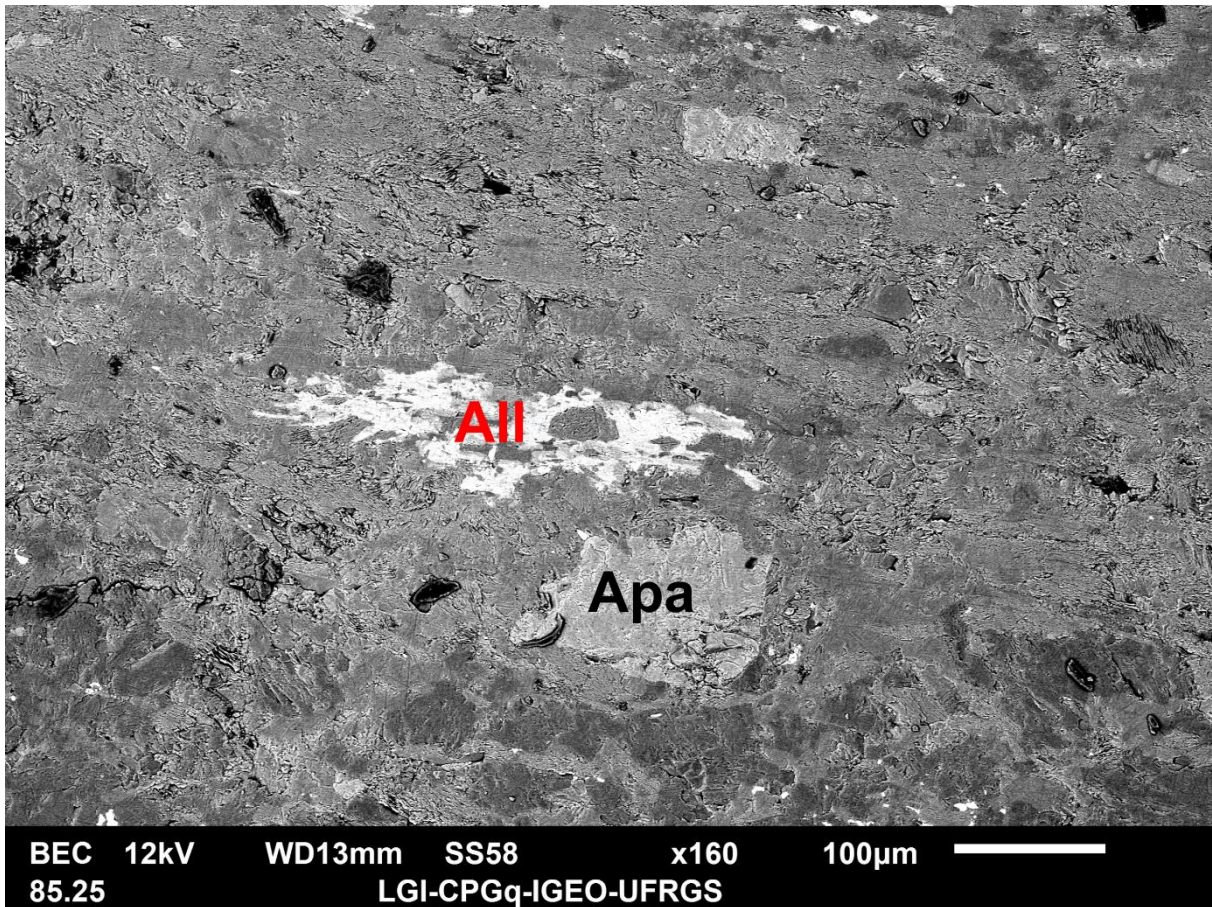
Os cristais de allanita ocorrem como uma massa amorfa distribuída na matriz da rocha de forma orientada de acordo com a foliação da rocha (**figura 48**). Foram analisados apenas 5 exemplares de allanita mostrando conteúdos de Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com uma concentração média 12.28%. Além disso, foi observada a presença de Te com concentrações médias de 0,51%. A **Tabela 13 13** mostra os resultados de média e amplitude composicional obtidos nas análises de MEV-EDS.

Tabela 13 – Valores de média e amplitude para 5 análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de allanita.

<b>Allanitas</b>		
<b>Composição</b>	<b>Amplitude (%)</b>	<b>Média (%)</b>
<b>Te</b>	0 - 2.55	0.51
<b>SiO<sub>2</sub></b>	37.52 - 41.30	39.29
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16.01 - 18.08	17.33
<b>CaO</b>	11.79 - 13.29	12.80
<b>FeO</b>	16.19 - 19.28	17.78
<b>Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10.99 - 14.10	12.28
<b>n=5</b>		

Fonte: autor.

Figura 48 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de allanita em uma amostra de anfibolito. All=Allanita; Apa=Apatita.

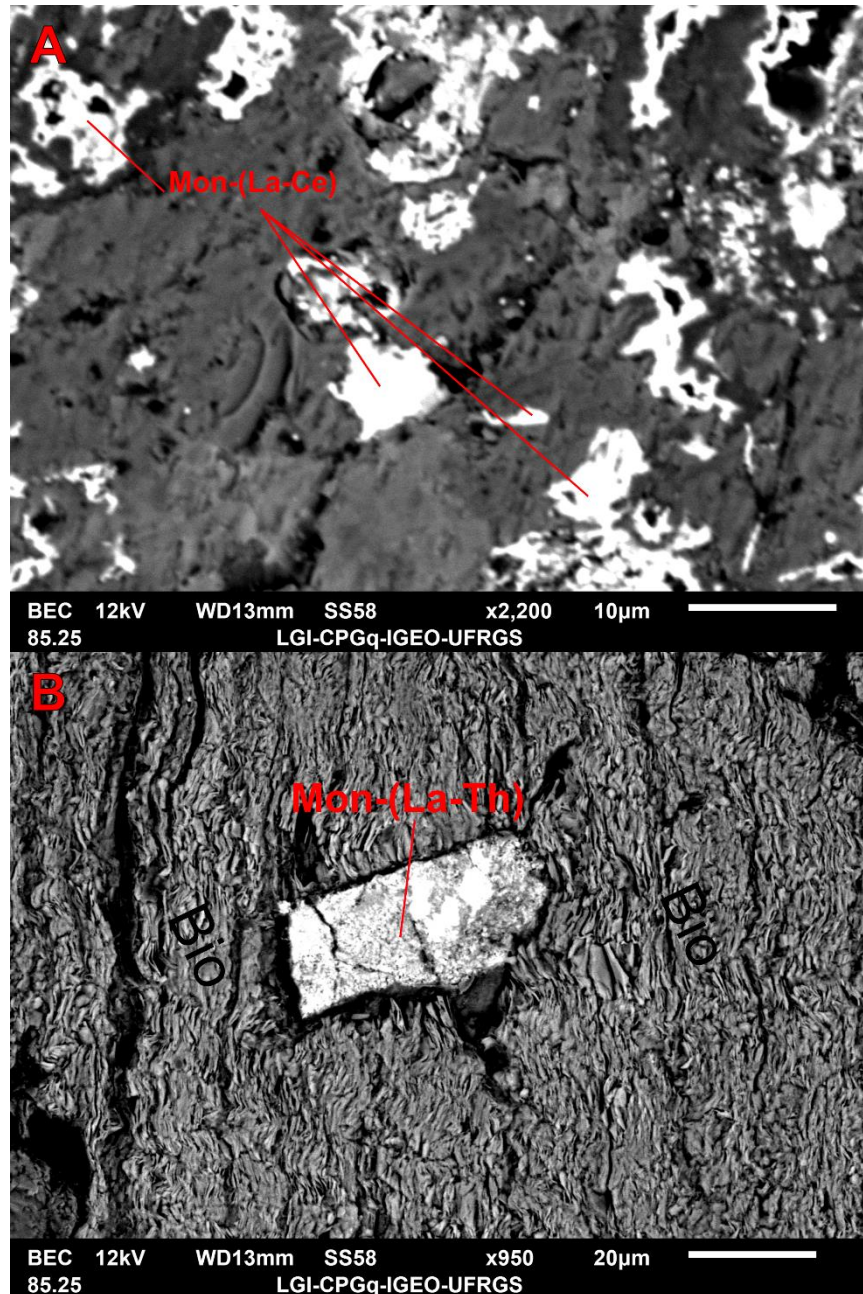


Fonte: autor.

#### 7.2.5.1.11. Monazitas

Os cristais de monazita observados ocorrem na maioria das vezes ou dispersos na matriz, ou associados às bordas de cristais de esfero e óxidos de ferro e titânio formando massas anédricas. Ocorrem também, em menor quantidade, como cristais maiores e mais bem formados associados a matriz da rocha. As análises realizadas em MEV-EDS mostraram que todos os exemplares apresentam maiores ou menores conteúdos de  $\text{La}_2\text{O}_3$  associados com variações no conteúdo de  $\text{ThO}_2$  e  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . Sendo assim, foram reconhecidas 3 variedades de monazitas segundo esses conteúdos observados nas análises de MEV-EDS, sendo elas: Monazita-(La), Monazita-(La-Ce) e Monazita-(La-Th) (figura 49).

Figura 49 – A) Imagem de BSB mostrando a distribuição dos cristais de monazita(La-Ce) dispersos na matriz de forma anédrica. B) Imagem de BSB mostrando um cristal de Mon-(La-Th) (as porções esbranquiçadas remetem a valores mais altos de Th). Mon=Monazita; Bio=Biotita.



Fonte: autor.

Os cristais de monazita-(La) apresentaram conteúdos variáveis de FeO e ZrO<sub>2</sub>. Em contrapartida, os cristais de monazita com conteúdos de cério apresentam concentrações de NaO<sub>2</sub>. A **tabela 14** mostra a média e amplitude composicional analisadas nesses cristais.

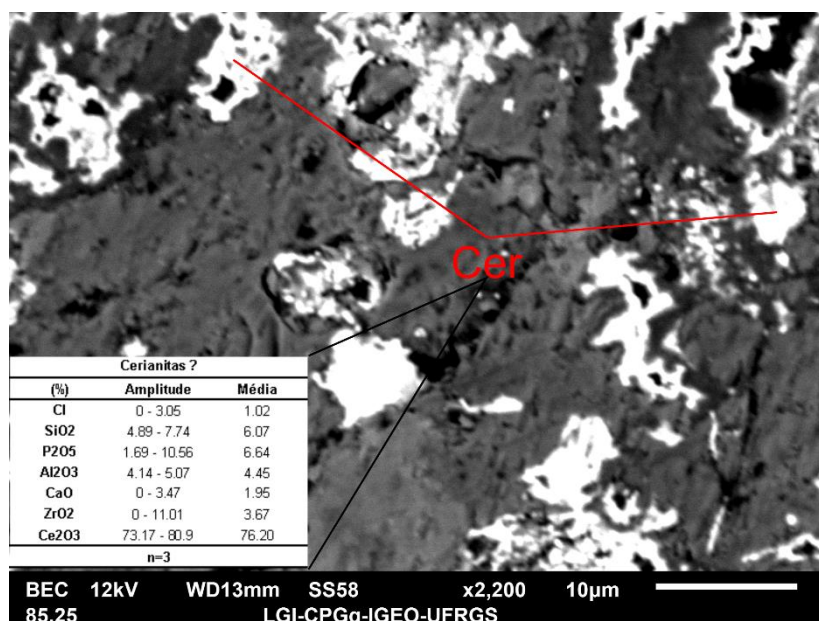
Tabela 14 – Valores de média e amplitude para as análises de MEV-EDS realizadas nos cristais de monazita.

Composição	Monazitas-(La)		Monazitas-(La)/(Ce)		Monazitas-(La)/(Th)	
	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)	Amplitude (%)	Média (%)
SiO <sub>2</sub>	0 - 5.34	2.39	0 - 26	7.45	0 - 13.49	5.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11.01 - 29.23	23.12	19.64 - 32.15	28.26	16.98 - 38.61	31.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.75 - 2.82	2.17	0 - 7.24	2.18	0 - 6.01	2.40
CaO	3.72 - 6.12	4.95	3.39 - 7.10	5.47	7.37 - 9.54	8.15
NaO <sub>2</sub>	-	-	0 - 5.46	1.36	-	-
FeO	0 - 43.4	27.41	-	-	0 - 15.80	3.92
ZrO <sub>2</sub>	0 - 27.87	10.75	-	-	0 - 16.32	3.57
ThO <sub>2</sub>	-	-	-	-	2.14 - 14.92	11.20
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	19.01 - 36.10	29.15	-	-
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.43 - 33.63	29.23	19.26 - 32.78	26.12	28.52 - 39.18	34.40
	n=4		n=4		n=8	

Fonte: autor.

Além disso, a partir dos resultados das análises de MEV-EDS foi possível observar a alteração de alguns cristais de monazina(La-Ce) para cerianita como mostrado na **figura 50**.

Figura 50 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de cerianita junto a valores médios e de amplitude observados em MEV-EDS. Cer=Cerianita.



Fonte: autor.

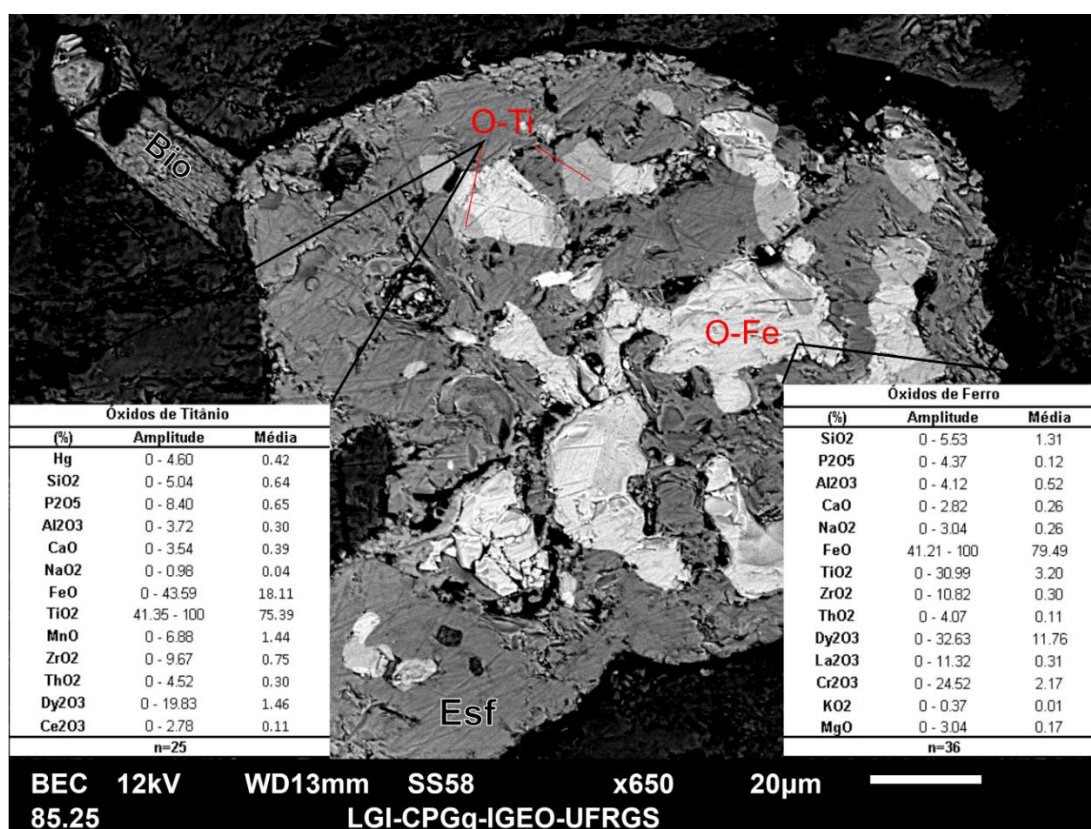


### 7.2.5.1.12. Óxidos e sulfetos

Os minerais de óxido são compostos por óxidos de FeO e TiO<sub>2</sub> (hematita, magnetita, ilmenita e rutilo) que formam cristais amorfos observados na rocha. Nas análises petrográficas e de MEV-EDS foi observado que estes cristais são gerados a partir da alteração de minerais ferromagnesianos como biotita e actinolita e cristais de esfeno pela geração de leucoxênio, aos quais geralmente ocorrem associados (figura 51).

Os óxidos de ferro analisados em MEV-EDS apresentam conteúdos de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO e importantes concentrações de La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.76%), ThO<sub>2</sub> (0.11%) e Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.310%). Nas análises realizadas nos óxidos de titânio foram observadas importantes concentrações, embora menores, de Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.11%), ThO<sub>2</sub> (0.30%) e Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.46%). Ambos os cristais apresentaram valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (figura 51).

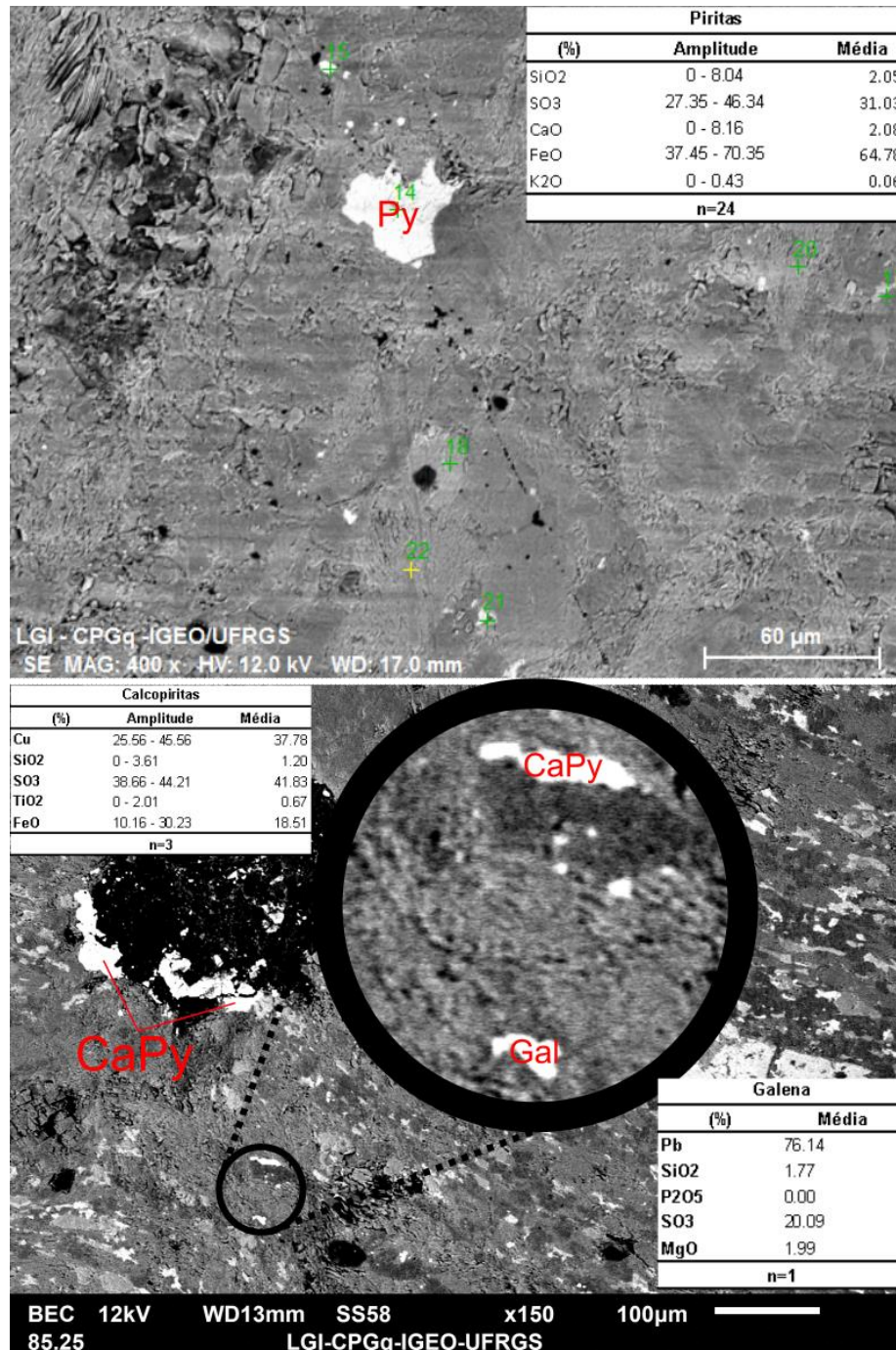
Figura 51 – Imagem de BSB mostrando a distribuição dos óxidos de ferro e titânio alterando um cristal de esfeno. As tabelas mostram os valores de média e amplitude para os minerais de óxido observados em MEV-EDS. O-Ti/Fe= Óxidos de ferro e/ou titânio.



Fonte: autor.

Os sulfetos observados em MEV-EDS são compostos por pirita, calcopirita e galena como mostrado na (figura 52).

Figura 52 – Imagem BSB mostrando a distribuição dos cristais de sulfeto junto com valores de concentrações médias e amplitudes observadas em MEV-EDS. Py=Pirita; CaPy=Calcopirita; Gal=Galena.

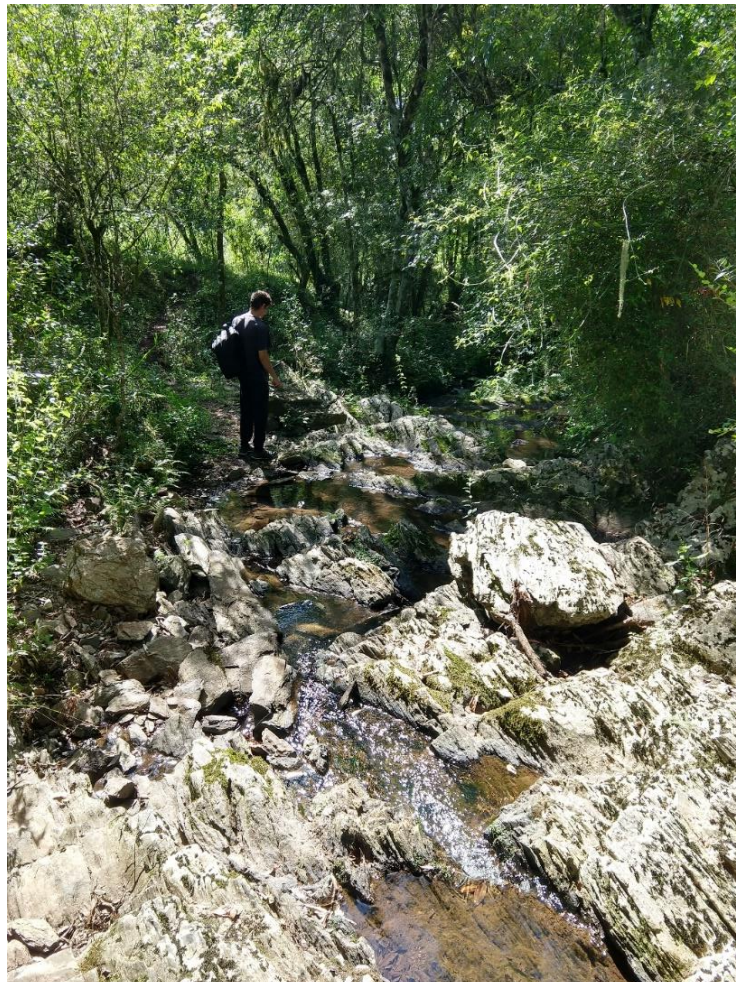


Fonte: autor.

### 7.3. Perfis

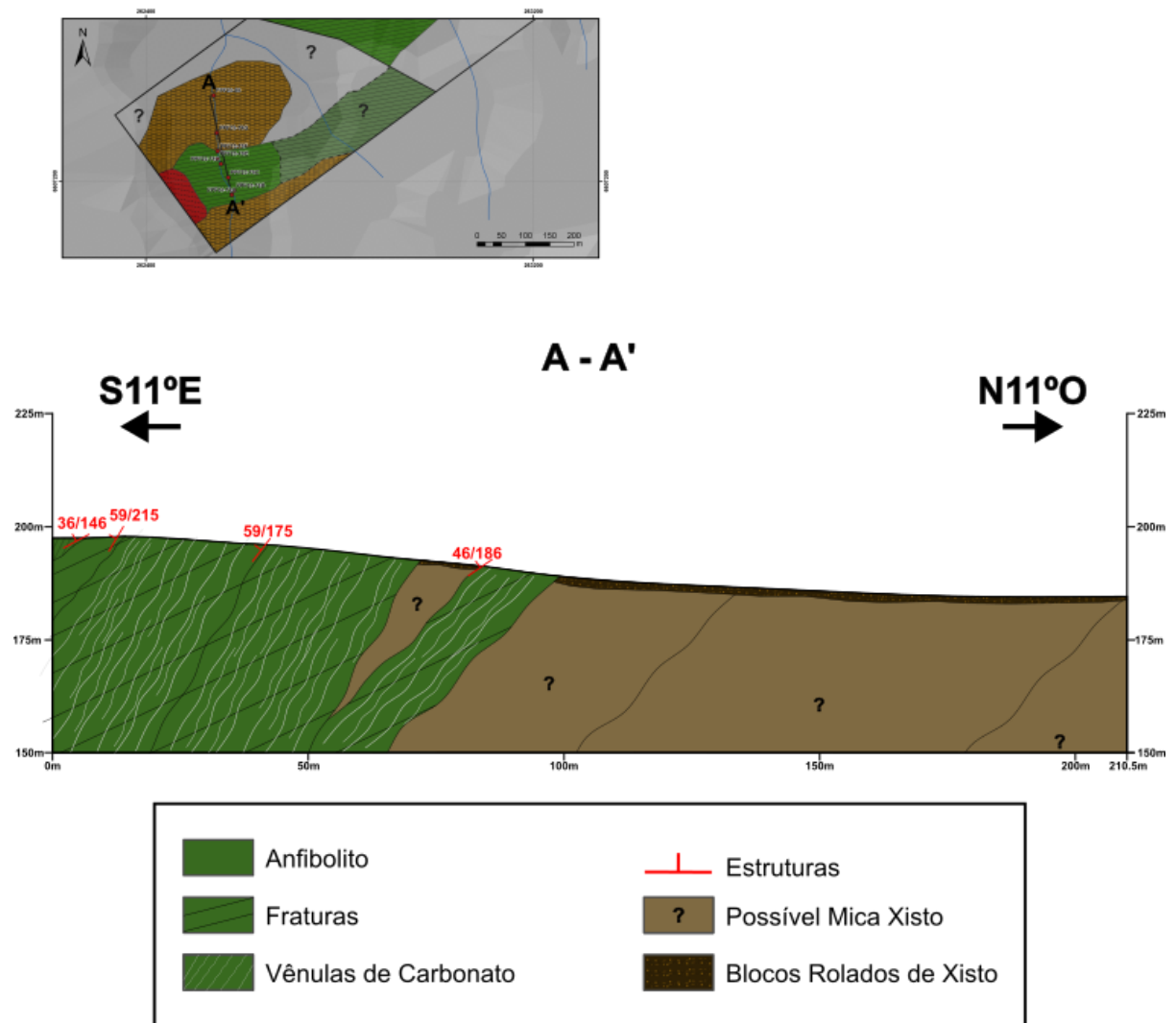
O perfil A-A' foi programado em campo e realizado em uma drenagem na porção oeste da área 2 (**figura 53**). Neste perfil foi observado uma intercalação entre rochas anfíbolíticas, com presença de carbonatos nos planos de foliação e nas fraturas perpendiculares a esta, e porções sem afloramentos compostas apenas por blocos rolados de mica xisto. Na seção desenhada foi possível representar com maior detalhamento os contatos litológicos não representados no mapa geológico. É possível observar um controle estrutural bem-marcado nas rochas destas porções com estruturas de foliação metamórfica mergulhando para sul (**figura 54**).

Figura 53 – Perfil A-A' realizado em uma drenagem na porção oeste da área 2. É notável a presença de uma lineação no afloramento cortada pela drenagem.



Fonte: autor.

Figura 54 – Representação em mapa e em seção do perfil A-A' realizado em campo. Foram calculados os mergulhos aparentes para representação das estruturas.

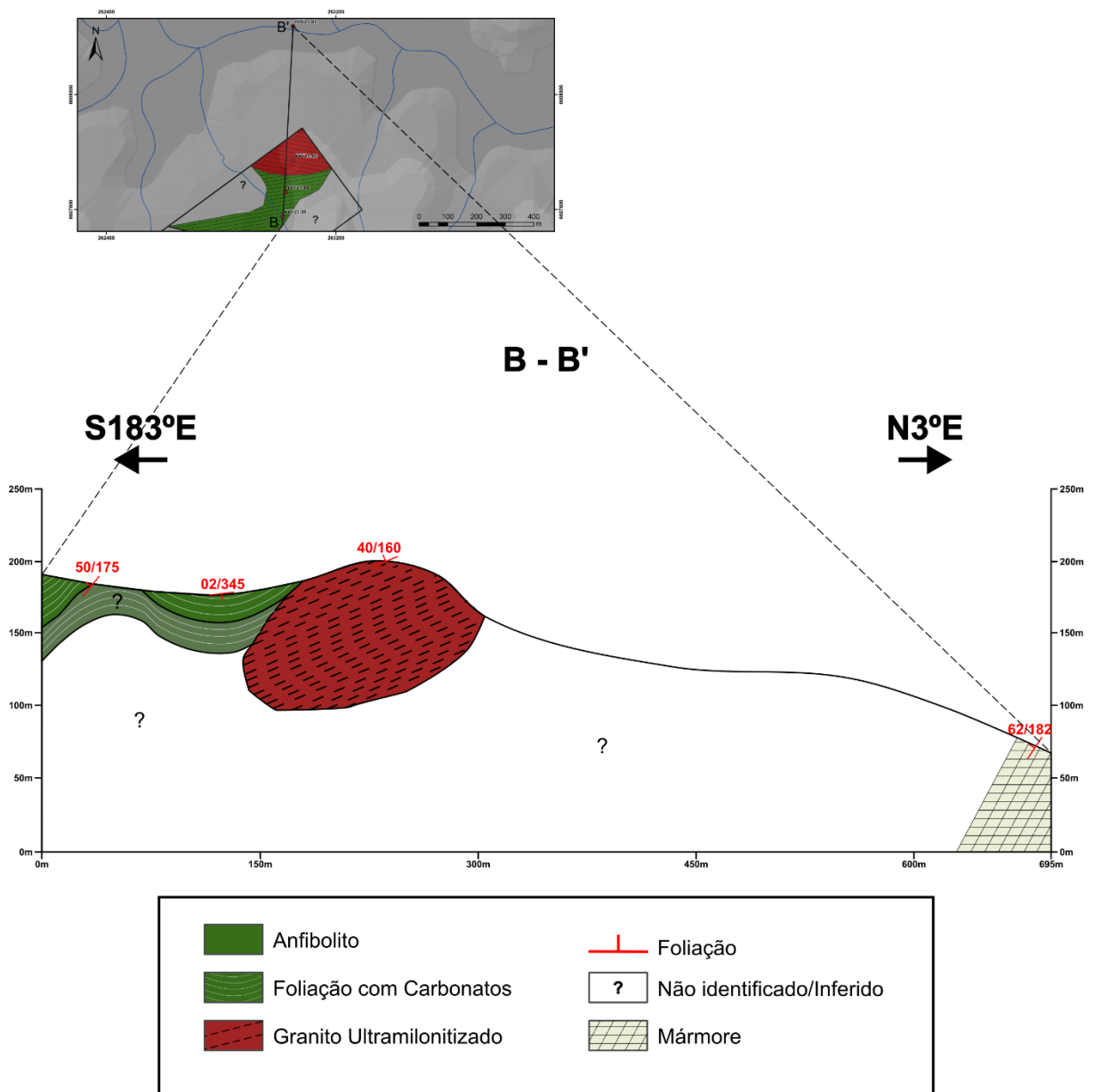


Fonte: autor.

O perfil B-B' foi elaborado também na área 2 com o intuito de ver a continuidade das rochas de interesse observadas na porção oeste. Este perfil se estende desde a porção mapeada até o afloramento de mármore encontrado no ponto PPF23-82.

Nesta seção foi possível representar um dobramento das rochas segundo as medidas realizadas em campo. Além disso, pôde-se aferir o contato dos granitos ultramilonitizados de acordo com o gradiente topográfico da área.

Figura 55 – Representação em mapa e em seção do perfil B-B' realizado em campo. Foram calculados os mergulhos aparentes para representação das estruturas.



Fonte: autor.

## 8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

### 8.1. Mapeamento geológico

Toda a região de estudo apresenta um contexto geológico complexo e de difícil interpretação. O Mapeamento revelou rochas classificadas como granitos ultramilonitizados, andesitos, xistos micáceos e anfibolitos, além de mármore na

porção norte da área 2. A escassez de afloramentos *in situ* combinado com a complexidade litológica, dificultou a demarcação dos contatos geológicos.

Todas as litologias da região ocorrem com um trend estrutural médio entre L-O e NE-SO observados nas imagens geofísicas gamaespectrométricas e magnetométricas e nos mapas geológicos apresentado nas **figuras 23, 24, 25 e 26**. Estas rochas apresentam-se basculadas com mergulho principal para sul e pequenas dobras suaves para norte. Além disso, ocorrem fraturas e vênulas perpendiculares à foliação com strike médio N-S (**figuras 54 e 55**).

Os granitos ultramilonitizados estão associados às porções de borda do granito Caçapava que ocorrem intensamente deformadas e intercaladas com as rochas do Complexo Metamórfico Passo Feio devido a sua intrusão. Bitencourt (1983) define o granito Caçapava como “uma variedade de rochas graníticas complexamente arrançadas, desde termos sienograníticos até granodioritos com raras ocorrências de tonalitos”. O mesmo autor cita que as rochas da borda sul se apresentam intensamente foliadas adquirindo um aspecto gnáissico. Desta forma, as diferentes fácies de granitos ultramilonitizados encontrados podem ser referentes as diferentes rochas graníticas que formam o granito Caçapava deformadas.

As demais rochas mapeadas são características da Formação Passo Feio. As rochas anfíbolíticas ocorrem de forma complexa, com diversos graus de metamorfismo e deformação, variando de maciça a fortemente foliada e com uma mineralogia composta basicamente por actinolita, tremolita, biotita, esfero, feldspato alcalino e plagioclásio e uma diversificada mineralogia acessória.

Não foram encontrados carbonatitos em nenhuma das áreas de estudo. Apesar disso, foi identificada a presença de rochas anfíbolíticas calcissilicáticas com minerais de carbonato em todas as áreas de estudo. Nos anfíbolitos foliados os carbonatos ocorrem, em maior ou menor concentração, inseridos nos planos de foliação ou preenchendo fraturas perpendiculares, gerando uma textura semelhante a um “muro de tijolos” (**figuras 35 D e 36**). Estas rochas foram identificadas principalmente na área 2 e estão geralmente associadas a minerais alcalinos, de feldspato alcalino e plagioclásio, e associados a um aumento expressivo no

conteúdo de biotita assemelhando-se a uma biotita xisto. Rochas calcissilicáticas semelhantes foram descritas por Bitencourt (1983) como:

Biotita calcoxistos de coloração castanha escura, às vezes nitidamente bandadas, contendo bandas de mármore impuros e quantidade variáveis de ankerita. Sua ocorrência é restrita, associada a anfibólio xistos e lentes de mármore impuro, exibindo contatos gradacionais com os últimos.

Além disso, as rochas calcissilicáticas mapeadas neste estudo apresentam uma vasta quantidade de minerais semelhantes àqueles descritos nos CCPT e CCPF. Morales (2017) descreve a mineralogia do CCPF como composta por carbonatos, apatitas, tremolitas, flogopitas, óxidos de ferro e titânio de primeira e segunda geração, zircões, pirita, barita, monazitas-(Ce) e aeschynitas-(Ce). Alves (2017) descreve a mineralogia do CCPT como composta por calcitas, apatita, magnetita, ilmenita, rutilo, zircão, badeleita, barita, torita, pirocloro, pirita, calcopirita, clorita, hematita, quartzo, biotita e minerais de elementos terras raras como monazita, pirocloro rico em Nb e Th, bastnaesita e allanita.

É também descrito por Alves (2017), um processo de fenitização em ambas as ocorrências de carbonatitos da região. Na ocorrência Picada dos Tocos, a rocha encaixante classificada como biotita anfibolito e composta por biotita e anfibólio (actinolita > cumingtonita) ocorre intensamente fenitizada ou por vênulas e stockworks de calcita, clorita especularita e pirita/calcopirita e quartzo ou com carbonatação da matriz e aumento significativo de apatita e magnetita. Além disso, o mesmo autor descreve na ocorrência Passo Feio uma rocha encaixante classificada como granada titanita hornblenda granofels a qual ocorre intensamente albitizada, caracterizando uma fenitização sódica. Processo semelhante é observado principalmente na amostra PPF22-32 com pouca concentração de carbonatos (**figura 35 E e figura 36 E e F**).

Nos anfibolitos maciços da área 4 foi identificada a presença de veios e vênulas de carbonatos com minerais alcalinos em arranjo stockwork. Esta alteração

é muito semelhante àquela encontrada nas rochas fenitizadas do CCPT descritos por Alves (2017). Além disso, diversas vênulas de feldspato alcalino, plagioclásio e por vezes actinolita são encontradas em muitas outras amostras de anfibolitos. Elliott (2017) classifica a fenitização em pervasiva ou venulada, sendo esta última caracterizada pelo preenchimento de fraturas inter ou intracristalinas ou espaços vazios da rocha por minerais alcalinos.

Vale salientar que estas rochas ocorrem encaixadas em zonas de falhas reconhecidas nas imagens geofísicas geradas pelos levantamentos magnetométricos, e estão associadas a zonas de anomalias gamaespectrométricas do canal de eTh as quais são importantes guias prospectivos para carbonatitos.

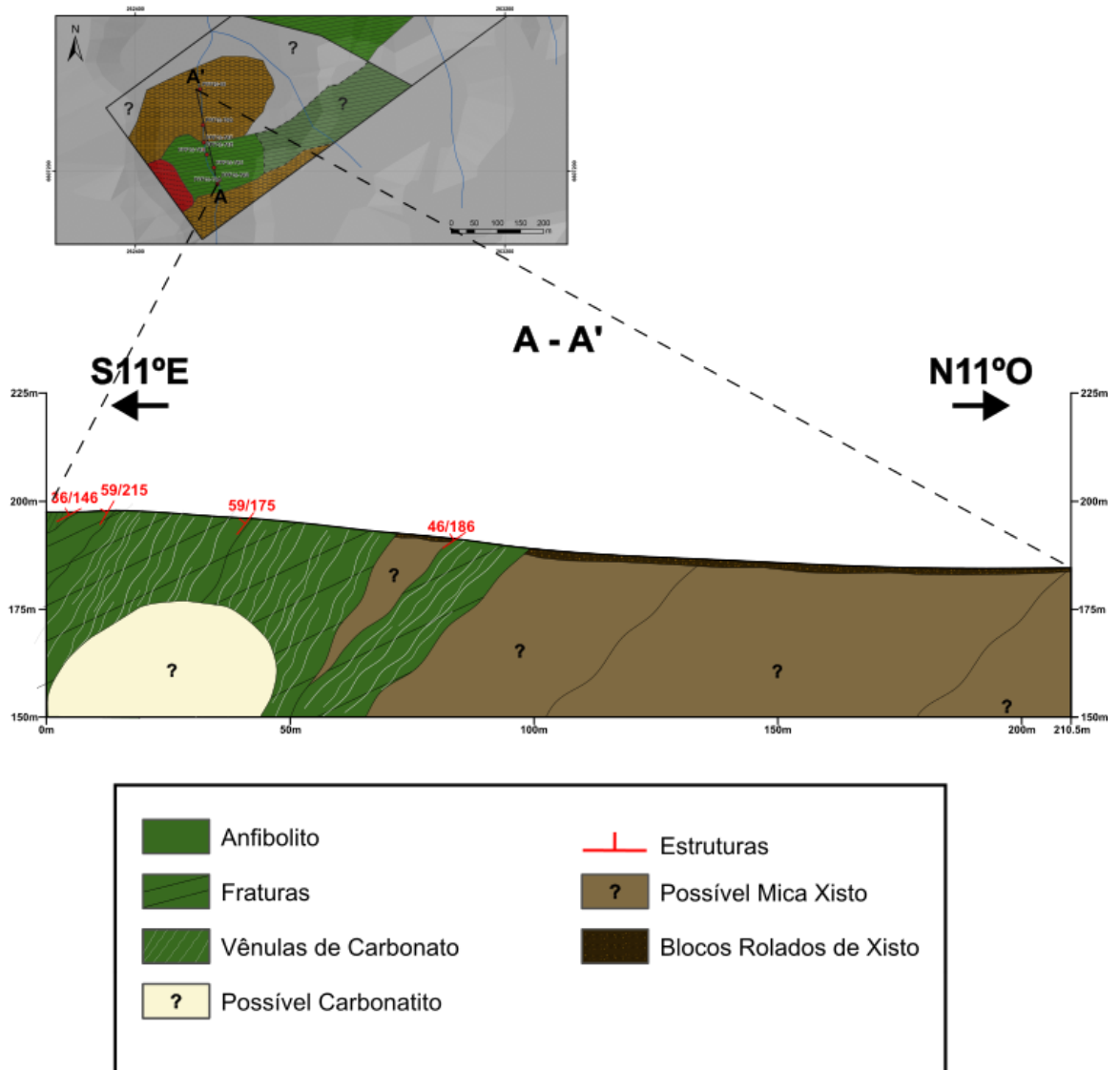
Desta forma, acredita-se que as rochas calcissilicáticas descritas e os anfibolitos com vênulas e veios de material alcalino ou carbonático, ocorram devido a um processo de fenitização gerado a partir de uma intrusão carbonatítica em subsuperfície como mostrado no perfil esquemático da **figura 56**. A distribuição dessas rochas é mostrada nos mapas das **figuras 57, 58, 59 e 60**.

Além disso, Bitencourt (1983) também descreve a presença de mármore impuros em contato gradacional com rochas calcilicáticas. Neste contexto, Lapin et al., (1988) cita rochas metassomáticas associadas a Zona Linear Carbonatítico-Fenítica Tatarskaya compostas por quartzo-biotita xistos, mármore (calcíferos com lentes de mármore dolomíticos) e anfibolitos, entre outras rochas. Desta forma os mármore encontrados a norte da área 2 podem ou não estarem associados a possível zona de fenitização da área. Configuração semelhante é encontrada na ocorrência do CCPT segundo a **figura 61**.

Apesar disso, a hipótese de uma intrusão carbonatítica só pode ser confirmada através de pesquisas mais detalhadas e robustas como furos de sondagem, abertura de trincheiras, geoquímica de solo e geoquímica de rocha, sendo estas duas últimas sugeridas como complemento deste trabalho.

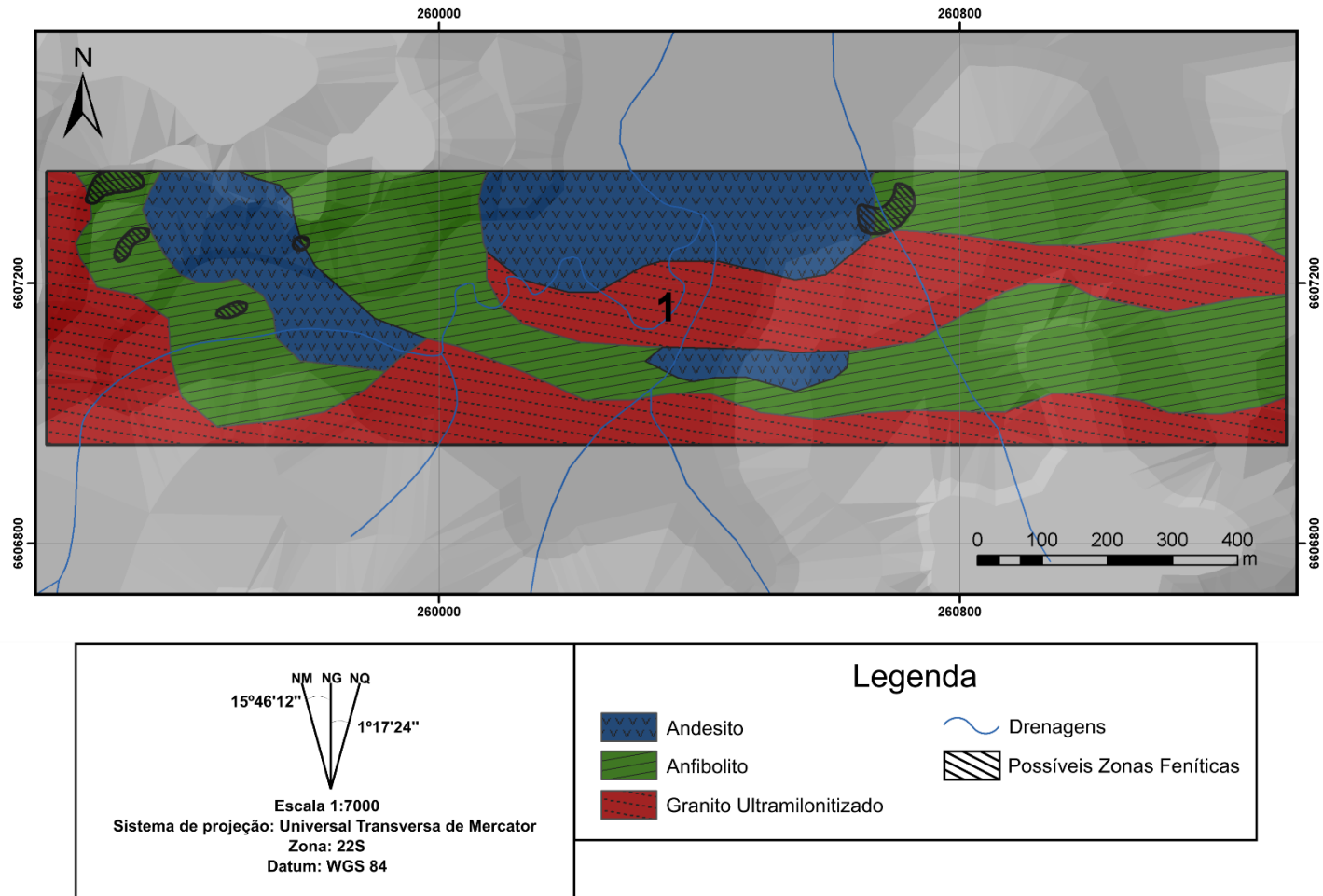


Figura 56 – Perfil esquemático mostrando a possível intrusão de um corpo carbonatítico em subsuperfície e sua relação com as rochas fenitizadas.



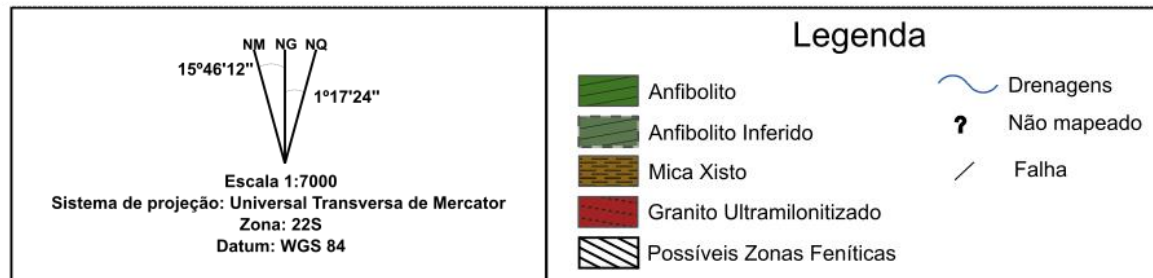
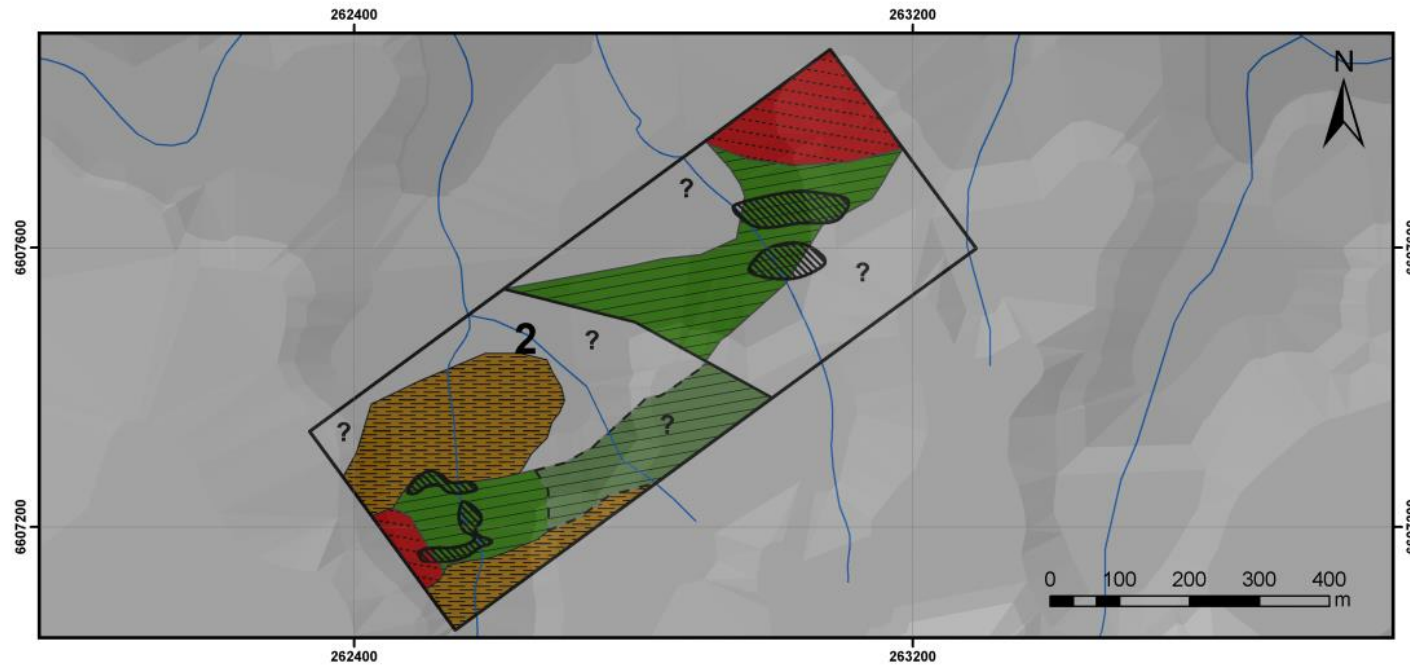
Fonte: autor.

Figura 57 - Mapa geológico da área 1 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.



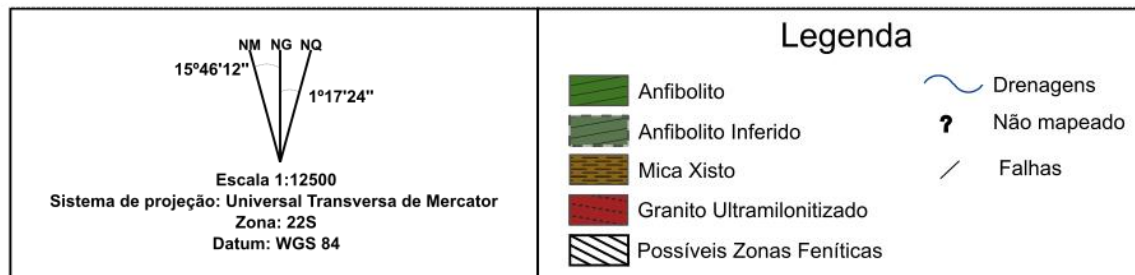
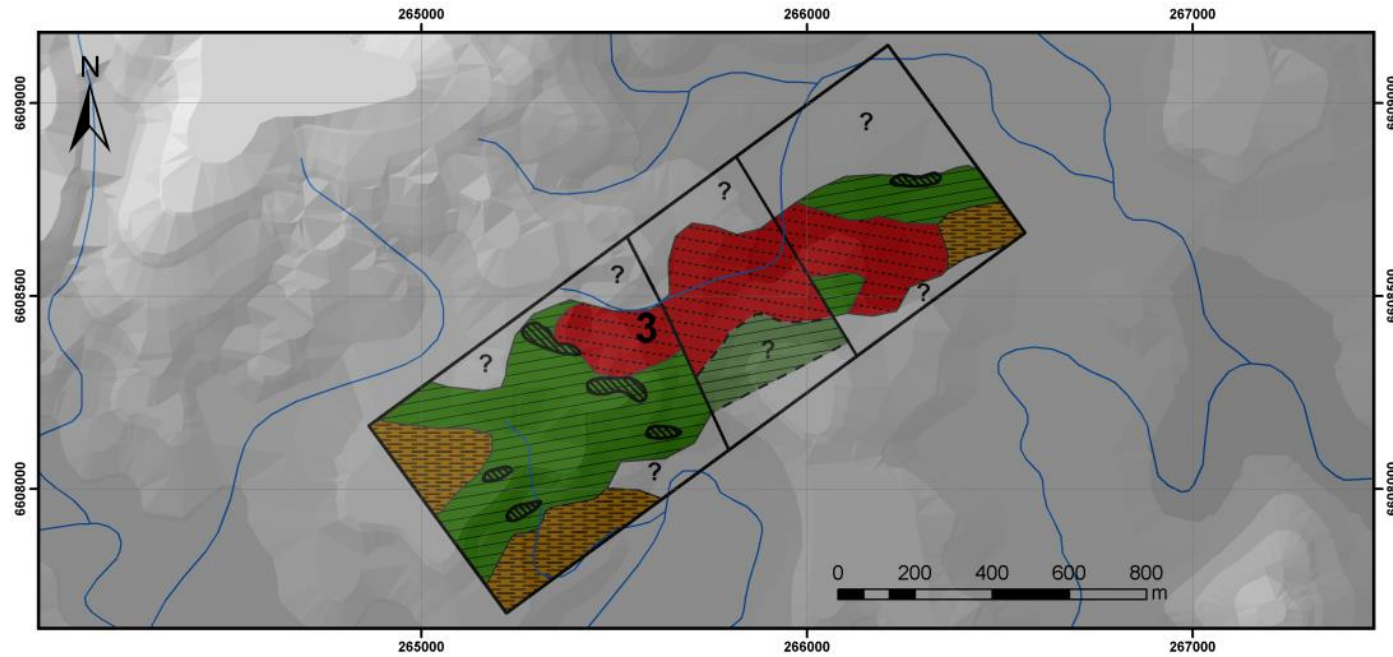
Fonte: autor.

Figura 58 - Mapa geológico da área 2 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.



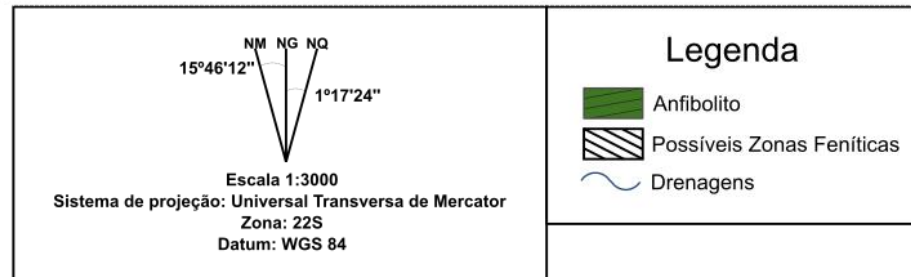
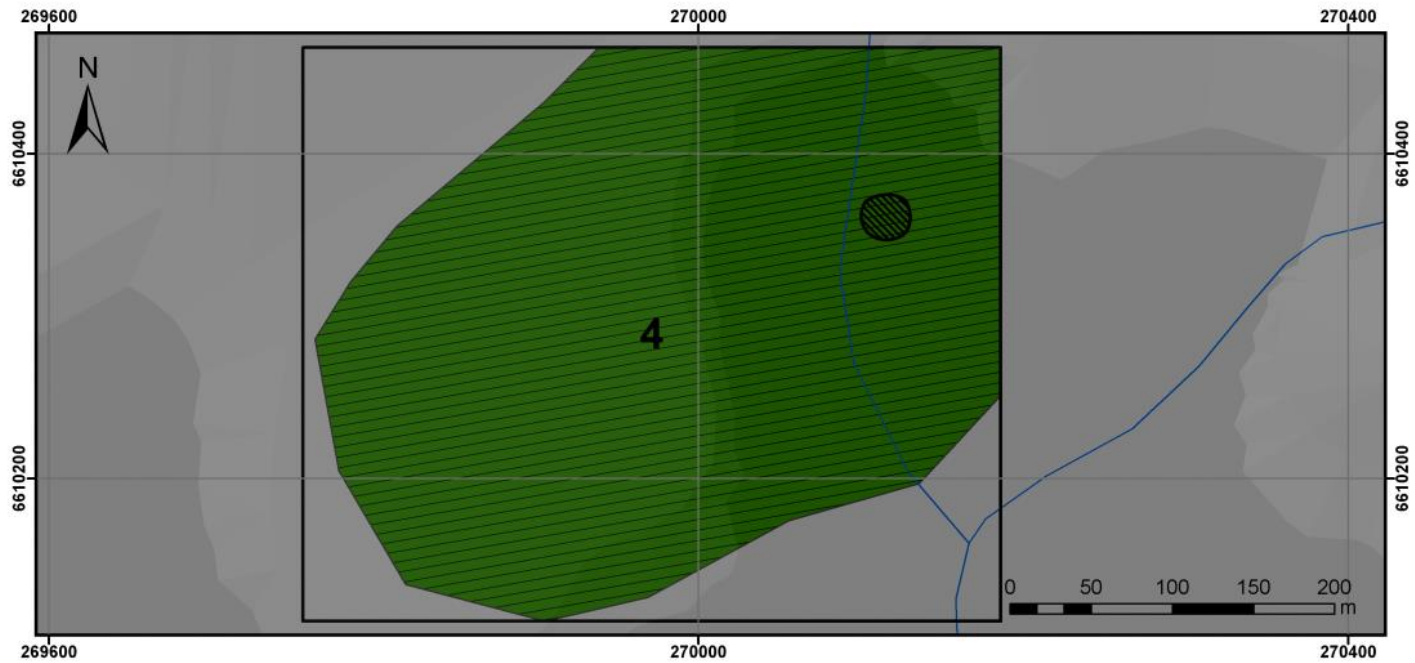
Fonte: autor.

Figura 59 - Mapa geológico da área 3 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.



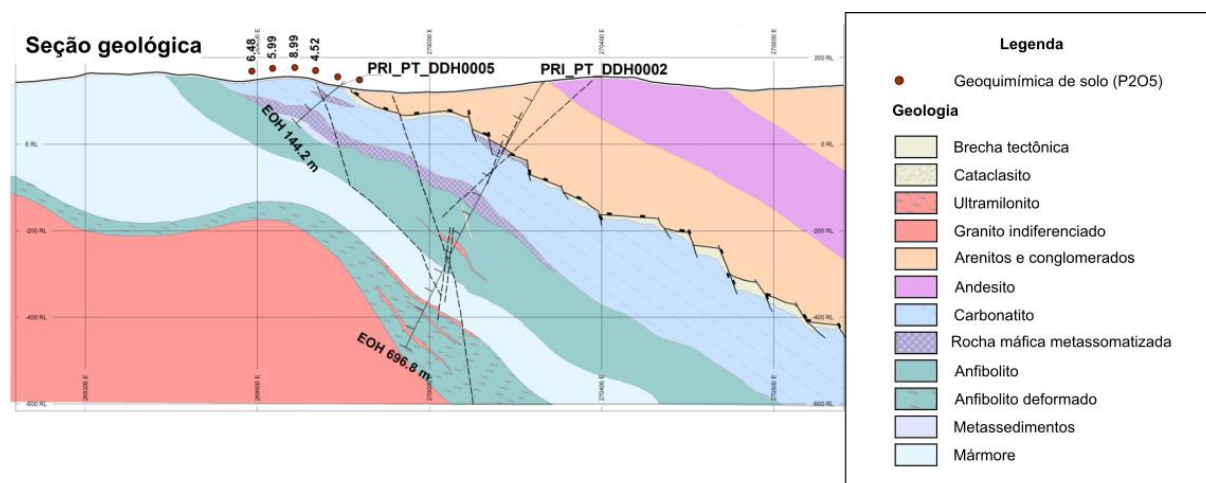
Fonte: autor.

Figura 60 - Mapa geológico da área 4 enfatizando as zonas feníticas interpretadas com relevo sombreado.



Fonte: autor.

Figura 61 – Seção realizada no projeto primavera liderado pelo GMVB mostrando a proximidade do CCPT com os mármore.



Fonte: extraído e modificado de Rocha et al. (2013).

## 8.2. Química mineral

As análises de química mineral revelaram a presença de ETRs leves e pesados, Nb e  $P_2O_5$  em diversos minerais encontrados nas rochas anfíbolíticas, dentre eles meróxeno, esfenos, baritas, allanita, monazitas e óxidos de ferro e titânio.

Nos meróxeno foi encontrada a presença de concentrações de Dy (ETR pesado). É interessante notar uma correlação entre as concentrações de Dy e o aumento de  $MgO$ , pois nenhum outro mineral de biotita apresentou tais concentrações. Os CCPT e CCPF são compostos por grande quantidade de flogopita, mineral mais magnésiano do grupo da biotita.

Esfenos podem ocorrer com maiores ou menores impurezas de Nb. Desta forma, era esperado encontrar conteúdos de Nb nesses minerais. Apesar disso, essas concentrações são consideradas baixas de acordo com Liferovich (2005).

Os minerais de apatita são importantes fontes de fosfato ( $P_2O_5$ ). Nas análises de MEV-EDS realizadas foi encontrado dois tipos principais de apatitas: apatita-(CaF) e apatita-(CaOH). Além disso, não foram encontradas concentrações de ETRs nesses cristais. Situação semelhante ocorre nas apatitas do CCPF (Morales, 2017).

Os cristais de allanita e monazitas são importantes portadores de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  e  $\text{La}_2\text{O}_3$  (ETRs leves). As allanita ocorrem de forma amorfa inseridas nos espaços da rocha e concentrações de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  em iguais proporções de peso. Os cristais de monazitas ocorrem tanto de forma amorfa quanto como cristais mais bem formados e apresentam conteúdos importantes de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  e  $\text{ThO}_2$ , além de serem importantes fontes de  $(\text{P}_2\text{O}_5)$ . Algumas análises nesses cristais mostraram elevadas concentrações de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  indicando a presença de alteração para cerianita. Cristais de monazitas gerados a partir da remobilização de ETRs em apatitas são descritos por (Morales, 2017) no CCPF.

Os cristais do grupo da barita analisados ocorrem também como uma massa amorfa que preenche espaços vazios e planos de clivagem de cristais de esfeno. As análises em MEV-EDS apresentaram concentrações de Nb e  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  para esses cristais. A presença de Nb pode estar associada as reações com cristais de esfeno com contaminações. A presença de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  pode estar relacionada a atividade hidrotermal.

Os óxidos de ferro e titânio ocorrem em muitas porções alterando os cristais de esfeno. Essa alteração é denominada como leucoxênio e pode gerar concentrações de minerais portadores de ETRs. Os resultados gerados por MEV-EDS revelaram importantes concentrações de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  e  $\text{ThO}_2$  nesses cristais.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. de, HASUI, Y., NEVES, B.B. de B., FUCK, R.A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth-Science Reviews**. v. 17, n. 1-2, p. 1-29. 1981.

BITENCOURT, M. de F. A. S. **Geologia, Petrologia e Estrutura dos Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS**. Unpublished M.Sc. Thesis, Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

BOGO, C. M. **Gênese, Evolução E Significado Geotectônico Do Complexo Alcalino-Carbonatítico Três Estradas, RS**. Brasília – DF: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, 2020.

BRÖGGER, W. C. **Die Eruptivgesteine des Kristianiagebietes**. 3º edição. 1921.

CERVA-ALVES, T. **Geologia Dos Carbonatitos Ediacaranos de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil**. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

CHAKHMOURADIAN, A. R., REGUIR, E. P., & ZAITSEV, A. N. Calcite and Dolomite in Intrusive Carbonatites. I. Textural Variations. **Mineralogy and Petrology**. v. 110 n. 2-3, p. 333-360. 2016.

CHEMALE JR., F. **Evolução Geológica do Escudo Sul-Riograndense. Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Centro de Investigação do Gondwana, Instituto de Geociências, UFRGS, 2000.

DENTITH, M., MUDGE, S. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

ELLIOTT, H.A.L., WALL, F., CHAKHMOURADIAN, A.R., SIEGFRIED, P.R., DAHLGREN, S., WEATHERLEY, S., FINCH, A.A., MARKS, M.A.W., DOWMANH, E., DEADY, E. Fenites associated with carbonatite complexes: A review. **Ore Geology Reviews**, v. 93, p. 38-59. 2018.



FENDLEY, S. B., SIEGFRIED, P. R., WALL, F. O'NEILL, M., BROOKER, R. A., FALLON, E. K. PICKLES, J. R., BANKS, D. A. The origin and composition of carbonatite-derived carbonate-bearing fluorapatite deposits. **Mineralium Deposita**, v. 56, p. 563-884. 2021.

GOLD, D. P. Average chemical composition of carbonatites. **Economic Geology**, v. 58, n. 6, p. 988-991. 1963.

JÁCOMO, M.H., BROD, T. C. J., PIRES, A. C. B., BROD, J. A., PALMIERI, M., MELO, S. S. V. de. Magnetic Susceptibility And Gamma-Ray Spectrometry on Drill Core: Lithotype Characterization And 3D Ore Modeling of the Morro do Padre Niobium Deposit, Goiás, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 33, n. 2, 261-275. 2015.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2009.

KOESTER, E., BERTOTTI, A. L., PORCHER, C. C., LENZ, C., VIEIRA, D. T., OLMO-BARBOSA, L. DaI, RAMOS, R. C., BASTOS, V. A., PINTO, V. M. A Evolução Crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a Perspectiva dos Sistemas Isotópicos Sr-Nd. In: JELINEK, A. R., SOMMER, C. A. **Contribuições À Geologia Do Rio Grande Do Sul e de Santa Catarina**. 1ª Edição. Porto Alegre - RS: Editora Compasso Lugar Cultura, 2021. p. 13-27.

KRAVCHENKO, S. M., BAGDASAROV, Y. A., LAPIN, A. V. New Data on the Geology and Minerageny of Carbonatite Associations. **International Geology Review**, v. 30, n. 11, p. 1208-1216. 1988.

LAPIN, A. V., PLOSHKO, V. V. Rock-Association and Morphological Types of Carbonatites and their Geotectonic Environments. **International Geology Review**, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements [IMGRE], Moscow, v. 30, n. 4, p. 390-396. 1988.

LE BAS, M. J. Fenites associated with carbonatites. **The Canadian Mineralogist**, v. 46, n. 4, p. 915-932. 2008.

LE MAITRE, R. W. **Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission**

on the Systematics of Igneous Rocks. 2ª Edição. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

LIFEROVICH, R., MITCHELL, R. Composition and paragenesis of Na-, Nb-and Zr-bearing titanite from Khibina, Russia, and crystal-structure data for synthetic analogues. **The Canadian Mineralogist**, v. 46, n. 2, p. 795-812. 2005.

MARTINS C., LIMA P.C.R., TEIXEIRA L.S., TEIXEIRA M.P., QUEIROZ FILHO A.P. **Minerais Estratégicos e Terras-Raras. Centro de Documentação e Informação.** Edições Câmara, Brasília, Distrito Federal, Série estudos estratégicos. 2014.

MITCHELL, R. H. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. **Ore Geology Reviews**, v. 64, p. 626-641. 2015.

MORALES, B. A. de A. **Petrologia do Carbonatito Passo Feio, Ênfase no Comportamento dos ETR, Caçapava do Sul – RS.** Caçapava do Sul: Universidade Federal do Pampa, 2017.

NERC – **Natural Environment Research Council. Rare Earth Elements.** British Geological Survey, Mineral profiles, p. 54. 2011.

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. São Paulo – SP: **Brazilian Journal of Geology**, v. 46. 2016.

RAITH, M. M., RAASE, P. R., & REINHARDT, J. R. **Guide to thin section microscopy.** University of Bonn. 2011.

RAMOS, R. C., KOESTER, E., VIEIRA, D. T., PORCHER, C. C., GEZATT, J. N., SILVEIRA, R. L. Insights on the evolution of the Arroio Grande Ophiolite (Dom Feliciano Belt, Brazil) from Rb-Sr and SHRIMP U-Pb isotopic geochemistry. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 86, p. 38-53. junho, 2018.

REMUS, M. V. D., HARTMANN, L. A., MCNAUGHTON, N. J., GROVES, D. I., FLETCHER, I. R. The Link Between Hydrothermal Epigenetic Copper Mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in Southern Brazil. **Journal of South America Earth Science**, v. 13, n. 3, p. 191-216. 2000.

RIBEIRO, M. J., BOCCHI, P. R., FIGUEIREDO F. P. M., TESSARI, R. I. **Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro - RJ: Boletim n°.127, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1966.

RIBEIRO, M. **Geologia da Folha de Bom Jardim, Rio Grande do Sul, Brasil**. Rio de Janeiro - RJ: DNPM, Divisão de Geologia e Mineralogia, 1970

RIBEIRO, V. B., MANTOVANI, M. S. M., LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas Aplicações no Mapeamento Geológico. **Terra Didática**, Campinas – SP, v. 10, n. 1, p. 29-51. 2014.

RICHARDSON, D. G., BIRKETT, T. C. **Carbonatite-associated deposits. Geology of Canadian Mineral Deposit Types**. Eckstrand OR, Sinclair WD, Thorpe RI (eds) Geological Survey of Canada, Ottawa, p. 541-558. 1996.

ROCHA, A. M. R. DA, DORNELES, N. T., GINDRI, M. D., BENETTI, F. A., VARGAS J. M., ALVES T. C. Simpósio Brasileiro De Metalogenia, 3., 2013, Gramado – Rio Grande do Sul.

SIMANDL, G. J., SUZANNE, P. Carbonatites: related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. **Applied Earth Science**, v. 127, n. 4, p. 123-152. 2016.

SOLIANI JR, E. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. São Paulo – SP: Universidade de São Paulo, 1986.

STOCKES, J. D. **Principles and practice of variable pressure: environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM)**. John Wiley & Sons. 2008.

STRECKEISEN, A. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. **Geologische Rundschau**, v. 69, n. 1, p. 194 – 207, fevereiro. 1980.

SUMIDA, V. Y. D. **Investigação Geofísica (Magnetometria) No Carbonatito Da Fazenda Varela, Domo De Lages, Sc.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017.

VALLE, L. G. R. de S. **Gamaespectrometria E Mineralogia De Sedimentos Carbonáticos Na Lagoa Brejo Do Espinho (Rj) Durante O Holoceno.** Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2021.

VEEVERS, J.J., Pan-Gondwanaland Post-Collisional Extension Marked by 650-500 Ma Alkaline Rocks and Carbonatites and Related Detrital Zircons: A Review. **Earth-Science Reviews.** v. 83, n. 1-2, p.1-47. 2007.

VEEVERS, J.J., Gondwanaland from 650-500Ma Assembly Through 320Ma Merger in Pangea to 185-100Ma Breakup: Supercontinental Tectonics via Stratigraphy and Radiometric Dating. **Earth-Science Reviews.** v. 68, n. 1-2. P. 1-132. 2004

VERPLANCK, P. L., & VAN GOSEN, B. S. **Carbonatite and alkaline intrusion-related rare earth element deposits—a deposit model.** US Geological Survey. 2011.

WINTER, J.D. **An introduction to igneous and metamorphic petrology.** Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey. 2001.

XU, G., 1995. Rare earths, second ed. **Metallurgical Industry Press**, Beijing, pp. 364–466.