



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS  
GLIMERÍTICAS DO COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO TRÊS  
ESTRADAS, LAVRAS DO SUL, RS**

**GUILHERME ANNES MARTINEZ**

Porto Alegre, 2019

**GUILHERME ANNES MARTINEZ**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS  
GLIMERÍTICAS DO COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO TRÊS  
ESTRADAS, LAVRAS DO SUL, RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentação na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Carlos Frantz

Porto Alegre, 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Opermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

CIP - Catalogação na Publicação

Martinez, Guilherme

Caraterização petrográfica e geoquímica do Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas, Lavras do sul, RS / Guilherme Martinez. -- 2019.

73 f.

Orientador: José Carlos Frantz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Glimerito. 2. Rochas Glimeríticas. 3. Metassomatismo. 4. Complexo Alcalino-Carbonatítico Três Estradas. I. Frantz, José Carlos, orient. II. Título.

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Geociências  
Departamento de Mineralogia e Petrologia  
Curso de Graduação em Geologia**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS GLIMERÍTICAS DO COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO TRÊS ESTRADAS, LAVRAS DO SUL, RS**”, elaborado por “**GUILHERME ANNES MARTINEZ**”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

**Prof. Dr. Ruy Paulo Phillipp**

---

**Prof. Dr. Laercio Dal Omo Barbosa**

---

**Prof. Dr. Rommulo Viera Conceição**

**Porto Alegre, dezembro de 2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que tornaram esse trabalho possível.

A Empresa Água Fertilizantes, por disponibilizar tempo, material, dados e uma experiência única, sem as quais esse trabalho jamais seria possível.

Aos meus amigos que formei ao longo do curso e os de longa data, os quais sempre estiveram dispostos quando precisei durante esses 6 longos anos. Obrigado pelos momentos divertidos e inesquecíveis que vocês me proporcionaram, o caminho teria sido muito mais árduo sem a presença de cada um. Vocês moram no meu coração.

Ao meu orientador, José Carlos, pelos ensinamentos e pela paciência e ao Fabrício, pelos mesmos motivos.

Ao Natanael, pelos auxílios prestados nesses últimos meses.

Aos professores Vitor, Artur e Urso, e professora Carla pela paciência e disponibilidade em me locar a sala de MEV.

Ao meu irmão, André.

A Fernanda, pelo companheirismo dos últimos meses e por toda a paciência que teve comigo no período final da graduação, pelas quantidades incalculáveis de jantares que me proporcionou nesses tempos turbulentos e por tudo que tem me proporcionado.

E em especial, um agradecimento à minha mãe, Maria Elizabeth, cuja presença na minha vida foi essencial para eu chegar aonde cheguei.

*O começo de todas as ciências é o  
espanto de as coisas serem o que são.*

Aristóteles

## RESUMO

As ocorrências de corpos carbonatíticos no Rio Grande do Sul são raras e os estudos relacionados a essas manifestações ainda são recentes. Um dos carbonatitos com maior visibilidade atual é o carbonatito Três Estradas, tanto pelo seu interesse científico quanto econômico. As análises petrográficas mais recentes, do carbonatito e de suas rochas adjacentes, identificaram a ocorrência de metacarbonatito, anfíbolito, metasienito e gnaisse (embasamento), sendo todas elas intensamente deformadas. Todavia, processos de alteração metassomática são característicos de intrusões alcalino-carbonatíticas, cujo magma inicial tem uma composição mais básica até que, em estágios finais mais diferenciados, consolida-se como um magma rico em  $\text{CO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o qual dá origem a uma rocha carbonatítica que afeta diretamente as intrusões anteriores, causando a glimeritização dos termos mais básicos e precoces e a fenitização das encaixantes. Estes processos foram identificados e caracterizados no carbonatito em estudo, onde foram analisados quatro testemunhos pertencentes à Empresa Água Fertilizantes através das técnicas de petrografia óptica, ICP-AES, ICP-MS e Microscopia Eletrônica de Varredura. Tendo em vista esses aspectos, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar as rochas máficas precoces associadas ao Carbonatito Três Estradas com a possibilidade de interpretar essas rochas como glimeritos sendo parte de um complexo alcalino-carbonatítico (Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas). Através da interpretação mineralógica e geoquímica são avaliados os processos que geraram as rochas presentes na área de estudo.

**Palavras-Chave:** Glimerito; Rochas Glimeríticas; Metassomatismo; Complexo Alcalino-Carbonatítico Três Estradas

## ABSTRACT

The occurrences of carbonatitic bodies in Rio Grande do Sul are rare and studies related to these manifestations are still recent. One of the most visible carbonatites today is the Três Estradas carbonatite, due to its scientific and economic interest. The recent petrographic analysis identifies the occurrence of metacarbonatite, amphibolite, metasyenite and gneiss (embasement), all of which are intensely deformed. However, the processes of metassomatic alteration are characteristic of alkaline-carbonatitic intrusions, whose initial magma have a more basic composition until, in more differentiated stages, consolidates as a magma rich in CO<sub>2</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, giving origin to a carbonatitic rock that directly affects previous intrusions, causing the glimmeritization of earlier and more basic terms and the fenitization of the country rocks. These processes were identified and characterized in the studied carbonatite, where four cores belonging to the Água Fertilizantes Company were analyzed using optical petrography, ICP-AES, ICP-MS and Scanning Electron Microscopy techniques. In view of these aspects, the present work aims to characterize the early mafic rocks in association with the Três Estradas Carbonatite with the possibility of interpreting these rocks as glimmerites being part of the Alkaline-Carbonatitic Complex (Três Estradas Alkaline-Carbonatitic Complex). Through mineralogical interpretation and geochemistry, the processes that generated the rocks present in the area of study could be evaluated.

**Keywords:** Glimmerite; Glimmeritic Rocks; Metassomatism; Três Estradas Alkaline-Carbonatite Complex



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Localização da Área de Estudo.....	12
1.2 Caracterização do Problema .....	13
2. OBJETIVOS E METAS.....	13
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	14
3. JUSTIFICATIVA .....	14
4. ESTADO DA ARTE .....	15
4.1 Glimeritos .....	15
4.1.1 Glimeritização (Flogopitização).....	16
4.2 Carbonatitos .....	16
4.2.1 Carbonatitos Continentais.....	18
4.2.2 Exemplos Brasileiros .....	18
4.3 Fenitos (Fenitização) .....	19
4.4 Complexos Alcalino-Carbonatíticos.....	20
4.5 O Carbonatito Três Estradas.....	22
4.6 Geologia Regional.....	23
5. METODOLOGIA.....	24
5.1 Etapa de Campo .....	24
5.1.1 Amostragem .....	24
5.2 Etapa de Laboratório.....	25
5.2.1 Laminação .....	25
5.2.2 Moagem de Rocha.....	26
5.2.3 Microscopia Óptica .....	26
5.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	27

6. RESULTADOS .....	28
6.1 Trabalho de Campo.....	28
6.2 Glimerito .....	32
6.2.1 Petrografia .....	32
6.2.2 Química Mineral.....	38
6.2.3 Geoquímica de Rocha Total .....	41
6.3 Rochas Glimeríticas e Processos de Glimeritização .....	43
6.4 Tremolítico.....	48
6.5 Carbonatito.....	50
6.5.2 Geoquímica de Rocha Total .....	52
6.6 Processos de Fenitização .....	56
7. DISCUSSÕES.....	58
8. CONCLUSÕES .....	60
9. REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A - GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL.....	66

## 1. INTRODUÇÃO

As ocorrências de corpos carbonatíticos no Rio Grande do Sul são raras e os estudos relacionados a essas manifestações ainda são recentes. Um dos carbonatitos com maior visibilidade atual é o carbonatito Três Estradas (Figura 1), tanto pelo seu interesse científico quanto econômico. Atualmente a empresa Águia Fertilizantes vem desenvolvendo, na região do município de Lavras do Sul, o Projeto Fosfato, que compreende o estudo e caracterização do carbonatito e de suas rochas adjacentes com interesse na extração de fosfato e calcário.

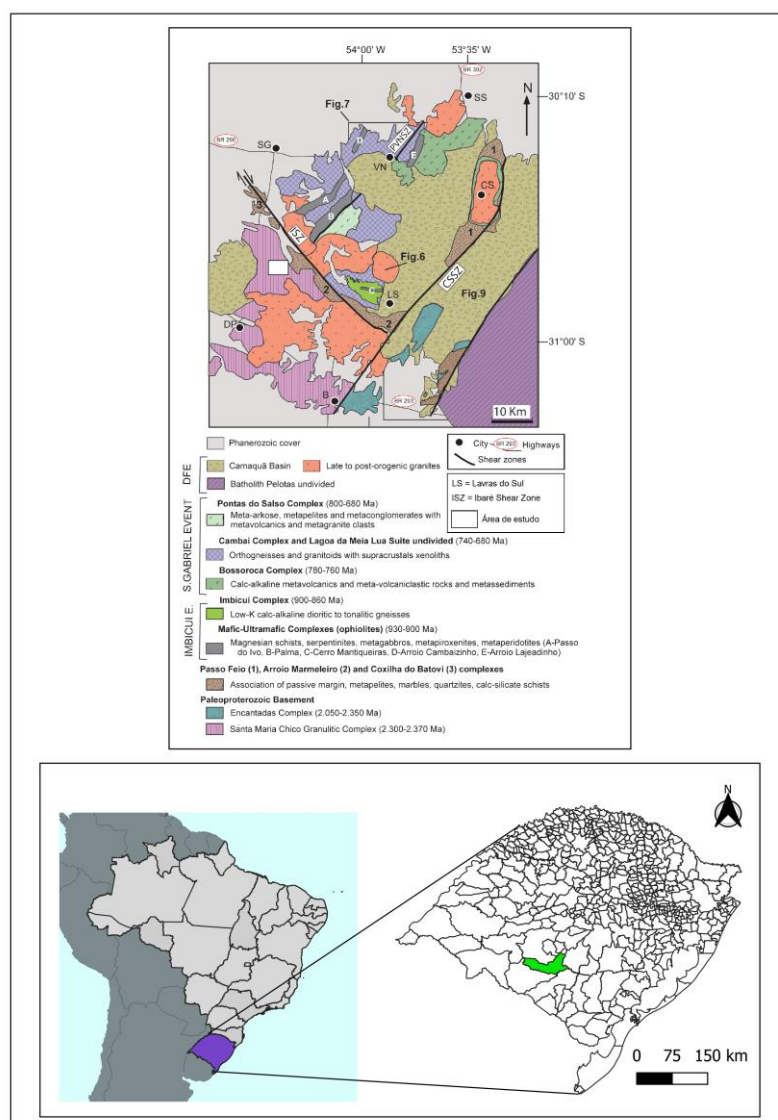


Figura 1. Localização do carbonatito Três Estradas, inserido nos domínios tectono-estruturais do Rio Grande do Sul. Fonte: Modificado de Phillip, Pimentel e Chemale Jr. (2016).

## 1.1 Localização da Área de Estudo

A área de estudo (Figura 2) situa-se na região do município de Lavras do Sul, a 360 km a oeste de Porto Alegre. Está inserida nas rochas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC) a oeste da Zona de Cisalhamento de Ibaré (ZCI), no Terreno Taquarembó. O acesso ao local pode ser feito, a partir da cidade de Lavras do Sul, percorrendo 15 km pela RS-357, no sentido oeste, e então mais 7 km pela BR473, no sentido sul, até o entroncamento com uma estrada de chão, a partir da qual se percorre cerca de 10 km, no sentido oeste, até a localização do complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas.

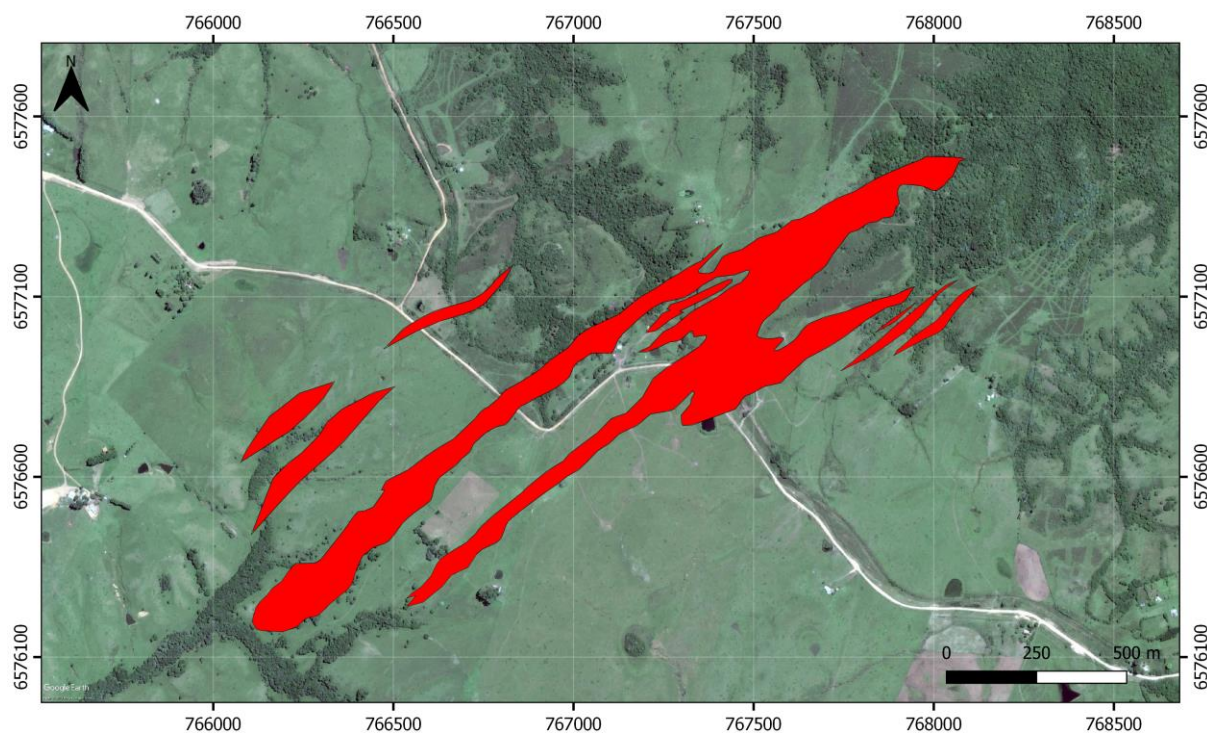


Figura 2. Localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados obtidos da empresa Água Fertilizantes (2019).

## 1.2 Caracterização do Problema

As análises petrográficas mais recentes, dos furos de sondagem do carbonatito Três Estradas e de suas rochas adjacentes, identificaram a ocorrência de metacarbonatito, anfíbolito, metasienito e gnaisse (embasamento), sendo todas elas intensamente deformadas. Todavia, processos de alteração metassomática são característicos de intrusões alcalinas, cujo magma inicial tem uma composição mais básica até que, em estágios finais mais diferenciados, consolida-se como um magma rico em  $\text{CO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o qual dá origem a uma rocha carbonatítica que afeta diretamente as intrusões anteriores, causando a glimeritização dos termos mais básicos e a fenitização das encaixantes. Tendo em vista que tais processos são característicos de complexos alcalino-carbonatíticos, deve-se questionar: Quão intenso e pervasivo foram os processos de glimeritização das rochas? É possível interpretar essas rochas e as litologias adjacentes a elas como sendo parte de um mesmo complexo alcalino-carbonatítico (Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas)? Ou seja, o que faz parte do complexo alcalino? O que é a encaixante fenitizada?

## 2. OBJETIVOS E METAS

### 2.1 Objetivo Geral

Considerando a importância da mineralização de fosfato apatítico que ocorre nas diferentes rochas do Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas, com o presente estudo serão caracterizadas especialmente as rochas máficas-ultramáficas, sendo dada ênfase às transformações mineralógicas e aos processos de glimeritização, pois todos contêm concentrações significativas de minério. Além da atenção às modificações que ocorreram nas rochas que cristalizaram nas fases iniciais máficas-ultramáficas (chamadas originalmente de anfíbolitos regionais), também é considerada a ação tardia do carbonatito na transformação do protólito. A

relação da intrusão alcalina com a encaixante (gnaisse) e a existência de processos de fenitização também é discutida.

## **2.2 Objetivos Específicos**

1. Verificar a relação espacial dos corpos ígneos que compõe o complexo, com ênfase nos glimeritos e nos corpos glimeritizados.

2. Analisar a mineralogia das rochas glimeritizadas e estabelecer uma relação com os minerais encontrados no carbonatito, anfíbolito e fenito quanto à sua forma, percentagem, distribuição espacial e química mineral.

3. Estabelecer uma relação da ordem de formação das paragêneses dos glimeritos e das rochas glimeritizadas.

4. Analisar a extensão dos corpos glimeríticos e da glimeritização e sua relação com o magma carbonatítico e as demais rochas presentes na área de estudo.

## **3. JUSTIFICATIVA**

A existência de complexos alcalinos deformados no Escudo Sul-riograndense (ESR) estabelece uma relação geológica diferente das conhecidas para complexos alcalinos circulares conhecidos no Brasil. Através de uma caracterização mais detalhada das rochas glimeríticas e sua associação com o carbonatito, anfíbolito, a encaixante e os processos de metassomatismo e fenitização, foi possível uma maior compreensão da gênese, mineralogia e alterações que envolvem as rochas do possível Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas, além de complementar os trabalhos já existentes nessa área.

Dessa forma, será possível a utilização desses resultados em trabalhos futuros com a possibilidade de identificar complexos similares em contextos geológicos favoráveis.

## 4 ESTADO DA ARTE

### 4.1 Glimeritos

Glimeritos foram primeiramente descritos por Esper e Pardee (1927), como sendo uma rocha escura composta quase que totalmente por biotita. Wells (1960, *apud* Morel, 1988), criticou a utilização do termo biotitito para esse tipo de rocha, devido ao fato de que o seu constituinte principal é a flogopita.

Posteriormente, Gupta *et al.* (1983) num estudo sobre lamprófiros portadores de leucita, na região do Vale de Damodar (Índia), concluíram através da mineralogia e geoquímica que as rochas analisadas, na verdade, deveriam encaixar-se nos glimeritos previamente descritos por Esper e Pardee (1927), devido ao seu conteúdo extremamente baixo em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e nos altos valores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .

Segundo Kjasgaard & Wooley (2008), glimeritos correlacionam-se há outras rochas ultramáficas em complexos carbonatíticos associados a rochas silicáticas, tais como dunitos, piroxenitos e anfibolitos, como equivalentes metassomáticos de rochas ultramáficas (e.g., dunitos e piroxenitos). Estágios finais na cristalização de carbonatitos podem liberar soluções potássicas que acabam por converter piroxenitos em glimeritos (Morel, 1988).

Glimeritos são constituídos principalmente por flogopita, com fenocristais de calcita e apatita (em maiores ou menores quantidades) e acessórios como anfibólio, biotita, clorita, dolomita, ilmenita, magnetita, zircão e pirocloro (Al Ani, 2013).

### 4.1.1 Glimeritização (Flogopitização)

É o processo de alteração hidrotermal-metassomático caracterizado pela intensa formação de flogopita. A intrusão do magma carbonático nas rochas silicáticas alcalinas leva a reações de fenitização potássica, que por sua vez, são responsáveis por gerar o intenso processo de flogopitização (Godoy, 2015).

## 4.2 Carbonatitos

Carbonatitos são rochas ígneas intrusivas, extrusivas ou hipoabissais, subsaturadas em sílica e de composição predominantemente carbonática com proporções variadas de apatita, magnetita, barita e fluorita que podem conter concentrações econômicas de elementos terras raras (ETR), P, Nb, U, Th, Cu, Fe, Ti, Ba, F e Zr. Podem formar *plugs* centrais no interior de complexos alcalinos intrusivos zonados, ou na forma de diques, soleiras, brechas e veios (Modreski *et al.*, 1995).

Carbonatitos são definidos pelo sistema de classificação da IUGS e subdivididos em classes de acordo com a sua mineralogia principal. As rochas da classe dos **calcita-carbonatitos** são aquelas que possuem calcita como carbonato principal. Chamados de sövitos, quando a granulação varia de média a grossa, e de alvikitos, quando a granulação varia de fina a média. Os **dolomita-carbonatitos** possuem dolomita como constituinte principal e seus representantes são os beforsitos. Quando o carbonato principal é rico em Fe, são classificados como **ferrocarbonatitos**. Por último, os **natrocarbonatitos (carbonatitos alcalinos)** são compostos essencialmente por carbonato rico em Na, Ca e K (Le Maitre, 2002).

Quando o carbonatito possui granulometria muito fina para que uma composição modal precisa possa ser definida através da microscopia ótica, ou se os carbonatos em questão são soluções sólidas de Ca-Mg-Fe, utiliza-se a classificação química baseada nos óxidos de CaO, MgO e FeO (Figura 2) para carbonatitos com menos de 20% de SiO<sub>2</sub> (Le Maitre, 2002).



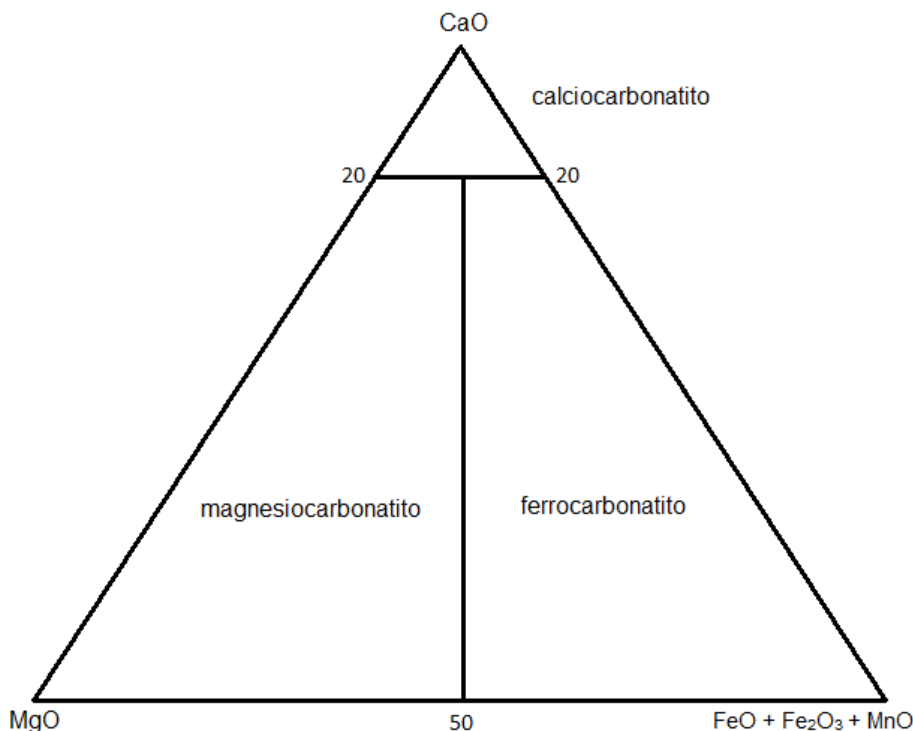


Figura 3. Classificação química dos carbonatitos com  $\text{SiO}_2 < 20\%$  utilizando a percentagem em peso dos óxidos. Fonte: Extraído de Le Maitre, (2002). Modificado de Wooley & Kempe (1989).

Segundo Mitchell (2005), carbonatitos (*sensu lato*) são qualquer rocha contendo um volume inicial maior do que 30% de carbonato no magma, independentemente do teor de sílica. Dividiu os carbonatitos em dois grupos: carbonatitos primários (magmáticos) e resíduos carbótermiais.

Analisando os dados da diversidade e abundância de rochas ígneas associadas à carbonatitos, Kjarsgaard & Wooley (2008), num estudo que compilou 477 das até então 527 ocorrências de carbonatitos conhecidas, subdividiram as rochas carbonáticas, com base na mineralogia e características de posicionamento, em dois grupos distintos: **carbóhidrotermais** (16%) e **magmáticos** (84%). Os carbonatitos carbóhidrotermais estão associados a uma variedade de rochas silicáticas, porém nefelina-sienito e sienito são as mais características. Dentre os carbonatitos magmáticos, 24% das localidades estudadas não possuem associações com rochas ígneas silicáticas, enquanto que as outras 76% estão associadas a uma variedade de rochas silicatadas (ijolitos, nefelinitos, fonolitos, melilitos, sienitos, etc.).

### 4.2.1 Carbonatitos Continentais

Dois tipos principais de carbonatitos continentais distintos podem ser definidos com base no posicionamento geológico e na geoquímica de elementos traço: (1) carbonatitos situados em riftes e em estruturas extencionais de pequenas dimensões localizadas em crátons arqueanos estáveis ou em cinturões paleo-orogênicos, e (2) carbonatitos situados em terrenos pós-colisionais após a orogênese. Em ambos os cenários, o tipo mais comum e mais estudado são os calcita carbonatitos, os quais são predominantemente intrusivos (com poucas ocorrências de corpos extrusivos) (Chakmouradian, 2009).

Carbonatitos usualmente não são interpretados como sendo provenientes de magmas alcalinos, devido ao fato de a maioria dos carbonatitos conhecidos ser pobre em álcalis. Entretanto, existe a discussão de que muitos magmas carbonatíticos eram inicialmente alcalinos e que a sua alcalinidade foi removida durante processos de fenitização (Le Bas, 2008). Províncias alcalinas desprovidas de carbonatitos são relativamente comuns, porém o inverso é extremamente raro e mais restrito (Luciano, 2017).

Lapin *et al.* (1999) subdividiram os complexos carbonatíticos em dois tipos principais: Linear e Central. Complexos carbonatíticos do **Tipo Central** (e.g., Kovdor, Sokli) ocorrem tanto no interior quanto nas margens de ortoplataformas, com os carbonatitos apresentando formas anelares ou ovaladas e estando associados a rochas básicas e ultrabásicas, com ou sem afinidade alcalina. Já os complexos do **Tipo Linear** (e.g., Angico dos Dias, Tatarskaya) prolongam-se por falhas profundas, estendem-se por até dezenas de quilômetros e podem ser tanto intrusivos quanto extrusivos.

### 4.2.2 Exemplos Brasileiros

Segundo Comin-Chiaramonti & Gomes (2005), existem vinte e duas ocorrências de carbonatitos no Brasil, sendo os carbonatitos calcíticos (sövitos e

alvikitos) os tipos mais comuns. Tais ocorrências estão, em sua maioria, associadas com diversos tipos de cumulatos, os quais variam de rochas ultramáficas a básica-intermediárias e incluem todos os membros da série dos ijolitos. Rochas fenitizadas também são particularmente comuns. No aspecto econômico, são uma fonte muito importante de nióbio, fosfato, ETR e vermiculita, sendo os depósitos desses minerais formados através de processos supergênicos que afetam as rochas assim como pela concentração residual de minerais durante a prolongada exposição da mesma ao intemperismo.

Comin-Chiaramonti & Gomes (2005) ainda apontam cinco outras ocorrências de mineralizações em carbonatitos no Brasil (Araxá, Catalão I, Catalão II, Jacupiranga e Tapira), além de Angico dos Dias, onde a exploração, principalmente por mina a céu aberto, ocorre para fosfato e nióbio. Com exceção de Jacupiranga e Catalão II, onde a rocha são é minerada, a lavra ocorre apenas no manto intemperizado.

### **4.3 Fenitos (Fenitização)**

Intrusões de rochas carbonáticas e alcalinas geralmente encontram-se relacionadas espacialmente com auréolas de alteração metassomática de alta temperatura em rochas do embasamento, denominadas de fenitos (Elliott *et al.*, 2018).

Fenitos foram inicialmente propostos por Brögger (1921, *apud* McKie, 1989) para classificar um grupo de rochas metassomatizadas pertencentes, e adjacentes, ao Complexo de *Fen*, Noruega. Os fluídos causadores do metassomatismo foram interpretados como sendo provenientes de um magma de composição ijolítica-melteigítica que resultou na formação de álcali-sienitos cujo protólito possuía composição granítica.

O termo “fenitização” adquiriu, com o tempo, um sentido mais amplo do que o proposto inicialmente por Brögger, sendo comumente usado para se referir a

processos de metassomatismo cujos efeitos podem ser observados nas bordas de complexos alcalinos (McKie, 1989).

O processo de fenitização é geralmente interpretado como sendo decorrente de diversos pulsos de fluídos ricos em álcalis, originários do resfriamento e da cristalização de magmas carbonatíticos ou alcalinos (Le Bas, 2008; Morogan, 1994; Elliott *et al.*, 2018). Os álcalis estão presentes nos magmas carbonatíticos de acordo com a quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disponíveis para formar piroxênios, anfibólios ou biotita, sendo a quantidade de álcalis restante confinada em soluções aquosas, que são subtraídas do magma como fluidos fenitizantes (Gittins *et al.*, 1975).

O alcance da fenitização varia consideravelmente desde centímetros até alguns quilômetros a partir do contato entre a encaixante e o magma intrusivo. Fenitos são comumente associados com faturamento hidráulico e brechação, apresentando variações temporais, espaciais e mineralógicas, que resultam tanto em uma zonação vertical quanto horizontal (Elliott *et al.*, 2018).

Le Bas (2008) observou que onde existe mais de uma fase de intrusão de calciocarbonatitos (sövitos), os fenitos são gerados através da intrusão inicial de magma carbonatítico, com as intrusões mais tardias apenas cortando o carbonatito mais antigo e o fenito, aparentemente sem nenhum tipo de reação. Há um consenso a respeito do fato de que ambos os magmas carbonatíticos e alcalinos (e.g., melteigitos, ijolitos) são capazes de causar a fenitização das rochas encaixantes, porém não há consenso ainda sobre a natureza e evolução dos fluidos fenitizantes (Morogan, 1994).

#### **4.4 Complexos Alcalino-Carbonatíticos**

A origem de complexos alcalino-carbonatíticos, assim como a presença de carbonatitos em complexos ultrabásico-silicáticos, pode ser interpretada através de diferentes processos de diferenciação magmática, tais como imiscibilidade de líquidos, resfriamento a partir de um magma residual após cristalização fracionada e degaseificação. Nos dois primeiros casos a fonte é tida como proveniente de um

magma silicático-carbonatado originário da fusão parcial de um flogopita ± anfibólio lherzolito com carbonato. (Bell & Rukhlov, 2004, *apud* Zaitsev *et al.*, 2014, Wall & Zaitsev, 2004 *apud* Oliveira, 2015).

No Brasil, os complexos alcalino-carbonatíticos existentes estão agrupados em cinco províncias conhecidas: Amazônica, Alto Araguaia, Alto Parnaíba, Sudeste e Sul. Sendo que a estes complexos estão associadas, frequentemente, mineralizações de P, Nb, Ti, F, U e ETR (Rodrigues & Lima, 1984 *apud* Uliana, 2010).

Em diversos casos, o posicionamento de complexos alcalino-carbonatíticos é controlado por feições tectônicas antigas, as quais foram reativadas a partir do Mesozoico e estão relacionadas, principalmente, a estruturas regionais como arcos, lineamentos e riftes (Gomes *et al.*, 2018).

Segundo Biondi (2003, 2005), a ocorrência dos complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros está restrita as zonas arqueadas e falhadas das bacias do Amazonas, Paraná e Parnaíba. Estruturalmente as intrusões de corpos alcalinos se enquadram em 3 grandes lineamentos que controlam a posição das províncias alcalinas brasileiras, são eles: Lineamento Alto Parnaíba, Lancinha-Cubatão e Transbrasiliano. Muitas das grandes províncias alcalinas do planeta estão situadas no Brasil, das quais algumas (e.g., Amazonas) ainda são muito pouco conhecidas e podem abrigar complexos alcalinos e depósitos minerais ainda desconhecidos.

Além de despertarem interesse científico, complexos alcalino-carbonatíticos são importantes do ponto de vista econômico devido à sua potencialidade em formarem depósitos minerais exclusivos. Extensivos processos de intemperismo podem atingir até 300m de profundidade, formando solos lateríticos a partir da alteração de cumulos de rochas ultramáficas e da dissolução de carbonatitos. Como resultado dessa alteração, formam-se depósitos supergênicos e residuais de apatita, pirocloro, vermiculita, anatásio e ETR. Rochas inalteradas em superfície são raras, sendo as amostras obtidas para estudos petrológicos provenientes majoritariamente de furos de sondagem (Gomes *et al.*, 2018; Biondi, 2005).

Em ordem cronológica, as primeiras rochas a se formarem são, provavelmente, as ultrabásicas (e.g., piroxenitos, peridotitos e melteigitos).

Posteriormente viriam as rochas de composição nefeliníticas, como sienitos e ijolitos, e então os urtitos, como produto da diferenciação dos ijolitos. As intrusões nefeliníticas são as responsáveis pela intensa fenitização das encaixantes e, como produto final da intrusão, viriam os carbonatitos, tendo como composição inicial os carbonatitos calcíticos e os mais ricos em ferro (Biondi, 1986).

#### 4.5 O Carbonatito Três Estradas

O carbonatito Três Estradas (CTE) foi identificado durante a execução do Projeto Agrominerais do Rio Grande do Sul, da superintendência da CPRM, simultaneamente ao Projeto Fosfato Brasil. Está inserido nas rochas Neoarqueanas do Domínio Taquarembó (Toniolo *et al.*, 2011), onde as rochas encaixantes fazem parte do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC), as quais variam de intermediárias a ácidas, alcalinas a cálcio-alcalinas, peraluminosas a metaluminosas, com composição diorítica a granodiorítica (Hartmann, 1991)

As primeiras descrições mineralógicas do carbonatito Três Estradas caracterizaram-no como sendo constituído por grãos finos a médios de carbonato foliado (75% - 90%), apatita (10% - 30%), flogopita (10%), opacos (<5%) e raramente com anfibólios. Foram verificados teores relativamente elevados de Ba, Ca, Ga, Hf, Nb, Sr, Ta, Th, Tl, U, W e ETRs, os quais são esperados para rochas carbonatíticas. O CTE está intercalado com metagranitóides e anfibolitos e tem provável idade mínima do período Criogeniano (Toniolo *et al.*, 2011).

O corpo possui foliação orientada na direção NE-SW, com dobras fechadas e abertas. Estas características permitem classificá-lo morfologicamente como um carbonatito do Tipo Linear (Senhorinho, 2012).

Senhorinho (2012) sugeriu dois modelos de interpretação para as relações tectono-estruturais entre o carbonatito e o gnaiss encaixante, são eles: **(1) modelo sin-deformacional**, onde o carbonatito teria sido exposto aos mesmos eventos de metamorfismo que as encaixantes, pois já haveria intrudido sua rocha hospedeira. Sendo assim, a sua foliação seria resultado desse metamorfismo e o carbonatito

teria sofrido intensa modificação de suas texturas e características originais. **(2) modelo pós-deformacional**, onde, segundo essa interpretação, o carbonatito teria intrudido a rocha hospedeira após o evento metamórfico que originou o bandamento gnáissico. Tal modelo genético ainda permite interpretar a foliação do carbonatito como originada por proporções relativas de ambos ou de apenas um caso: (i) foliação magmática; e/ou (ii) metamorfismo dinâmico.

Laux *et al.* (2019), a partir da análise em cristais de zircão de furos de sondagem do carbonatito Três Estradas, determinaram a idade de 233 Ma para o carbonatito. Embora importante, essa idade não é conclusiva, devido a discrepância em relação à idade aceita de ca. 600 Ma para o carbonatito, também linear, Picada dos Tocos, o qual intrude as rochas do Complexo Passo Feio. Portanto, ainda se torna necessária a datação de outros corpos de carbonatitos ou de outras fases minerais para que se possa estabelecer uma correlação genético-temporal mais bem definida para os carbonatitos encontrados no estado.

#### 4.6 Geologia Regional

O carbonatito Três Estradas está situado no Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC) na região do município de Lavras do Sul, RS, pertencente ao Domínio Taquarembó. As rochas do CGSMC são a unidade litoestratigráfica mais antiga do Estado, com idade metamórfica Sm-Nd de 2,1 Ga (Hartmann, 1987). Foram inicialmente caracterizadas por Nardi & Hartmann (1979, *apud* Hartmann, 1991) como sendo formadas por gnaisses quartzo-feldspáticos (tonalitos e trondjemitos), gnaisses básicos, anortositos, ultramafitos, metapelitos e mármore de fácies granulito.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Etapa de Campo

Essa etapa ocorreu entre os dias 8 e 13 de novembro de 2018, na cidade de Lavras do Sul, RS, na sede do Projeto Fosfato da empresa Água Fertilizantes. Para isso, se contou com o auxílio do professor orientador e dos geólogos responsáveis pelo projeto e consistiu, primeiramente, na análise do mapa de furos de sondagem da área de estudo.

#### 5.1.1 Amostragem

Após a análise do mapa contendo os furos de sondagem foram selecionados 4 testemunhos, sendo um proveniente da seção NE, dois da seção central e um da seção SW do corpo. Os testemunhos utilizados nesse trabalho foram: TED029, com 186,5 m de profundidade, TED032, com 80,4 m de profundidade, TED038, com 395 m de profundidade e TED057, cuja profundidade atinge os 276m.

Os testemunhos foram primeiramente analisados de maneira abrangente, sendo feita uma breve descrição das litologias, juntamente com o auxílio dos *logs* da empresa, e também foi realizada a obtenção de registros fotográficos dos mesmos (Figura 3). Para uma caracterização mais detalhada das litologias analisadas, foram selecionadas as partes mais representativas de cada furo, através da coleta de amostras de diferentes intervalos, visando à confecção de lâminas petrográficas e análises químicas.

Foram coletadas 44 amostras do furo TED029, 5 amostras do furo TED032, 55 amostras do furo TED038 e 22 amostras do furo TED057.





Figura 4. A) Descrição geral e análise dos testemunhos. B) Obtenção de registros fotográficos.

## 5.2 Etapa de Laboratório

Etapa realizada nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com o objetivo de preparar e analisar as amostras utilizadas nesse estudo.

### 5.2.1 Laminação

Para posterior análise petrográfica, as amostras foram encaminhadas para o laboratório de preparação de lâminas delgadas, no Anexo do Instituto de Geociências (IGEO) da UFRGS, onde foram cortadas por uma serra abrasiva e posteriormente reduzidas ao tamanho de uma lâmina petrográfica, onde o material rochoso a ser analisado foi desbastado até atingir a espessura necessária de 30 $\mu$ m. Para esse estudo foram utilizadas 15 lâminas petrográficas dos 4 furos analisados.

### 5.2.2 Moagem de Rocha

Foram selecionadas 51 amostras para análise geoquímica de rocha total, através das técnicas de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES), para elementos maiores e traço, e espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), para determinação dos ETR. A preparação das amostras foi realizada no Anexo do IGEO, onde as amostras dos testemunhos foram britadas até a fração areia muito-grossa, onde cada amostra passou de uma a duas vezes pelo equipamento, dependendo da dureza da rocha. Posteriormente, as amostras foram colocadas no moinho de bolas, um recipiente de ágata, que possui 11 esferas de mesma composição as quais, ao rotacionarem em alta frequência no interior do recipiente, em contato com os grãos da amostra, pulverizam os fragmentos da mesma até atingirem a granulometria de 74µm (200 *mesh*). Para as devidas análises químicas de rocha total através dos métodos citados acima, as amostras pulverizadas foram enviadas para o laboratório ALS GLOBAL em Goiânia, GO.

### 5.2.3 Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi utilizada com o objetivo de identificar a paragênese mineral, alterações metassomáticas, texturas e microestruturas das rochas analisadas. Das amostras obtidas a partir dos quatro testemunhos selecionados, foram utilizadas 15 lâminas para descrição petrográfica, as quais foram escolhidas por apresentarem feições de maior importância relativa ao foco desse estudo, como na identificação e ordem de cristalização dos minerais presentes nas diferentes rochas analisadas, especialmente nas porções máficas/ultramáficas sãs (anfíbolito) e metassomatizadas (glimeritos). Também foi possível verificar a alteração do anfíbólio para flogopita nas diferentes porções dos testemunhos estudados e determinar a extensão do processo de glimeritização. Os estudos por microscopia óptica possibilitaram ainda verificar processos de fenitização da encaixante, os teores

de apatita associados às diferentes litologias e avaliar o potencial das rochas máfica/ultramáficas como minério apatítico.

Os microscópios utilizados são do modelo Olympus BX51TRF, do laboratório de microscopia ótica do CPGq - UFRGS, com câmera Olympus UC30 acoplada e com objetivas de 1,5x, 2,5x, 4x, 10x, 20x e 40x de aumento e do modelo Leica DM LM/P, do LERN – UFRGS, com objetivas de 5x, 10x, 20x e 50x. As observações da mineralogia presente em cada lâmina se deram através de luz natural e polarizada, na análise de minerais transparentes, e refletida, na análise de minerais opacos, de minério

#### **5.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Metodologia utilizada com o objetivo de caracterizar as fases minerais constituintes das rochas através de análises químicas semiquantitativas pontuais por espectrometria por dispersão de energia (EDS) e mapeamento composicional através de imageamento por elétrons secundários. Das 15 lâminas utilizadas na etapa de petrografia, 8 foram analisadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, sendo possível obter análise de espectros por EDS da composição de minerais como: flogopita, apatita, tremolita, albita, calcita, dolomita, titanita, zircão, pirocloro, allanita, celestita, barita, magnetita, ilmenita, pirita e calcopirita. Foram também obtidos mapas de composição química das diferenças composicionais do carbonatito em relação aos teores de Ca, Mg e Fe, do glimerito pela composição química principal da sua paragênese e dos processos de fenitização da encaixante.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado é do modelo JEOL JSM-6610LV do Laboratório de Geologia Isotópica (LGI-UFRGS) equipado com detector EDS Burker 133eV e catodoluminescência Chroma CLS e a energia utilizada nas análises foi de 15.0kV

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Trabalho de Campo

Durante os dias 8 a 13 de novembro de 2018 foi realizado trabalho de campo no município de Lavras do Sul, RS, nas dependências da sede do Projeto Fosfato da empresa Águia Fertilizantes, com o objetivo de descrever e coletar amostras das litologias pertencentes à área de estudo. Primeiramente foi analisado o mapa geológico da área, contendo a localização do Carbonatito Três Estradas (Figura 5). Posteriormente foi analisado o mapa contendo os furos de sondagem da área, correspondentes ao carbonatito e suas rochas adjacentes, incluindo a rocha encaixante, para que então pudessem ser selecionados os furos utilizados nesse estudo. Os critérios utilizados para a seleção dos mesmos foram a sua expressividade em relação as litologias e a sua localização ao longo do corpo, abrangendo as porções SW, central e NE. Com isso foram selecionados os furos TED057, TED038, TED029 e TED032 (Figura 6).

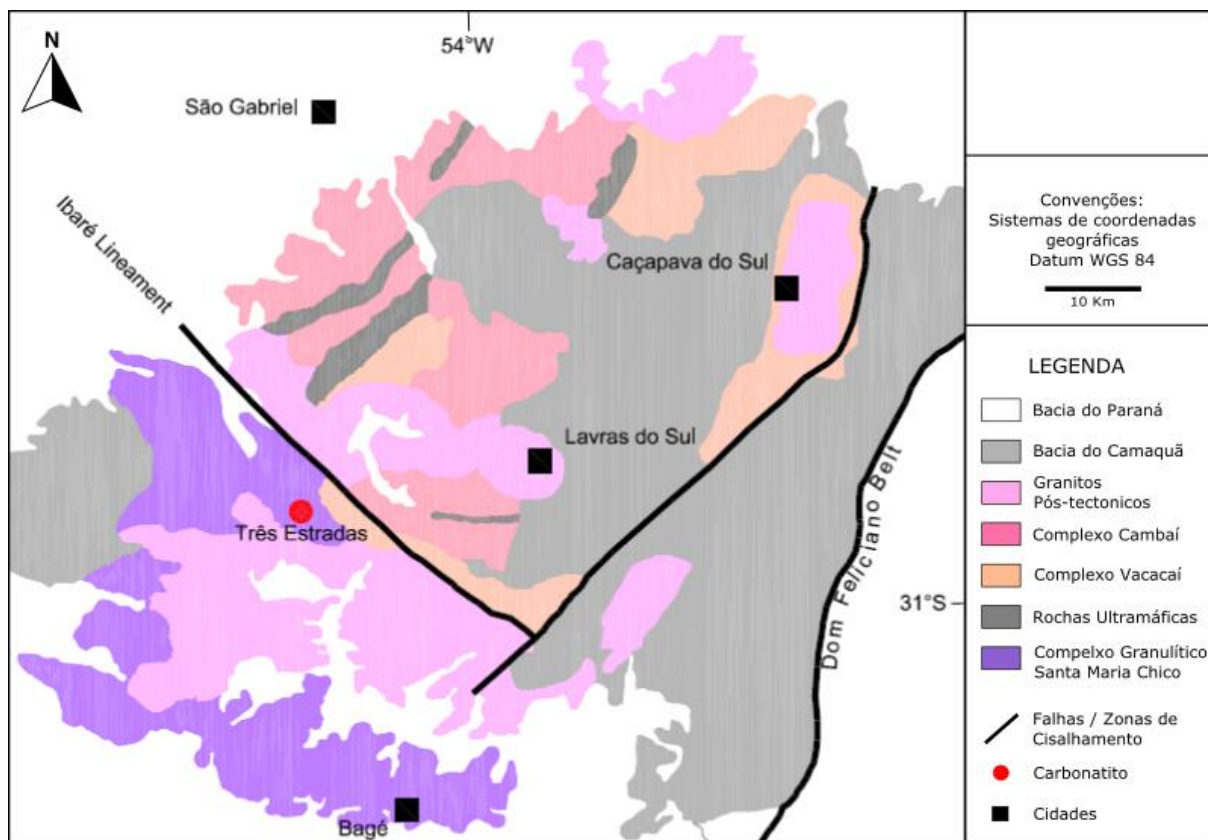


Figura 5. Mapa geológico da área de estudo, contendo a localização do Carbonatito Três Estradas. Fonte: Modificado de Milcreek Mining Group, 2018.

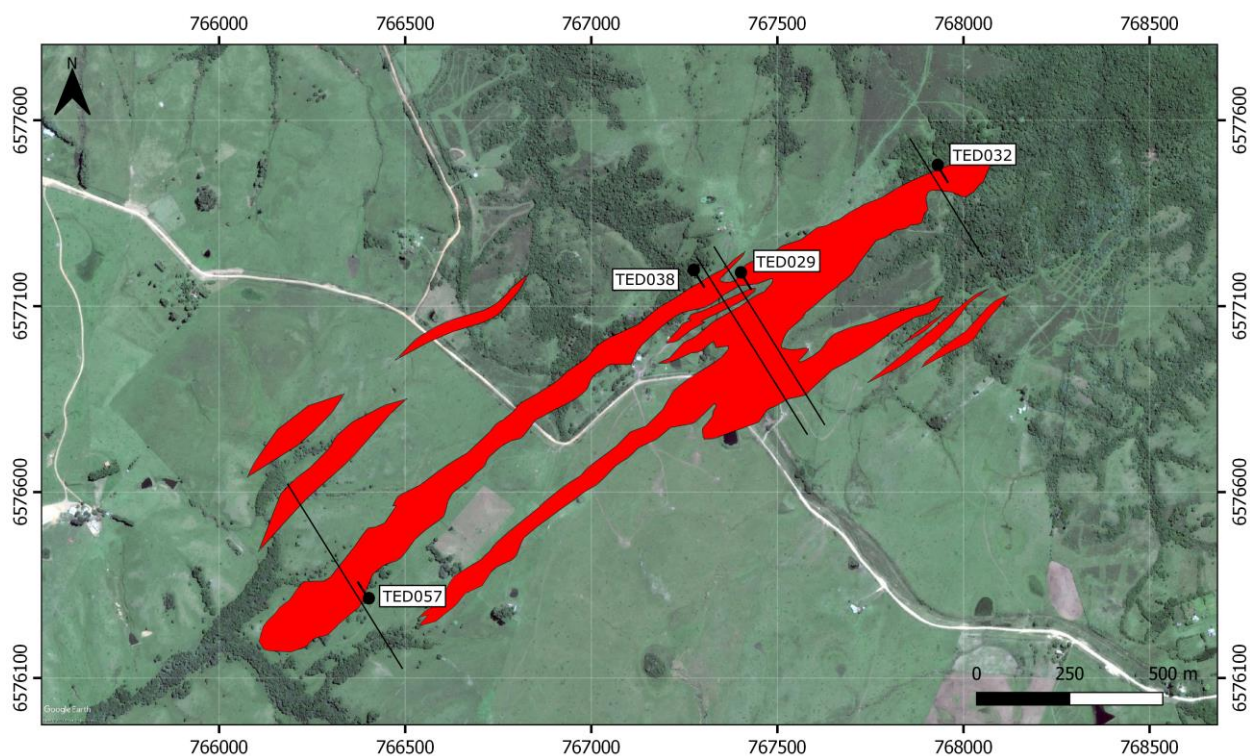


Figura 6. Localização espacial dos furos de sondagem utilizados nesse estudo. Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados obtidos da empresa Água Fertilizantes (2019).

As descrições dos furos de sondagem puderam separar as rochas, inicialmente, em 5 litologias específicas: glimerito, anfibolito, carbonatito, gnaise (encaixante) e fenito. Dentre as rochas não-carbonáticas, diversas amostras apresentam fortes indícios de carbonatação pervasiva, com dobramento da mineralogia principal concomitantemente aos minerais carbonáticos, além da presença de magnetita em todas as litologias, com exceção do gnaise.

Foram coletadas 44 amostras do furo TED029 (Figura 7), 5 amostras do furo TED032 (Figura 8), 55 amostras do furo TED038 (Figura 7) e 22 amostras do furo TED057 (Figura 9).

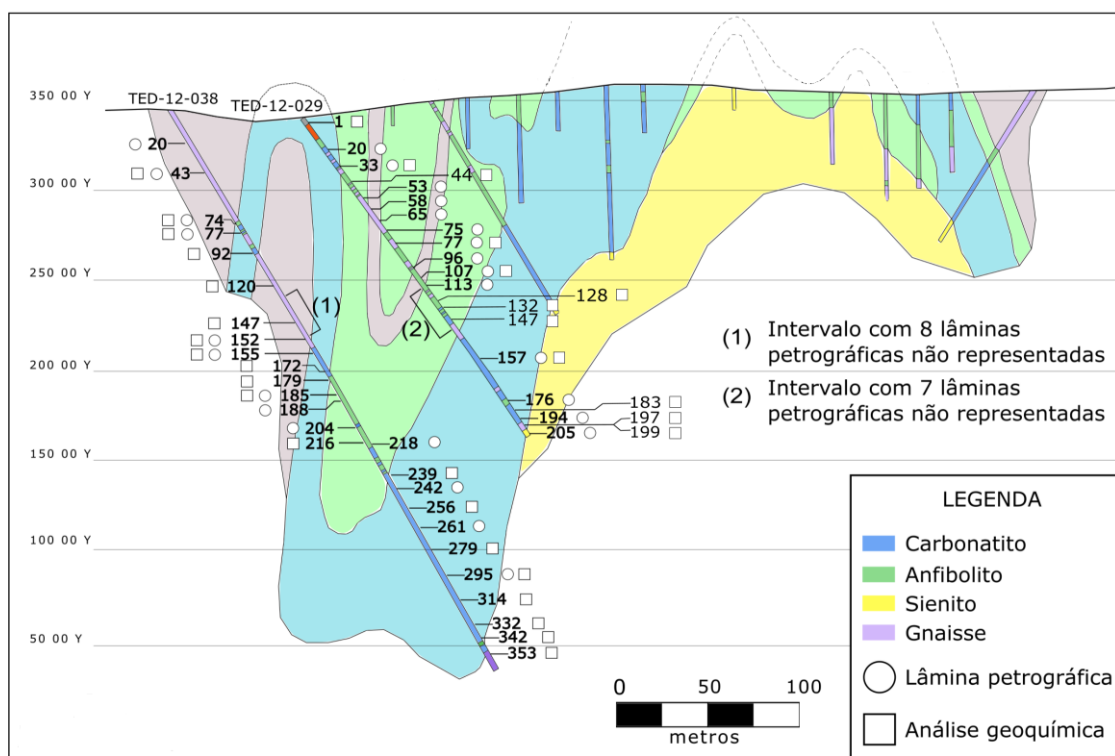


Figura 7. Perfil esquemático das litologias analisadas através das descrições dos furos de sondagem e respectiva profundidade das amostras coletadas para a obtenção de lâminas petrográficas e análises geoquímicas de rocha total dos furos TED-029 e TED-038. Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados obtidos da empresa Água Fertilizantes (2019).

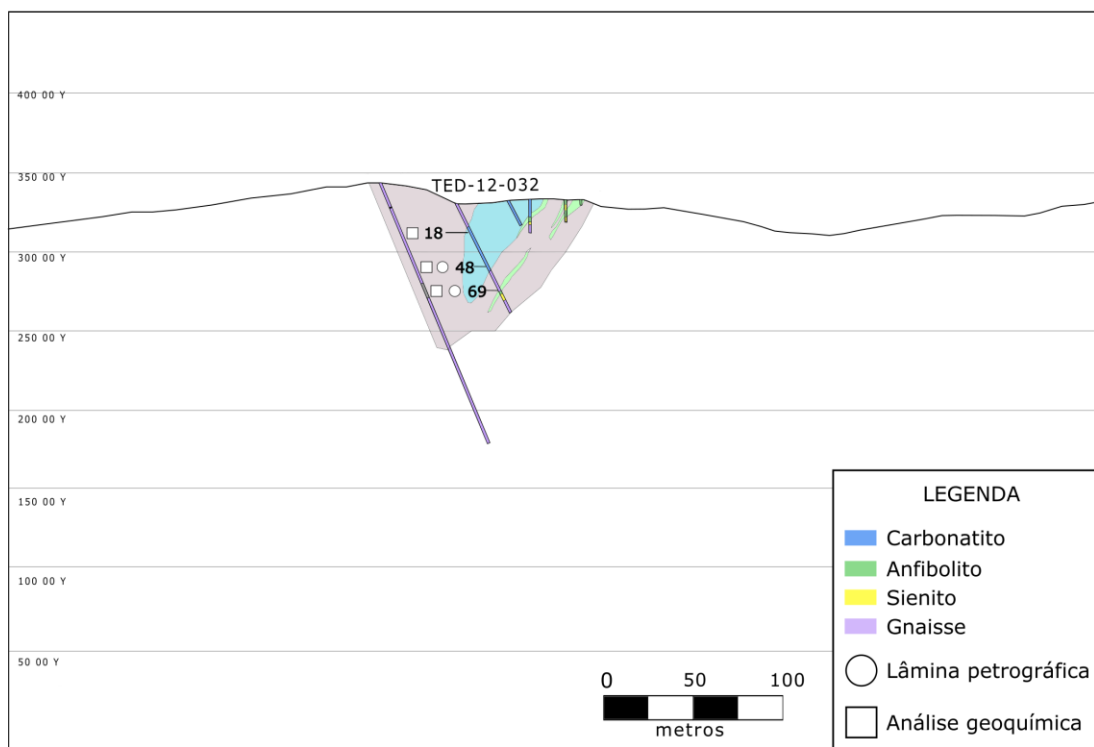


Figura 8. Perfil esquemático das litologias analisadas através das descrições dos furos de sondagem e respectiva profundidade das amostras coletadas para a obtenção de lâminas petrográficas e análises geoquímicas de rocha total do furo TED-032. Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados obtidos da empresa Águia Fertilizantes (2019).

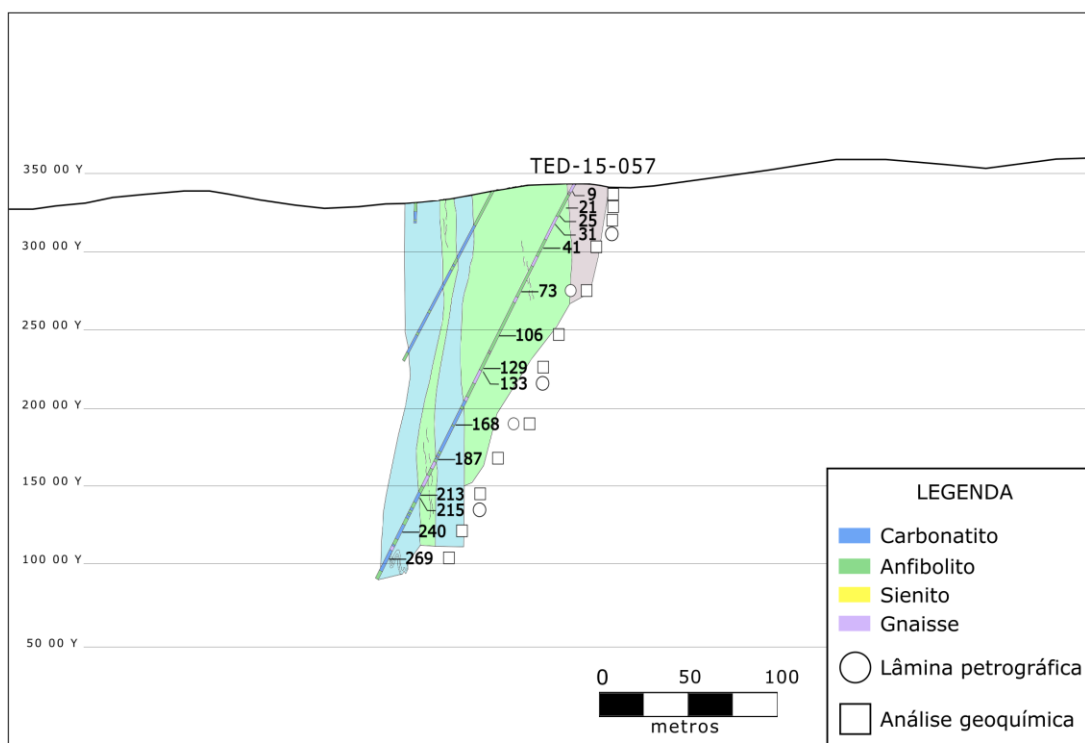


Figura 9. Perfil esquemático das litologias analisadas através das descrições dos furos de sondagem e respectiva profundidade das amostras coletadas para a obtenção de lâminas petrográficas e análises geoquímicas de rocha total do furo TED-057. Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de dados obtidos da empresa Águia Fertilizantes (2019).

## 6.2 Glimerito

Nesse trabalho, glimeritos são classificados pelo seu *sensu stricto*, ou seja, como rochas que integram complexos alcalinos e que contém mais de 50% de flogopita. As rochas que possuem quantidades significativas de flogopita, porém com teores inferiores a 50%, são classificadas, além da sua mineralogia predominante, como rochas que foram alteradas por processos de glimeritização (discutido adiante), dando origem às rochas glimeritizadas. Das amostras coletadas do glimerito, foram confeccionadas duas lâminas para análise, por microscopia óptica, para identificação dos minerais e descrição das texturas características.

### 6.2.1 Petrografia

As amostras de glimerito são provenientes dos furos TED029 (129m de profundidade) e TED038 (218m de profundidade). Todas contém quantidades significativas de flogopita sempre associada à calcita, apatita e magnetita, com estruturas e texturas de deformação, localizadas ou não. Do testemunho TED029 foram coletadas duas amostras de glimerito, cujas estruturas características são a intercalação entre bandas milimétricas de flogopita e calcita. A textura principal dos glimeritos é lepidoblástica, que é caracterizada pela orientação dos cristais de flogopita, enquanto as bandas e veios contendo carbonato apresentam textura granoblástica. Embora tidas como texturas típicas de rochas metamórficas, nesse estudo elas são utilizadas apenas para representar a orientação e morfologia dos minerais, sem a interpretação de que são texturas oriundas de eventos metamórficos.

Observa-se um bandamento homogêneo com significativa presença de calcita (40%), que é o carbonato dominante neste intervalo, e de dobras milimétricas (Figura 10.a). A outra amostra coletada apresenta um bandamento mais heterogêneo, onde bandas mais espessas de calcita intercalam, da esquerda para a direita (que representa variação do topo em direção à base do testemunho), para



uma massa de flogopita intercalada irregularmente com calcita, com a presença de dobras (Figura 10.b). Do testemunho TED038 também foram coletadas duas amostras, onde o glimerito apresenta uma textura sem orientação aparente, com a flogopita representando pouco mais de 50% da amostra, e com calcita e dolomita (subordinada) dispersas sem orientação preferencial (Figura 10.c). A presença de glimeritos compostos predominantemente por flogopita orientada, apresenta calcita formando bandas irregulares e descontínuas, paralelas à orientação definida pelas bandas de flogopita. Os glimeritos possuem, ainda, veios milimétricos de calcita perpendiculares à orientação preferencial da rocha glimerítica, sugerindo remobilização ou recristalização de carbonato (Figura 10.d).

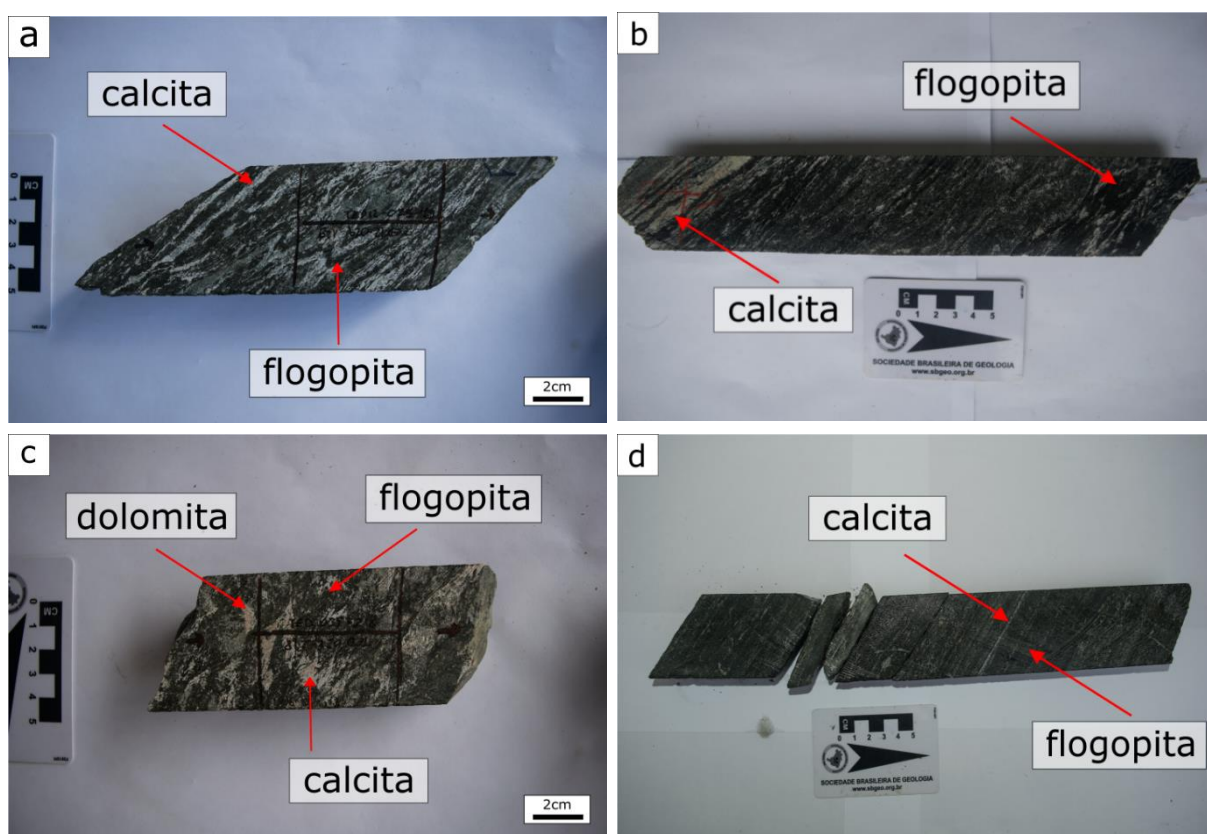


Figura 10. Amostras do testemunho TED029. a) Amostra 29-129: Glimerito com carbonato. Rocha bandada com intercalação entre bandas milimétricas de flogopita e calcita. Observa-se a existência de zonas de deformação, onde os minerais micáceos e carbonáticos estão fortemente dobrados. b) Amostra 49: Glimerito com carbonato. Rocha de coloração escura composta majoritariamente por flogopita com bandas, milimétricas a centimétricas, de calcita paralelas à foliação. Apresenta orientação das micas e do carbonato e zonas onde é possível observar pequenas dobras. Amostras do testemunho TED038. c) Amostra 38-218: Glimerito com carbonato. Rocha de coloração escura composta predominantemente por flogopita, com calcita e dolomita. Os minerais estão dispersos ao longo da rocha, sem nenhuma textura característica de bandamento ou orientação preferencial. d) Amostra 12: Glimerito. Rocha escura composta quase que na sua totalidade por flogopita com bandas milimétricas e veios de calcita perpendiculares à orientação das micas. Fonte: Elaborado pelo autor.

A mineralogia da amostra TED29-129 é composta, principalmente, por flogopita (55%) e calcita (30%), além de magnetita (6%), apatita (4%), tremolita (2%), albita (1%), titanita (1%) e zircão (<1%) em menores quantidades. A flogopita ocorre em agregados com orientação preferencial (Figuras 11.a & 11.b). A calcita apresenta hábito euédrico a subédrico e textura local granoblástica, fazendo contatos retilíneos com os cristais de flogopita (Figuras 11.a, 11.d & 11.e). Verifica-se, também, albita intersticial, com hábito anédrico e cortada por pequenos veios de calcita, o que é indicativo de uma cristalização mais tardia destes minerais em relação à flogopita e a apatita, pois a rocha reagiu ao fluido carbonático (Figura 11.a). Destaca-se a ocorrência de magnetita dispersa ao longo da amostra, em quantidades significativas (6%) e ocorrendo preferencialmente no interior dos cristais de flogopita (Figura 11.a). Além destes minerais, foi constatada a presença de tremolita em avançado processo de flogopitização, como resquícios da mineralogia original (possivelmente piroxênios ou anfibólios) ainda observáveis (Figura 11.b). A titanita apresenta forma losangular característica e também envolve cristais euédricos de apatita, indicando uma cristalização em equilíbrio dos dois minerais (Figuras 11.a & 11.c). A apatita com hábito alongado ocorre nos interstícios dos cristais de flogopita, indicando uma provável cristalização de ambos minerais simultaneamente (Figuras 11.a & 11.e). Em outros casos a apatita apresenta forma euédrica e está englobada por flogopita e calcita, apresentando feições de corrosão quando circundada apenas pelo carbonato (Figura 11.d). Também foi verificada a presença de magnetita euédrica, mas corroída e acompanhando bandas com cristais de apatita prismáticos (Figura 11.f).

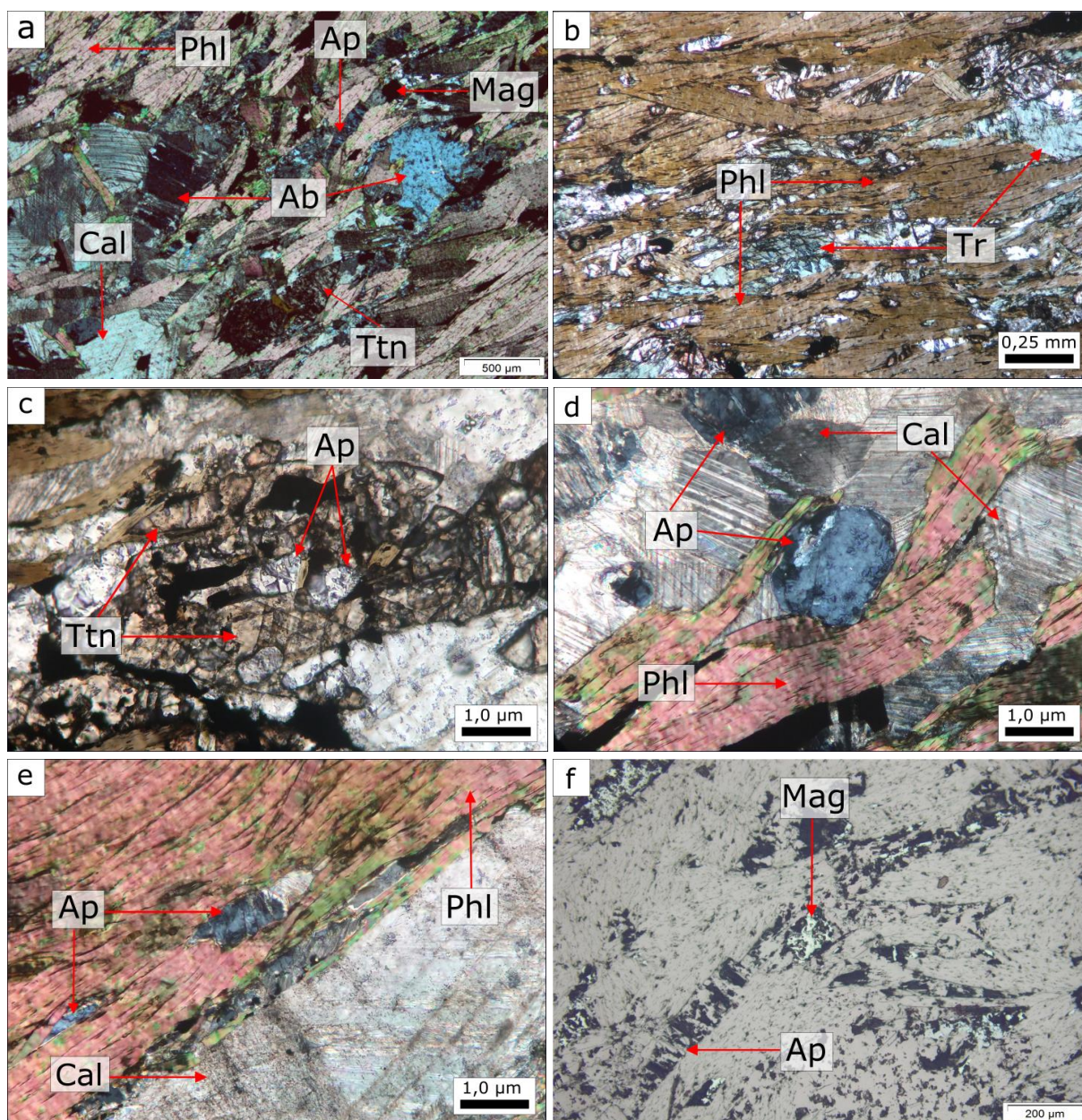


Figura 11. Fotomicrografias da amostra TED29-129. Fotos “b” e “c” obtidas em luz natural; fotos “a”, “d”, e “e” obtidas em luz polarizada; foto “f” obtida em luz refletida. a) Flogopita com textura lepidoblástica. Calcita subédrica fazendo contatos retilíneos com a flogopita. Apatita em cristais prismáticos, nos interstícios dos grãos de flogopita e acompanhando sua orientação preferencial. Albita intersticial cortada por veios de calcita. Magnetita dispersa ao longo da mineralogia principal do glimerito, com boa parte dos grãos ocorrendo nas lamelas de flogopita. Titanita com formato semi-losangular. b) Flogopita em agregados com orientação preferencial. Tremolita em avançado processo de flogopitização. c) Cristais de apatita euédrica envoltos por titanita. d) Cristais euédricos de apatita. O cristal disperso no carbonato foi levemente corroído pela calcita, enquanto o cristal contornado pela flogopita aparenta ter sido menos afetado. Calcita euédrica com textura granoblástica. e) Cristais prismáticos de apatita totalmente englobados pela flogopita em contato retilíneo com calcita. f) Cristal euédrico de magnetita concordante com a orientação da apatita. Fonte: Elaborado pelo autor.

A mineralogia na amostra TED38-218 é dada por flogopita (52%), calcita (14%), albita (12%), apatita (6%), clorita (4%), titanita (4%), pirita (3%), magnetita (3%) e zircão (2%). A flogopita ocorre em agregados ou em cristais dispersos com orientação preferencial caracterizada pela textura lepidoblástica (Figuras 12.a & 12.e). Presença de titanita anédrica englobada por flogopita com alteração parcial, onde a cor de interferência é anômala e não existem mais indícios de clivagem, e apresentando estágios mais avançados de alteração dados pela formação de clorita (Figura 12.b). A apatita possui hábito anédrico, apresenta-se envolta por cristais de flogopita e com presença de carbonato nas fraturas (Figura 12.c). Destaca-se a ocorrência de albita intersticial envolta por flogopita e clorita, onde a clorita aparenta estar “dissolvida” na massa de albita. A flogopita possui hábito euédrico a subédrico, cujos cristais apresentam orientação preferencial. Nesta amostra ocorrem duas fases de cristalização de titanita e que podem ser observadas da seguinte forma: a primeira fase caracterizada por titanita I é anédrica formando contatos retilíneos com os cristais de apatita; a segunda fase, denominada de titanita II, é caracterizada por pequenos cristais em formato losangular e com orientação preferencial discordante da orientação das lamelas de flogopita (Figura 12.d). Foram observadas zonas onde a calcita é predominante e ocorre em cristais euédricos, mas com presença de textura granoblástica e, com flogopita em grãos de pequenas dimensões formando uma trilha descontínua. Presença de veio com microcristais de feldspato alcalino com textura poligonal característica de recristalização. Pirita euédrica englobada por calcita e seguindo a orientação preferencial das micas e do carbonato (Figura 12.e). Cristais de zircão euédrico em forma de bastonetes com orientação preferencial que difere da orientação das micas (Figura 12.f).

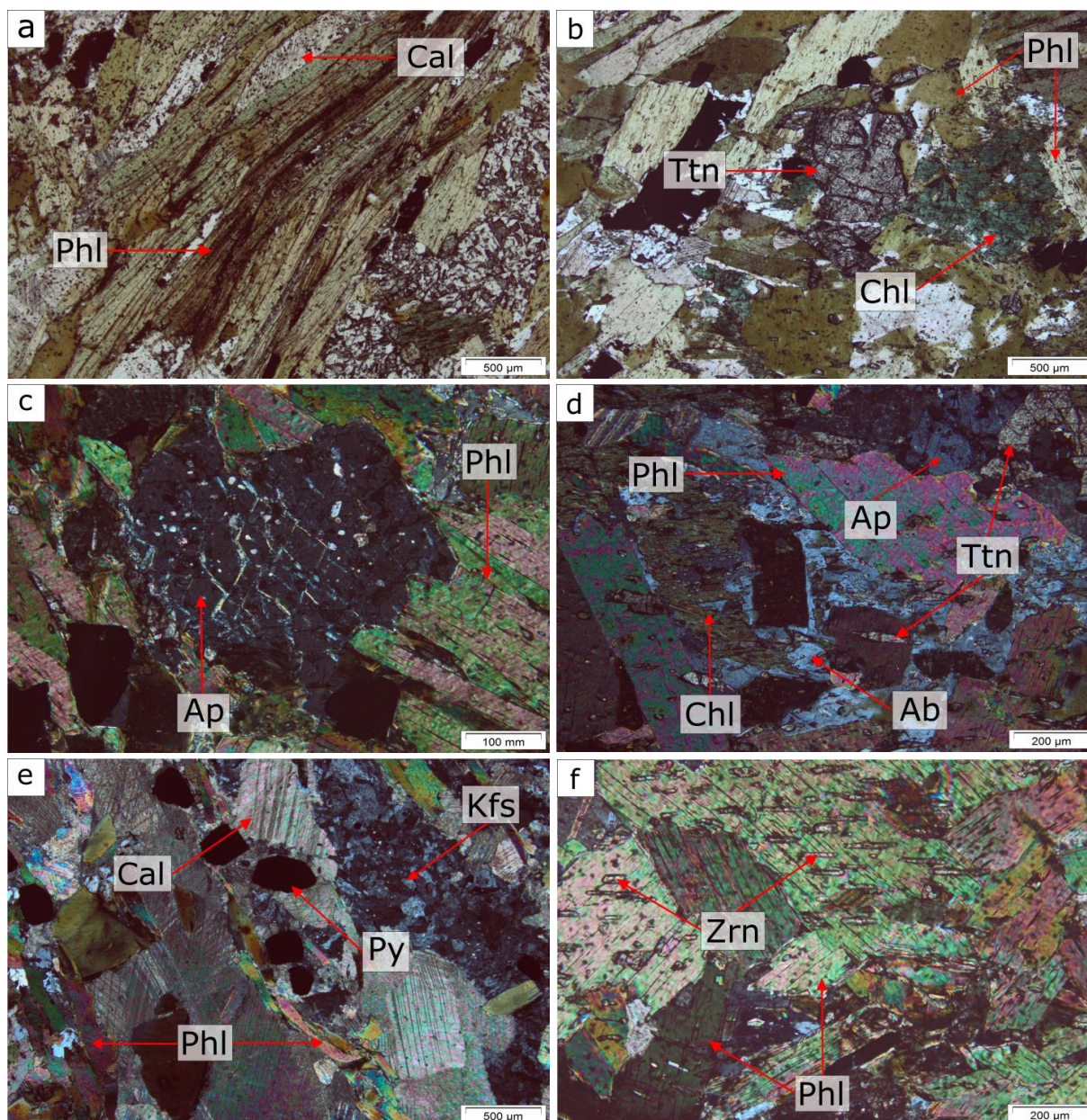


Figura 12. Fotomicrografias da amostra TED38-218. Fotos “a” e “b” obtidas em luz natural; fotos “c”, “d”, “e” e “f” obtidas em luz polarizada. a) Flogopita com textura lepidoblástica e calcita intersticial em formato de cunha, acompanhando a orientação preferencial. b) Titanita I anédrica com pequenas inclusões de carbonato e envolta por flogopita. Flogopita com alteração parcial, onde a clivagem não é mais visível, e em estado mais avançado de alteração, onde observa-se a formação de clorita. c) Apatita englobada por flogopita e com carbonato penetrando nas fraturas. d) Albita intersticial, envolta por cristais de flogopita e clorita. Titanita anédrica formando contatos retilíneos com apatita. Titanita II com hábito losangular e orientação preferencial. Flogopita formando contatos retilíneos com a apatita. e) Flogopita com textura lepidoblástica. Calcita com textura granoblástica seguindo a orientação das lamelas de flogopita. Veio de cristais microcristalinos de feldspato alcalino seguindo a orientação preferencial da amostra. Cristais de pirita euédrica envoltos por calcita, acompanhando a orientação das micas e do carbonato. f) Cristais de zircão euédrico em formato de bastonetes seguindo orientação preferencial discordante da orientação das lamelas de flogopita. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.2.2 Química Mineral

As amostras TED29-129 e TED38-218 foram analisadas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) onde foram realizados imageamentos *backscattering*, análises semi-quantitativas e mapeamento composicional por EDS. As análises em MEV foram feitas com o objetivo de melhor compreender as composições químicas dos minerais da paragênese dos glimeritos. As lâminas delgadas foram metalizadas com Au, pois como esse mineral inexistente nas amostras não contaminaria os resultados.

Através do imageamento *backscattering* das amostras foi possível observar que a composição das micas possui teores maiores de MgO em relação a FeO, porém alguns cristais apresentam teores quase que semelhantes entre ambos os óxidos. O carbonato apresenta composição predominante de CaO, com quantidades mínimas de MgO, SrO, FeO e MnO. Foi possível observar também a presença de zircão em quantidades traço (Figura 13.a). Verifica-se a ocorrência de albita nos interstícios dos grãos de flogopita em cristais anédricos formando trilha descontínua, o que é indicativo de cristalização tardia (Figura 13.b). Observou-se a presença de celestita, um mineral de sulfato de Sr, na forma de uma massa anédrica nos interstícios dos cristais de calcita (Figura 13.c). Através de um imageamento mais detalhado em maiores resoluções foi possível encontrar a presença de alanita, um mineral do grupo dos epidotos com terras raras em sua composição, nesse caso, representada pela sua variação mais abundante, Ce-alanita (Figura 13.d).

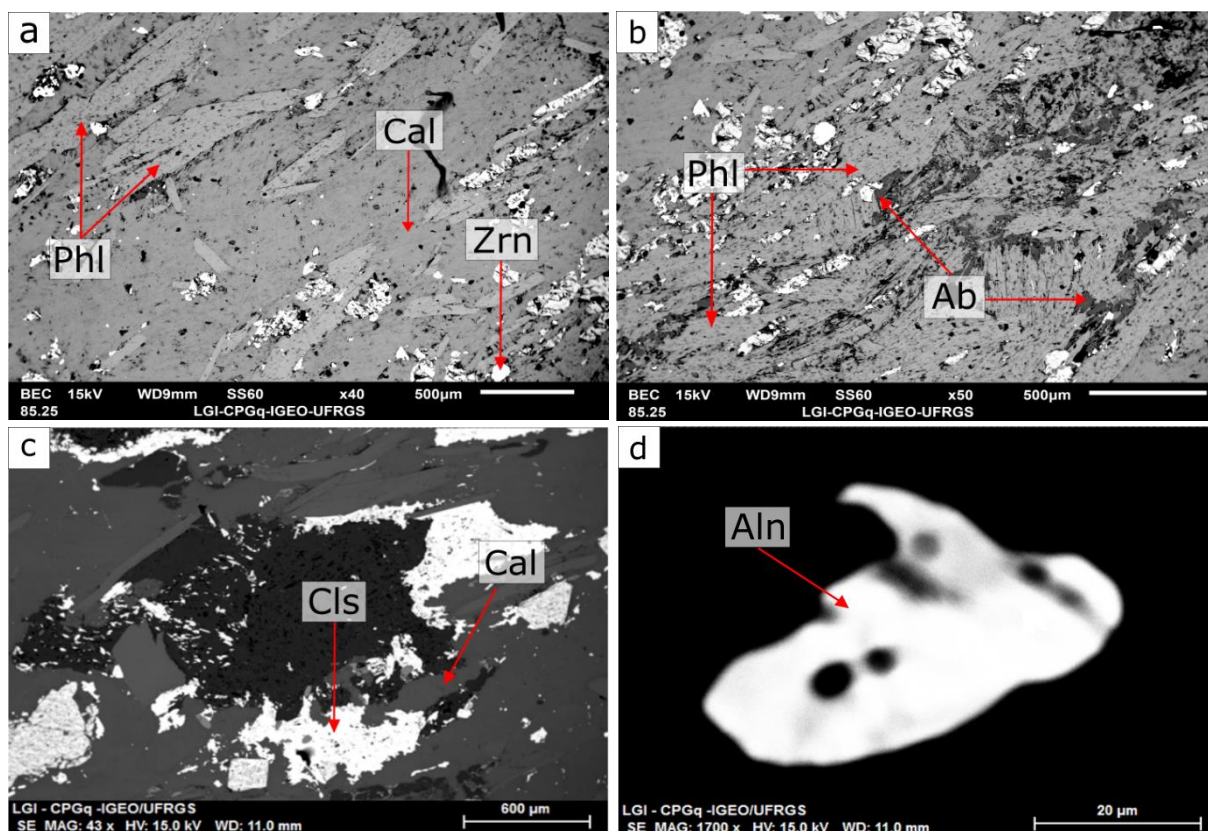


Figura 13. Imageamento *backscattering* em MEV de lâmina delgada da amostra TED29-129. a) Flogopita orientada em massa de calcita com presença de cristal euédrico de zircão. b) Albita intersticial aos grãos orientados de flogopita. Imageamento *backscattering* em MEV de lâmina delgada da amostra TED38-218. c) Celestita anédrica intersticial aos grãos de calcita. d) Cristal de alanita. Fonte: Elaborado pelo autor.

As imagens geradas por mapeamento composicional por EDS de seção específica da lâmina delgada TED29-129 (Figura 14.a), mostram a predominância de Mg na composição química da flogopita, as quais apresentam formato tabular e em agregados orientados (Figura 14.b). O Fe está presente em quantidades menos significativas nas micas, sendo fortemente representado pela sua presença na composição das magnetitas, as quais situam-se no interior e nas bordas das lamelas e dos agregados de flogopita ou estão dispersas no carbonato (Figura 14.c). Massas de carbonatos apresentam composição majoritariamente calcítica (Figura 14.d). Observa-se, ainda, a forte presença de apatita subédrica seguindo a mesma orientação preferencial da flogopita (Figura 14.e), além de albita subordinada nos interstícios dos cristais de flogopita (Figura 14.f).

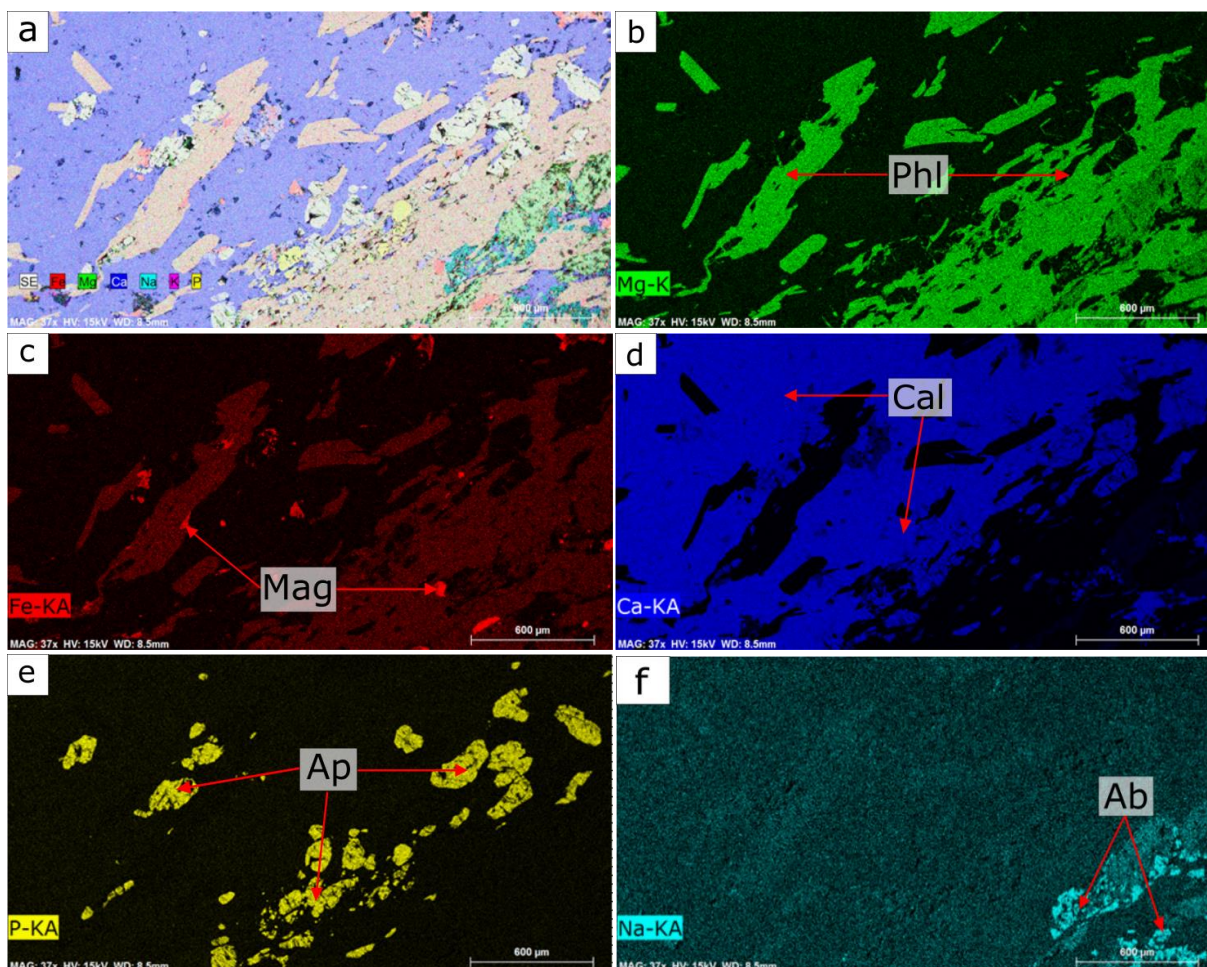


Figura 14. Imagens por MEV de mapa composicional por EDS de seção de lâmina delgada da amostra TED29-129. a) Seção da lâmina onde foi feito o mapeamento composicional, com legenda representativa das respectivas cores de cada elemento químico analisado no canto inferior esquerdo. b) Flogopita tabular e em agregados com orientação preferencial, de composição é fortemente magnesiânica. c) A presença de Fe é menos importante na flogopita e mais significativa na magnetita, cujos cristais estão situados no interior e nas bordas das lamelas de flogopita e também dispersos no carbonato. d) Massa de carbonatos com composição majoritariamente calcítica. e) Cristais de apatita subédricos com orientação preferencial. f) Albita presente nos interstícios dos grãos de flogopita.



### 6.2.3 Geoquímica de Rocha Total

Foram realizadas análises de geoquímica de rocha total nas amostras de glimeritos dos furos TED029 e TED038 (Figuras 10.b & 10.d) pelo método analítico ICP-AES para a obtenção da percentagem em peso de óxidos dos elementos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SrO}$  e  $\text{Ba}$ ), pelo método ICP-MS para a obtenção dos teores dos elementos traço ( $\text{Ba}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Dy}$ ,  $\text{Er}$ ,  $\text{Eu}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Ho}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Lu}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Nd}$ ,  $\text{Pr}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Tb}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Yb}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{Tl}$ ), em ppm, e pelo método LECO para S e C totais. A presença de voláteis está representada pela sigla LOI. As análises foram realizadas nos laboratórios da ALS GLOBAL em Goiás, GO. Os resultados das análises das amostras de glimerito estão dispostos na Tabela 1 (elementos maiores) e Tabela 2 (elementos traço), e os resultados de todas as amostras enviadas para análise estão dispostos no Apêndice A.

Tabela 1. Resultados de elementos maiores em % em peso de óxidos. Fonte: Elaborado pelo autor.

	TED029	TED038
	Amostra 12	Amostra 49
$\text{SiO}_2$	33,8	25,8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,09	6,87
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	18,4	12,8
$\text{CaO}$	16,45	21,9
$\text{MgO}$	9,8	8,57
$\text{Na}_2\text{O}$	1,36	1,42
$\text{K}_2\text{O}$	1,68	3,33
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,042	0,012
$\text{TiO}_2$	5,69	2,6
$\text{MnO}$	0,27	0,24
$\text{P}_2\text{O}_5$	2,27	4,27
$\text{SrO}$	0,1	0,34
$\text{BaO}$	0,05	0,11
LOI	6,15	12,55
<b>Total</b>	<b>101,15</b>	<b>100,81</b>
C	1,32	3,27
S	0,47	0,48

Tabela 2. Resultados de elementos traço em ppm.  
 Fonte: Elaborado pelo autor

	TED029	TED038
	Amostra 12	Amostra 49
Ba	461	911
Ce	337	484
Cr	350	120
Cs	1,12	192
Dy	14,85	22,5
Er	5	8,09
Eu	10,75	13,35
Ga	19,1	21,1
Gd	26,7	32,2
Ge	<5	<5
Hf	11,5	11,7
Ho	2,27	3,48
La	134,5	213
Lu	0,32	0,53
Nb	134	198,5
Nd	198,5	252
Pr	46,9	57,6
Rb	46	77,8
Sm	36,5	45,4
Sn	5	5
Sr	905	2740
Ta	12,7	19
Tb	3,16	4,69
Th	7,85	15
Tm	0,53	0,86
U	1,52	11,8
V	480	329
W	1	1
Y	54,4	90,2
Yb	2,8	4,4
Zr	351	686
As	0,9	0,4
Bi	0,01	0,01
Hg	<0.005	<0.005
In	0,038	0,074
Re	<0.001	0,001
Sb	<0.05	<0.05
Se	0,5	0,3
Te	0,05	0,06
Tl	0,11	0,17

### 6.3 Rochas Glimeríticas e Processos de Glimeritização

As rochas glimeríticas receberam essa denominação por possuírem presença significativa de flogopita (20 - 49%), porém, em porcentagens insuficientes para classifica-las como glimeritos e sim como rochas que foram alteradas por processos de glimeritização/flogopitização. Nessas rochas a flogopita apresenta textura lepidoblástica (novamente utilizada apenas pelo aspecto morfológico do mineral) e está associada à calcita, tremolita, apatita, titanita, clorita, magnetita, ilmenita e pirita. Os processos de glimeritização puderam ser observados em todos os 4 testemunhos analisados, atuando com intensidades diferentes de acordo com a profundidade de cada furo. Foram confeccionadas lâminas delgadas para análise, por microscopia óptica, dos processos de glimeritização encontrados nos furos. As respectivas nomenclaturas, profundidade específica das amostras e proveniência do respectivo testemunho estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3. Nomenclatura, profundidade respectiva e proveniência das lâminas utilizada nas análises petrográficas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Furos	Amostra	Profundidade (m)
<b>TED029</b>	TED29-77	77,1
	TED29-157	157,5
	TED29-176	176,41
<b>TED032</b>	TED32-48	48,1
<b>TED038</b>	TED38-339	339,33
<b>TED057</b>	TED57-191	191,29

Do testemunho TED029 foram analisadas três amostras em uma variação vertical de 100m (77,1 - 176,41m). Na amostra de menor profundidade (TED29-77) é possível observar nitidamente a orientação preferencial dos agregados de micas (de coloração amarelada), caracterizando textura lepidoblástica, juntamente com os minerais de minério (em preto), dispostos como um veio que corta uma massa de anfibólio (de coloração esverdeada). Observa-se, ainda, um “bolsão” de carbonato do qual prolongam-se pequenos veios que afetam diretamente os minerais circundantes, além de dois pequenos veios dispersos em formato lenticular (Figura

15.a). A mineralogia principal da amostra é representada por flogopita em agregados orientados, a qual é proveniente da alteração da tremolita por processos de flogopitização. A tremolita não apresenta resquícios da clivagem característica dos anfibólios, devido ao grau de alteração, porém seu pleocroísmo ainda é visível. Presença de veio descontínuo de calcita cortando o anfibólio e os minerais opacos perpendicularmente a orientação preferencial de ambos. Observa-se, ainda, pequenos cristais de titanita formando uma auréola no interior de agregado de minerais opacos cortados pelo veio de calcita (Figura 15.b). A mineralogia de minério observada na amostra TED29-77 é representada por magnetita e ilmenita granulares, com magnetita formando uma auréola externa descontínua que engloba os cristais de ilmenita, lembrando uma textura de desmistura entre os dois minerais. Observa-se, ainda, cristais de pirita dispostos segundo à orientação preferencial dos demais minerais, com exceção da calcita, e calcopirita em pequenos grãos subédricos (Figura 15.c).

Na amostra TED29-157 os processos de glimeritização são menos intensos, com flogopita em concentrações menores do que 20%, sendo a mineralogia dominante na amostra representada por calcita com textura granoblástica. Os cristais de flogopita apresentam textura lepidoblástica característica, porém estão distribuídas preferencialmente em cristais lamelares individuais ao invés de agregados. Presença de apatita euédrica acompanhando a orientação dos cristais micáceos e com feições de corrosão pelo carbonato. A pirita ocorre em grãos euédricos, na sua forma cúbica característica, e também em cristais alongados, os quais seguem a orientação preferencial da flogopita (Figuras 15.d & 15.e).

A amostra de maior profundidade, TED29-176, possui a maior presença de flogopita (35%) dentre as três amostras analisadas. Diferentemente do que foi observado nas amostras em menores profundidades, ocorre a presença de feldspato alcalino com textura poligonal, indicando recristalização, e, em alguns casos, fortemente corroído por carbonato. O feldspato alcalino também está presente no interior das lamelas dos agregados de flogopita, as quais possuem textura lepidoblástica. Observa-se, também, a presença de cristais prismáticos de apatita também presentes no interior dos agregados micáceos. Verifica-se, ainda, pequenos grãos de flogopita orientados nos interstícios dos cristais poligonais de feldspato alcalino (Figura 15.f).

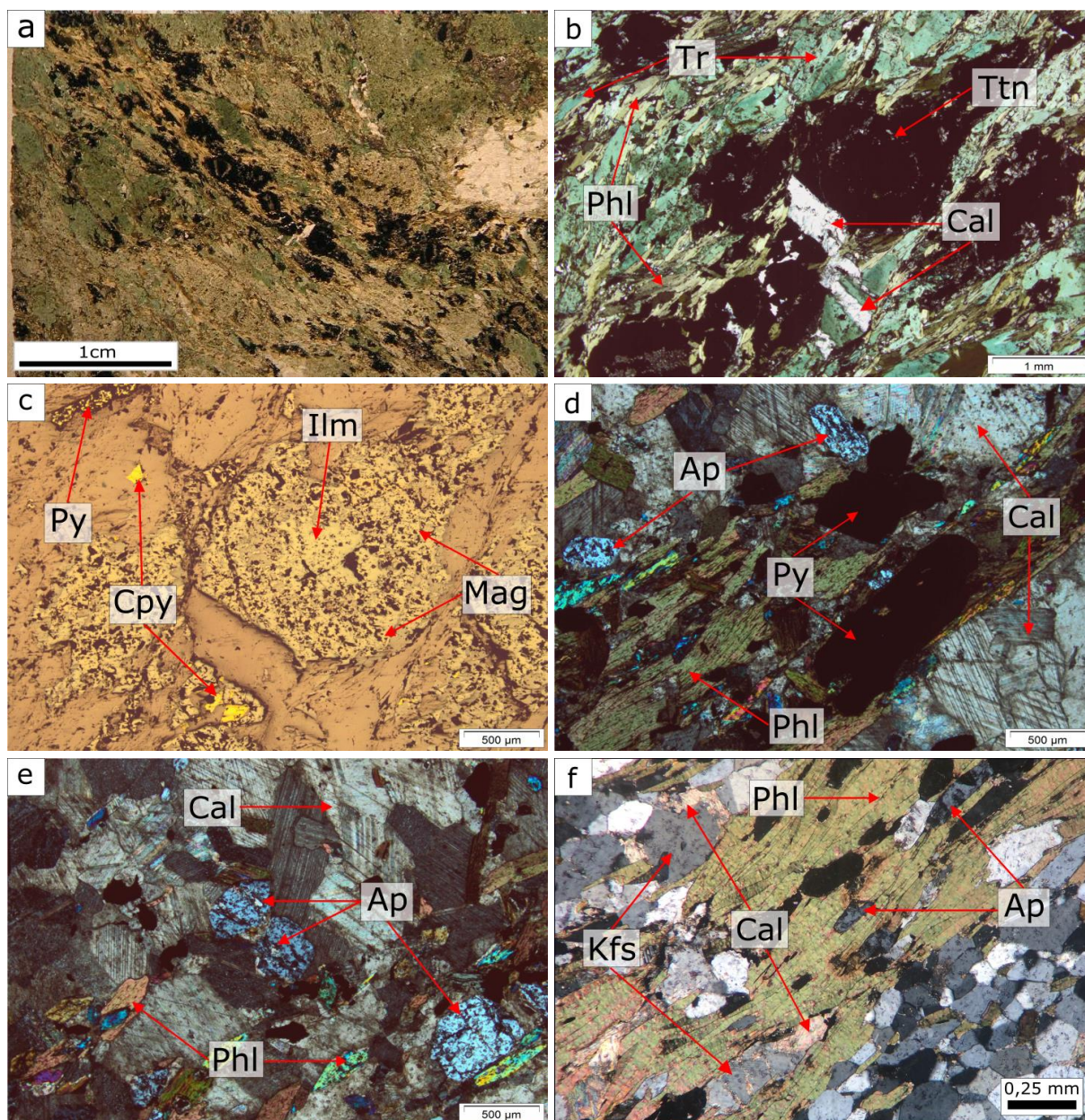


Figura 15. Fotomicrografias das amostras do testemunho TED029. Fotos “a” e “b” obtidas em luz natural; fotos “d”, “e” e “f” obtidas em luz polarizada e foto “c” obtida em luz refletida. a) Agregados de mica e minerais opacos cortando massa de anfibólio. Com “bolsão” e pequenos veios dispersos de carbonato. b & c) Mesma região da amostra. Flogopita em agregados com textura lepidoblástica. Tremolita sem resquícios da clivagem dos anfibólios, porém com pleocroísmo ainda visível e parcialmente alterada para flogopita. Veio de carbonato cortando o anfibólio e os minerais de minério, perpendicular à orientação dos mesmos. Pequenos cristais de titanita formando uma auréola no interior dos agregados de minerais opacos. Mineralogia de minério composta por pirita seguindo a orientação preferencial dos demais minerais, com exceção da calcita. calcopirita disseminada em grãos subédricos. Magnetita e ilmenita em cristais granulares, com textura semelhante à desmistura. Magnetita englobando ilmenita, a qual está situada na parte central do agregado. d) Lamelas de flogopita com textura lepidoblástica em massa de calcita com textura granoblástica. Apatita euédrica, com pequenas feições de corrosão pelo carbonato. Pirita euédrica em cristais cúbicos e alongados segundo à orientação das micas. e) Cristais lamelares de flogopita orientada. Apatita euédrica com feições corrosão pelo carbonato. Massa de carbonato composta por calcita com textura granoblástica. f) Flogopita com textura lepidoblástica, em agregados ou em pequenos cristais nos interstícios do feldspato alcalino. Feldspato alcalino com textura poligonal, em alguns casos fortemente corroído por carbonato. Cristais prismáticos de apatita no interior das lamelas de flogopita. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os processos de glimeritização atuando em menor profundidade puderam ser observados na amostra TED32-48, cuja mineralogia é composta por aproximadamente 70% de carbonato, com cristais de flogopita em lamelas orientadas formando bandas descontínuas ao longo de uma massa de calcita com textura granoblástica. A clivagem das micas é de difícil observação, pois a maioria dos grãos apresenta processos cloritização. A apatita ocorre em cristais euédricos arredondados ou com hábitos prismáticos, seguindo a orientação das micas e apresentando feições de corrosão pelo carbonato (Figuras 16.a & 16.b).

Em contrapartida, os processos de glimeritização de maior profundidade foram observados na amostra TED38-339, cuja mineralogia também é composta predominantemente por carbonato. A glimeritização ocorre de maneira mais singular, como uma textura de fluxo representada por uma massa de lamelas de flogopita, em parte alterando à clorita, formando uma trilha descontínua em uma massa de calcita com textura granoblástica. Os cristais de flogopita são de pequenas dimensões (<1mm) e sofrem deformações causadas pela textura de fluxo. Os processos de cloritização são observados pela formação de uma massa esverdeada, proveniente da alteração direta da flogopita, cuja clivagem ainda é perfeitamente visível. Cristais prismáticos de apatita acompanham a direção do fluxo das micas e ocorrem no interior das lamelas de flogopita, bem como pirita euédrica em quantidades consideráveis (Figura 16.c). Em outras regiões da amostra, a flogopita ocorre em grãos orientados dispersos na massa de calcita, com cristais euédricos de apatita hexagonal cujas bordas reagem fortemente com o carbonato (Figura 16.d).

A amostra TED57-191 apresenta processos de flogopitização mais intensos do que os observados nas duas amostras anteriores, com flogopita representando 40% da mineralogia total. As texturas observadas seguem os padrões visualizados nos processos de glimeritização das outras amostras, com lamelas de flogopita orientada, envolta por cristais de calcita com textura granoblástica, cristais prismáticos de apatita acompanhando a orientação das micas e presença, menos recorrente, de feldspato alcalino intersticial (Figura 16.e). Verifica-se, novamente, cristais de feldspato alcalino reagindo à presença do carbonato, com calcita alterando os grãos a partir do contato entre os mesmos e percolando das extremidades para o interior dos cristais, corroendo-os (Figura 16.f).

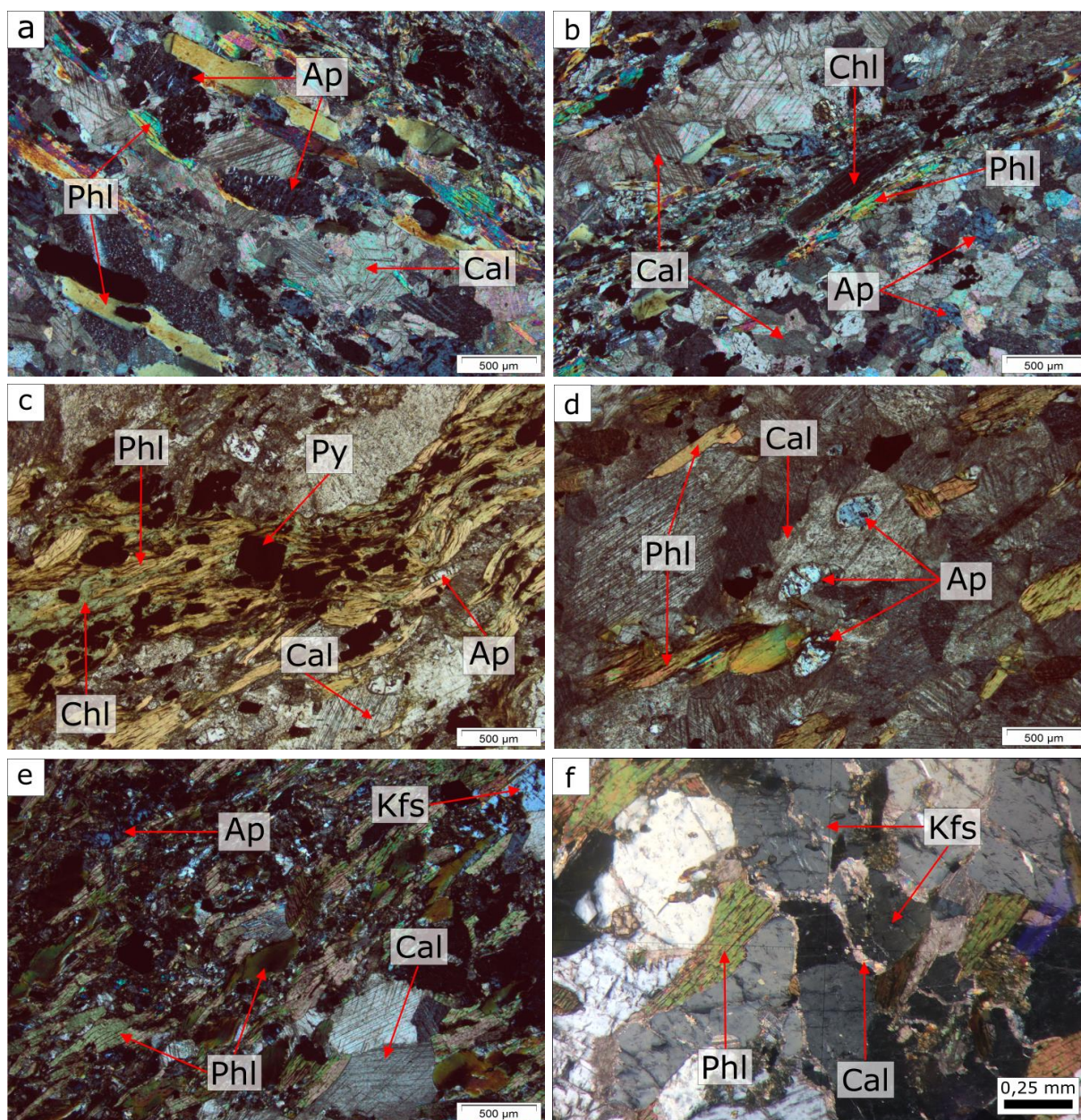


Figura 16. Fotomicrografias dos processos de glimeritização das amostras TED32-48 (a & b), TED38-339 (c & d) e TED57-191 (e & f). Todas as fotos foram obtidas em luz polarizada, com exceção da foto “c”, obtida em luz natural. a) Cristais lamelares de flogopita alterada orientada em massa de calcita com textura granoblástica. Apatita em cristais arredondados ou prismáticos com feições de corrosão por carbonato. b) Cristais orientados de flogopita com característica alteração à clorita. Apatita euédrica parcialmente corroída pelo carbonato. c) Agregados de flogopita lamelar orientados formando textura de fluxo, envoltos por cristais de calcita granoblástica. Formação de clorita a partir da alteração das micas. Presença de cristais prismáticos de apatita e pirita euédrica no interior dos agregados de flogopita. d) Cristais dispersos de flogopita orientada englobados por calcita granoblástica. Grãos hexagonais de apatita com forte reação pelo carbonato nas bordas. e) Flogopita com textura lepidoblástica em contato com calcita apresentando textura granoblástica. Cristais prismáticos de apatita segundo a orientação preferencial da amostra. Presença de feldspato alcalino intersticial. f) Lamelas de flogopita orientada envolta por cristais de feldspato alcalino com feições de corrosão pelo carbonato. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.4 Tremolítico

Dentre as litologias de alteração metassomática encontradas na área de estudo, além dos glimeritos e processos de glimeritização, foi analisada, ainda, uma rocha de coloração esverdeada composta por mais de 50% de tremolita (Figura 17.a). Análises pela técnica de microscopia óptica identificaram a presença de cristais lamelares de flogopita com textura lepidoblástica em uma massa de tremolita sem orientação aparente (Figuras 17.b e 17.c). Foi identificada a presença de apatita em cristais hexagonais e prismáticos, intersticiais aos cristais de tremolita (Figura 17.c). Verificou-se, ainda, processos de flogopitização da tremolita ao mesmo tempo em que são visíveis cristais em corte de sua seção basal, com a clivagem característica dos anfibólios bem preservada (Figura 17.d). Também foram realizados imageamentos *backscattering* por MEV, onde foi possível observar a presença de cristais intersticiais de albita e titanita, englobados pela tremolita (Figuras 17.e & 17.f). Diferentemente das amostras analisadas até então, não foi observada a presença de carbonato.



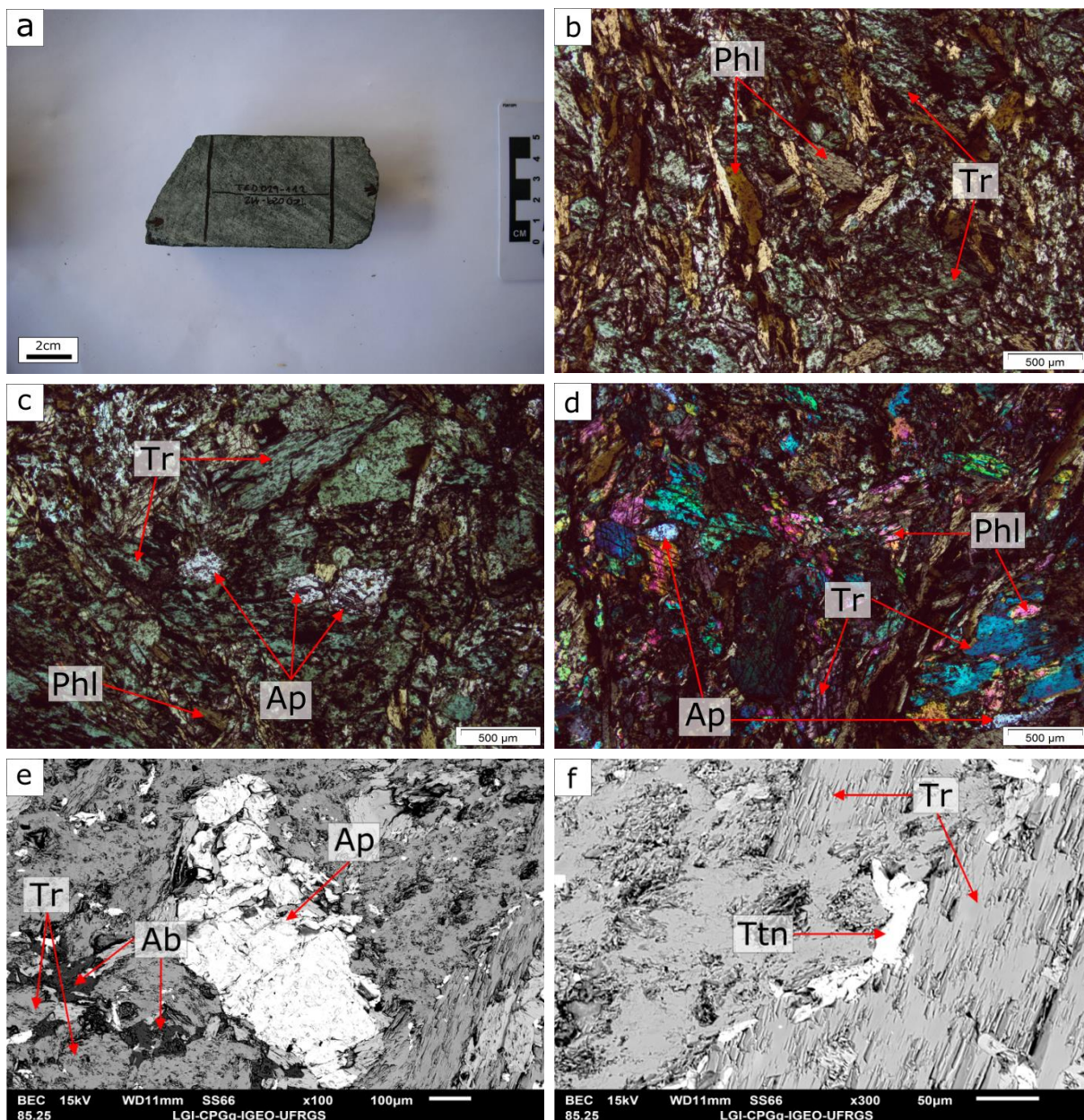


Figura 17. Fotografias da amostra TED29-122. Fotos “b” e “c” obtidas em luz natural por microscopia óptica; foto “d” obtidas em luz polarizada por microscopia óptica; fotos “e” e “f” obtidas por imageamento *backscattering* em MEV. a) Amostra de mão de tremolito. b) Flogopita orientada englobada por cristais de tremolita. c) Cristais hexagonais de apatita englobados pela tremolita. Presença de lamelas de flogopita. d) Seções basais de tremolita e processos de flogopitização de alguns de seus cristais. Cristais prismáticos de apatita intersticiais. e) Albite intersticial. f) Titanita intersticial. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.5 Carbonatito

Processos de carbonatação estão fortemente vinculados aos glimeritos e rochas glimeríticas analisadas anteriormente e, com exceção do tremolitito, a presença de carbonato é visível em todas as amostras analisadas nesse estudo. As amostras selecionadas para sua breve análise foram escolhidas por serem bastante representativas da mineralogia principal do carbonato, onde a sua interação com as demais litologias da área de estudo é pouco visível.

O carbonatito apresenta coloração esbranquiçada, que varia para tons mais rosados, e é formado pela intercalação entre bandas descontínuas de calcita e flogopita, a qual chega a formar pequenos agregados isolados (Figuras 18.a & 18.b). Através de análises por microscopia óptica, verificou-se que a mineralogia principal do carbonato é constituída majoritariamente por calcita com textura granoblástica, cristais lamelares de flogopita orientada, além de apatita hexagonal, em contato direto com os cristais de flogopita ou dispersa no carbonato, com feições de corrosão pela calcita em alguns cristais. Observa-se, ainda, a presença de pirocloro, um mineral característico de complexos carbonatíticos, além de cristais de tremolita corroídos pelo carbonato e com resquícios da clivagem ainda visíveis (Figuras 18.c & 18.d).

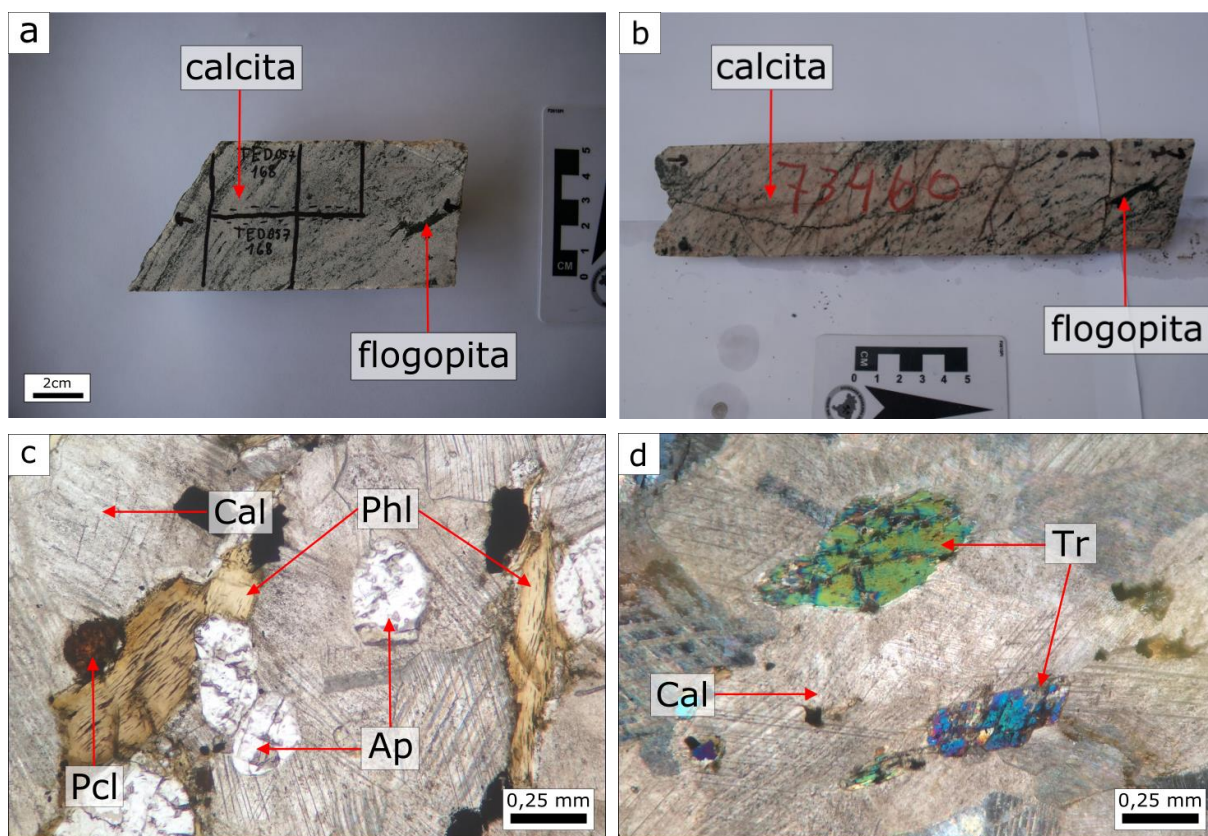


Figura 18. Fotografias de amostras de mão e fotomicrografias do carbonato de amostras do furo TED057. Fotos “c” e “d”, obtidas em luz natural. a) Amostra 57-168. intercalação entre bandas descontínuas de calcita e flogopita. b) Calcita em tons rosados e flogopita em agregados isolados. A intercalação entre as bandas não é tão nítida. c) Calcita granoblástica. Lamelas de flogopita orientada em contato com cristais hexagonais de apatita. Feições de corrosão da apatita pelo carbonato e presença de pirocloro. d) Cristais de tremolita corroídos pelo carbonato e com clivagem ainda visível. Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi realizado imageamento por EDS, em MEV, de mapa composicional de seção da amostra do carbonatito (Figura 19). Os resultados mostram uma composição predominantemente calcítica do carbonato, com quantidades de Mg subordinadas, indicando a presença de dolomita na composição do carbonatito. Esses resultados corroboram as análises de campo, onde foram detectadas áreas onde o carbonato não reagia ao HCl.

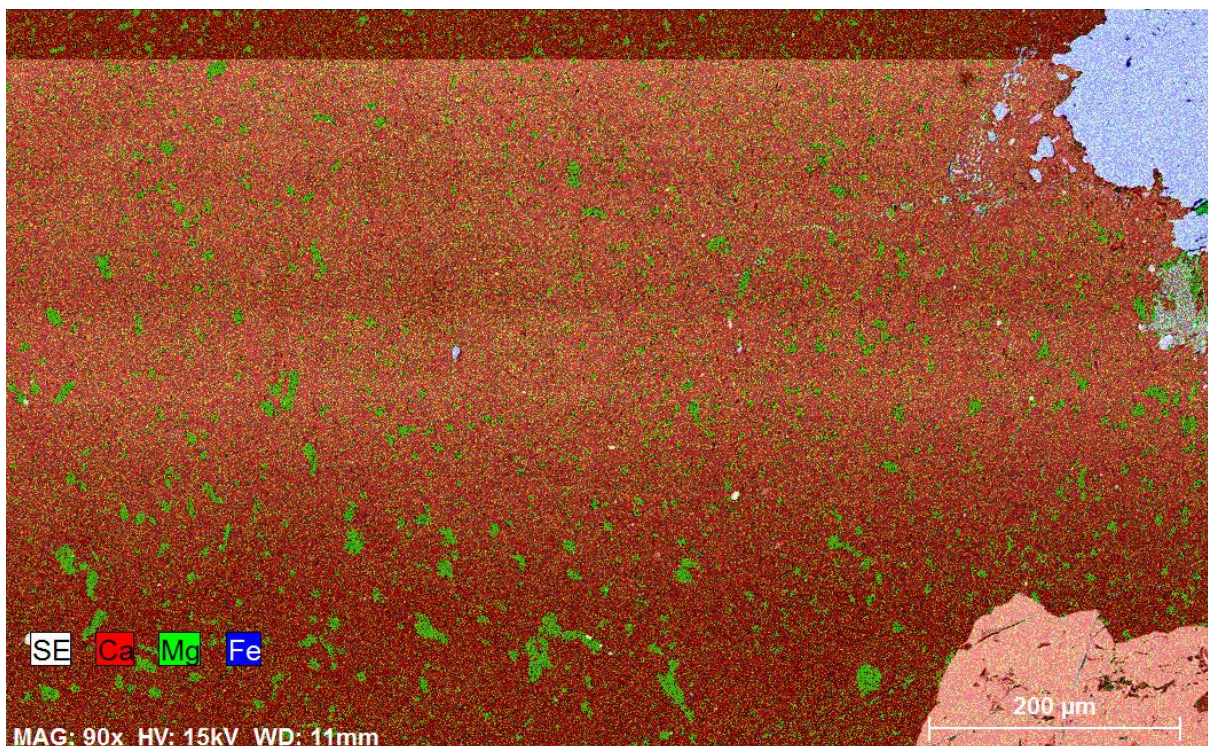


Figura 19. Imagens por MEV de mapa composicional por EDS de seção de lâmina delgada da amostra TED57-168. Composição predominantemente calcítica do carbonato, com teores de Mg subordinados. Os cristais em vermelho e azul são representados por apatita e magnetita, respectivamente. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.5.2 Geoquímica de Rocha Total

Foram realizadas análises de geoquímica de rocha total do carbonatito pelos mesmos métodos empregados nas análises dos glimeritos, ICP-AES para elementos maiores e ICP-MS para elementos traço. Os resultados das análises podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de elementos maiores em % em peso de óxido. Resultado de elementos traço em ppm. Fonte: Elaborado pelo autor.

		<b>TED057</b>			
		<b>Amostra 28</b>			
SiO <sub>2</sub>	2,82	Ba	1050	Sm	55,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34	Ce	789	Sn	1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64	Cr	20	Sr	5890
CaO	49,6	Cs	0,01	Ta	12,7
MgO	1,77	Dy	22,4	Tb	4,49
Na <sub>2</sub> O	0,03	Er	7,46	Th	30,6
K <sub>2</sub> O	0,18	Eu	1,7	Tm	0,89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002	Ga	4,8	U	44,2
TiO <sub>2</sub>	0,14	Gd	38	V	60
MnO	0,17	Hf	1,2	Y	86,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,72	Ho	3,43	Yb	4,11
SrO	0,78	La	37	Zr	70
BaO	0,13	Lu	0,62	As	5,5
LOI	37,6	Nb	153	Bi	0,02
Total	98,92	Nd	352	In	0,058
		Pr	92,4	Se	3
		Rb	2,9	Te	0,08
C	10,5				
S	0,46				

Com o objetivo de comparar as variações composicionais entre as amostras de glimerito (Tabelas 1 & 2) e do carbonatito (Tabela 4), foram confeccionados dois gráficos com os resultados das análises, sendo um para elementos maiores (Figura 20) e outro para os ETR (Figura 21).

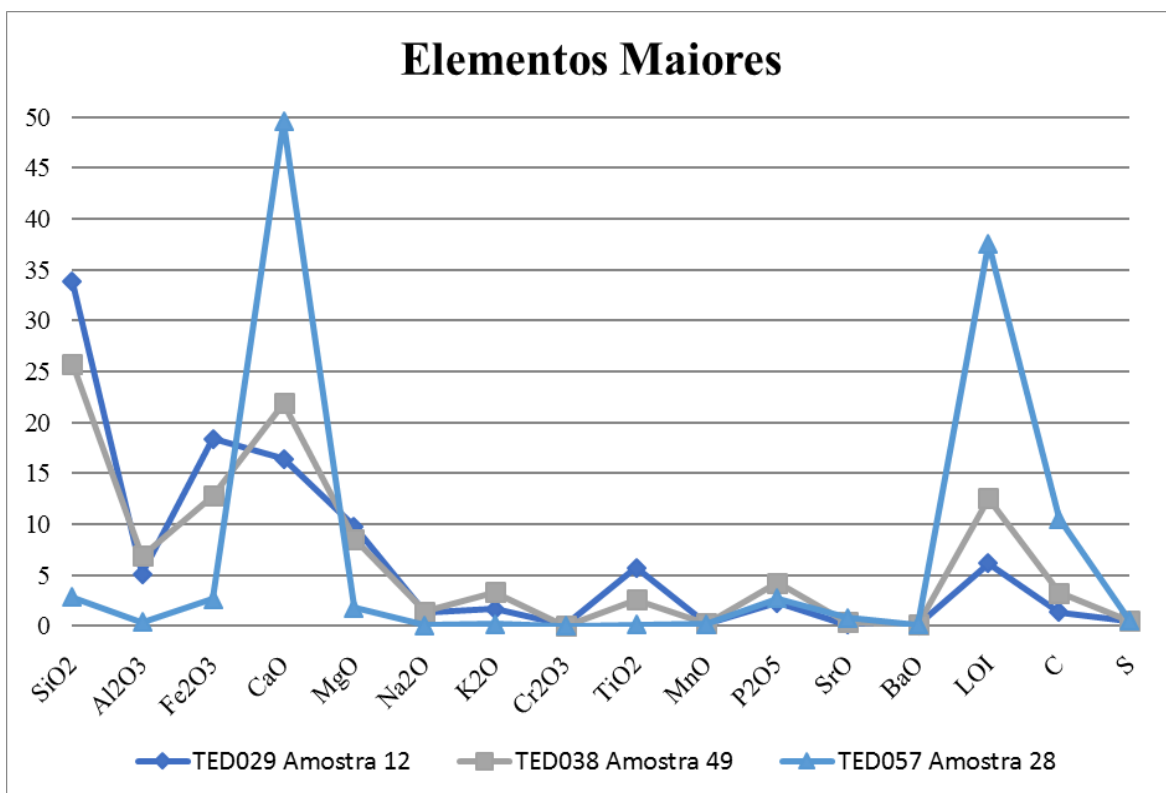


Figura 20. Concentrações dos elementos maiores nas 3 amostras analisadas, em porcentagem em peso de seus óxidos. Fonte: Elaborado pelo autor.

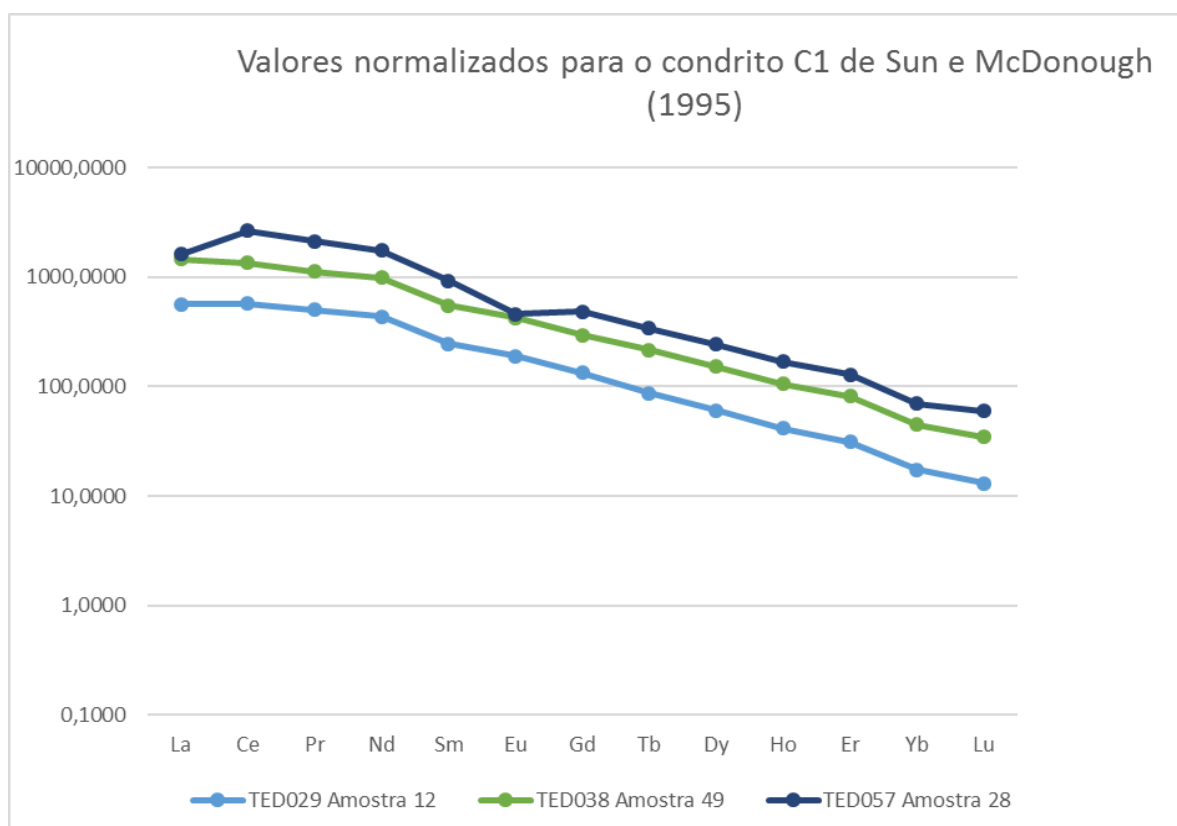


Figura 21. Diagrama de distribuição dos ETR normalizados por condrito C1. Fonte: Elaborado pelo autor com dados do condrito C1 de Sun e McDonough (1995).

A partir das análises dos gráficos gerados, pode-se notar que os dados obtidos dos elementos maiores e ETR corroboram as análises feitas por microscopia óptica e MEV. O carbonatito apresenta os maiores teores de CaO, que também são observados nas amostras de glimerito. Observa-se um aumento em Fe e Mg, muito mais expressivo nos glimeritos, porém ainda representativo no carbonato, isso é devido à presença de minerais ferro-magnesianos como a flogopita, magnetita e ilmenita. Concentrações maiores de  $TiO_2$  são observadas apenas nos glimeritos, devido à presença de titanita, a qual é ausente na amostra do carbonatito. É nítida a presença de  $P_2O_5$  nas três amostras, evidenciado pela considerável presença de apatita em todas elas.

No diagrama da figura 21 observa-se que o padrão de variação dos ETR entre as três amostras é muito similar, o que indica uma forte interação entre as duas litologias distintas, onde a amostra de carbonatito apresenta uma maior razão entre os ETR leves e pesados se comparado com a razão observada nos glimeritos.

Quanto aos valores dos elementos traço observados nas tabelas 1, 2 e 4, verifica-se uma quantidade significativa de Ce, principalmente no carbonatito, devido à presença de pirocloro e minerais como alanita. Maiores teores de La, Nb, V e Y podem ser observados, principalmente nos glimeritos, e são esperados para carbonatitos e rochas associadas, assim como uma maior presença de U no carbonatito. Verificam-se quantidades significativas de Zr nas amostras de glimerito, evidenciado pela presença de Zircão, principalmente na amostra 49 (Figura 12.f). Todavia essa quantidade é ínfima no carbonatito. Verifica-se, ainda, altos teores de Ba, principalmente no carbonatito, que podem estar associados à presença de barita, que forma solução sólida com celestita. Análises de MEV da amostra TED29-129 encontraram a presença de celestita (Figura 13.c). Os valores de Sr das amostras não estão discriminados no gráfico por questões de formatação, devido aos altos teores do elemento nas amostras, principalmente no carbonatito.

## 6.6 Processos de Fenitização

Foi observado um terceiro tipo de rocha formada por processos de alteração metassomática onde verificou-se a presença significativa de feldspato alcalino, de coloração alaranjada, formando agregados com textura de fluxo e cortados por finas bandas descontínuas de biotita. Presença muito esparsa de carbonato cortando o feldspato alcalino (Figura 22.a). Sua mineralogia foi analisada através de microscopia óptica, onde foram observados cristais de biotita orientados ao longo de uma massa anédrica de feldspato alcalino. O feldspato mostra-se nitidamente alterado e os limites dos grãos só são visíveis pelo contato com os outros minerais, além de apresentar uma textura que lembra processos de desmescla com albita irregularmente distribuída nos cristais de feldspato potássico. Observou-se a presença de pequenos cristais prismáticos de apatita no interior das lamelas de biotita, além de titanita euédrica, também orientada preferencialmente (Figura 22.b).

Foram feitas análises por MEV que corroboraram os dados obtidos pela microscopia óptica. Observou-se a presença de veios de carbonato cortando a massa irregular de albita, além da presença de feldspato potássico associado à albita (Figura 22.c). Verificou-se, também, que o feldspato potássico intrude a albita de maneira pervasiva como injeções formadas por pequenos veios irregulares a partir de um veio principal, indicando uma cristalização posterior. Foi possível observar, ainda, a presença de fraturas ao longo da seção, envoltas predominantemente por feldspato potássico, que podem ser indicativas da origem do fluido potássico que reagiu com a albita precoce (Figuras 22.d, 22.e & 22.f).



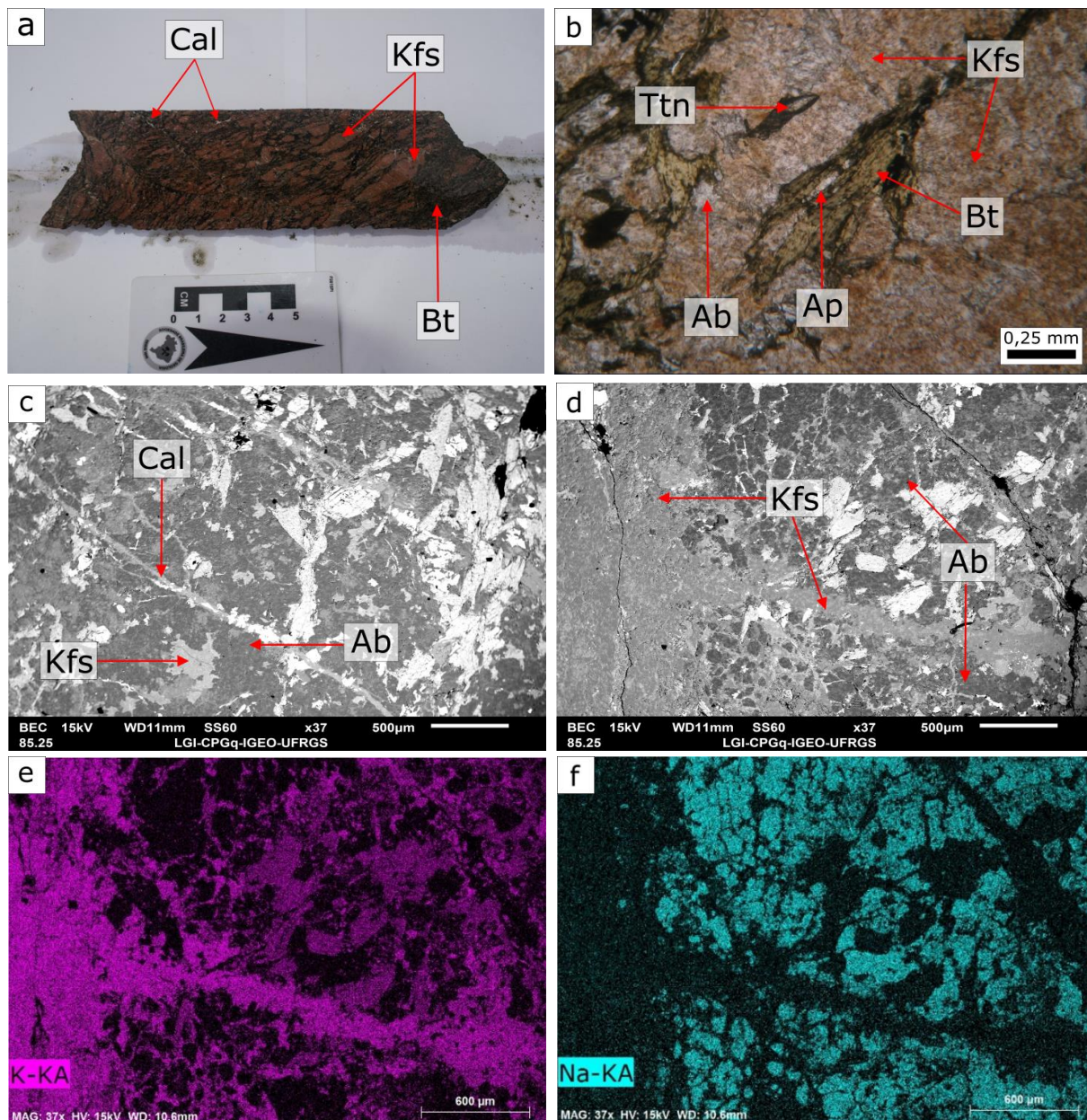


Figura 22. Fotografias da amostra TED 57-206. Foto “b” obtida por microscopia óptica em luz natural; fotos “c”, “d”, “e” e “f” obtidas por imageamento *backscattering* em MEV. a) Amostra de mão do fenito. Rocha de coloração alaranjada composta por agregados de feldspato alcalino intercalados com finas bandas descontínuas de biotita. Presença de carbonato em pequenos veios esparsos. b) Cristais orientados de biotita, com apatita no interior de suas lamelas, dispersos em uma massa de Kf e Or. Titanita euédrica orientada. c) Veio de calcita cortando o Kf, com presença de Or irregularmente distribuído. d) e f) Mesma região da amostra. Veio tardio de feldspato potássico intrudindo o Kf através. Presença de fraturas associadas ao feldspato potássico. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 7. DISCUSSÕES

A formação dos glimeritos é evidenciada pela presença de minerais ricos em Fe (magnetita e ilmenita), Fe + Ca + Ti (titanita), carbonatos (calcíticos e dolomíticos subordinados), além de calcita e apatita como indicadores da presença e da atuação de  $P_2O_5$  e de  $CO_2$  e da remobilização de Fe, após a alteração dos minerais primários formados pelo magma inicial de composição máfica-ultramáfica (possivelmente melteigítica). Essas rochas são constituídas, possivelmente, por piroxênios ou por olivina-piroxênios que foram alterados para anfibólio por processos metassomáticos tardios. Mesmo que não tenham sido encontrados resquícios dos minerais primários, a composição dos minerais de alteração metassomática (tremolita e flogopita) corroboram a premissa de que aqueles foram os minerais originários a partir de intrusões magmáticas iniciais que formaram as primeiras rochas do Complexo alcalino-carbonatítico Três Estradas.

Os processos de glimeritização observados nos testemunhos de sondagem do Complexo variam desde profundidades mais rasas (77m) (Figuras 15.a & 15.b), até profundidades bastante consideráveis (340m) (Figuras 15.c & 15.d). O que indica que os processos de alteração metassomática atuaram de forma pervasiva ao longo do Complexo, sem ficarem restritos a um tipo de rocha ou região específica. A presença de minerais portadores de ETR, como celestita e alanita, é característica de complexos alcalino-carbonatíticos e sua presença, junto com óxidos de Fe característicos e fosfatos como apatita, reforça a ideia de glimeritização.

A flogopita apresenta textura lepidoblástica dominante, em agregados ou em trilhas descontínuas, com dobras de fluxo e eventualmente com grãos dispersos que não obedecem a orientação preferencial (Figuras 10.a, 10.b, 10.d, 11.a & 11.e). Sua composição química é dada por uma maior dominância de Mg em relação ao Fe (Figura 12), podendo classificá-la como um membro de afinidade flogopítica, da Série da Biotita.

A albita ocorre em grãos anédricos em trilhas descontínuas nos interstícios dos cristais de flogopita e de tremolita (Figuras 12.b & 16.e). Em alguns casos pode ser observada em cristais individuais, de maiores dimensões, cortada por pequenos

veios de calcita (Figura 10.a) e, no caso dos processos de fenitização sobre as encaixantes gnáissicas, em massas descontínuas intercaladas com carbonato e feldspato potássico (Figura 21.c). Tais aspectos são indicativos de uma cristalização tardia em relação à paragênese observada nas amostras de glimeritos, tremolitos, carbonatitos e fenitos, o que indica processos de reequilíbrio das rochas.

A presença de zircão ocorre tanto como cristais isolados (Figura 12.a) quanto em aglomerados de bastonetes com orientação preferencial que difere da orientação das lamelas de flogopita (Figura 11.f). Essa feição textural é indicativa de que essa fase de formação dos cristais de zircão teve origem durante os processos de metassomatismo que originaram as micas e anfibólios e, por consequência, marcam os processos metassomáticos que atuaram no Complexo e não são derivados da encaixante. Em trabalhos futuros esses cristais poderão ser utilizados para análises de datação por métodos isotópicos característicos do mineral como U-Pb, na tentativa de datar os processos de alteração metassomática que originaram os glimeritos.

Pode-se assumir que houve mais de uma fase de intrusão de magma carbonatítico, visto pela presença de diferentes morfologias dos cristais de calcita, onde há a presença de calcita subédrica de maiores dimensões, com clivagem fortemente visível e o contato entre os grãos mais nítidos, e calcita anédrica de menores dimensões, clivagem menos aparente e contatos menos uniformes. Essas morfologias distintas de calcita ocorrem associadas à flogopita, apatita, clorita e óxidos de Fe como ilmenita e magnetita fortemente orientados (Figura 15.b).

O CACTE dificilmente poderá ser comparado a outros complexos desse tipo conhecidos no Brasil, pois suas proporções espaciais, variação composicional de rochas e de minerais de minério do Complexo e possível volume de voláteis que atuaram nos processos tardios diferem em relação aos presentes em outros complexos, como por exemplo de Angico dos Dias no Estado da Bahia. Isso implica em rochas de composições contrastantes e na presença de processos específicos de alteração e reequilíbrio, pois a composição e a relação entre fluido e rocha observada nos dois complexos, e por consequência os produtos de alteração entre ambos, diferem em parte.

## 8. CONCLUSÕES

A origem dos glimeritos e das rochas glimeritizadas do CACTE se deu a partir de processos metassomáticos que mobilizaram Fe, formando óxidos como magnetita e ilmenita, além da remobilização, por fluídos tardi-magmáticos, em especial de  $P_2O_5$  e  $CO_2$  que alteraram as rochas máficas-ultramáficas precoces do Complexo, dando origem a mineralização de apatita e formação de flogopita, magnetita, ilmenita, como principais, e de carbonato em especial nos carbonatitos. A interpretação para a gênese dos processos de metassomatismo é de que eles foram provenientes de fases finais da intrusão alcalina associada ao magma carbonatítico. Tais fases são representadas pela entrada de magmas alcalinos mais diferenciados, ou seja, de afinidade mais félsica, além da forte participação de fluídos foscoríticos, ricos em  $P_2O_5$ , e carbonatíticos, ricos em  $CO_2$ , os quais foram extremamente reativos com as rochas geradas nas fases iniciais de intrusões alcalinas do Complexo, como melteigitos, piroxenitos e olivina-piroxenitos.

A geração de flogopita e tremolita é decorrente de processos de alteração das rochas máfica-ultramáficas portadoras de minerais como olivina e piroxênios, através da ação tardia de fluídos carbonáticos e foscoríticos que metassomatizaram as rochas mais precoces. Tal evidência é corroborada pela assimilação de flogopitas em carbonatos e esses processos são tidos como responsáveis pela formação de glimeritos, das rochas glimeríticas, do carbonatito, dos processos de fenitização da encaixante e das concentrações de apatita como minério explorável, além da presença de óxidos de Fe característicos.

Todavia, como não foram encontrados ou observados resquícios da mineralogia primária que deu origem aos minerais provenientes dos processos metassomáticos, as possibilidades são de que o protólito era, possivelmente, rocha composta por piroxenitos, olivina-piroxenitos além de melteigitos. Isso devido à compatibilidade geoquímica e composicional dos minerais provenientes dos processos de alteração, podendo representar algumas das rochas citadas ou uma associação entre elas. Assim como não é possível estabelecer com certeza a percentagem de flogopita que foi originada diretamente de olivina, de piroxênios ou coo alteração final e fase mineral intermediária com tremolita. Tais questões

associadas a razão entre os fluídos carbonático e foscoríticos e o protólito que gerou a paragênese metassomática. Se a razão de fluídos era alta, fases com flogopita teriam se originado diretamente dos minerais ultramáficos iniciais, como olivina e piroxênios, sem passar por etapa intermediária de alteração a anfibólio.

Os processos metassomáticos atuaram e estão presentes em todas as rochas estudadas. Nas rochas da sequência máfica-ultramáfica alteraram a mineralogia original para flogopita, tremolita, carbonato, titanita, apatita, magnetita, ilmenita e zircão, dando origem aos processos que formaram os glimeritos e as rochas glimeritizadas. Nas encaixantes ocorreu a formação de apatita, ilmenita, magnetita, titanita, feldspato potássico e albita como processos de fenitização provocados por prováveis líquidos residuais de magmas alcalinos em fases finais (imiscibilidade de líquidos finais como líquidos carbonáticos e foscoríticos, ambos residuais e imiscíveis com os líquidos silicáticos que formaram as rochas do Complexo). Por fim, como resíduo tardio da diferenciação e da imiscibilidade de líquidos, o magma ou fluído carbonático residual deu origem à calcita dominante e à dolomita, subordinada.

A imiscibilidade entre líquidos foscoríticos e carbonáticos, como líquidos residuais imiscíveis, pode ser interpretada como um dos fatores responsáveis pelos processos de metassomatismo que atuaram sobre as rochas do Complexo. Porém, esse processo pode não ter sido o único fator que atuou no Complexo gerando os termos mais precoces e mais tardios. Processos de cristalização fracionada e formação de líquidos residuais metassomáticos acompanhados ou não de processos hidrotermais tardios também são feições de alteração discutidas como possíveis de atuar na consolidação final de complexos alcalinos.

Tais características são representativas de uma superposição de processos, em geral não excludentes, nos diferentes grupos de rochas, as quais estão vinculadas entre si sob o ponto de vista genético. Além disso, o fato de que as paragêneses analisadas são compatíveis à de sistemas alcalinos formadores de complexos alcalino-carbonáticos ao redor do mundo, as rochas pertencentes à área de estudo podem ser vinculadas a esse tipo de processo e interpretadas como pertencentes à um complexo de mesma afinidade, ou seja, o Complexo Alcalino-Carbonático Três Estradas.

## 9. REFERÊNCIAS

Al Ani, T. 2013. *Mineralogy and petrography of Siilinjärvi carbonatite and glimmerite rocks, Eastern Finland*. Geological Survey of Finland, 18p. (Internal Report).

Biondi, J.C. 2005. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. *In: Comin-Chiaramonti, P.; Gomes, C.B. (Ed). Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo, Edusp, p. 707-750.

Biondi, J.C. 1986. *Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática*. Taq, p. 477-552.

Biondi, J.C. 2015. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros*. São Paulo, Oficina de textos, p. 31-98.

Chakmouradian, A. 2009. The geochemistry of carbonatites revisited: Two major types of continental carbonatites and their trace-element signatures. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 11, p. 10806.

Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. 2005. *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo, Edusp, p. 21-30.

Dedavid, B. A., Gomes, C.I., Machado, G. 2007. *Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparações de amostras*. Porto Alegre, EdiPUCRS, p. 9-26.

Elliott, H.A.L., Wall, F., Chakmouradian, A.R., Siegfried, P.R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A.A., Marks, M.A.W., Dowman E., Deady, E. 2018. Fenites associated with carbonatite complexes: A review. *Ore Geology Reviews*, 93: 38-59.

Gittins, J., Allen, C.R., Cooper, A.F. 1975. Phlogopitization of pyroxenite; its bearing on the composition of carbonatite magmas. *Geological Magazine*, 112 (5): 503-507.

Godoy, L. H. 2015. *Geocronologia  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  das rochas e evolução mineralógica e geoquímica do manto de intemperismo do complexo alcalino-carbonatítico de Tapira (MG)*. Rio Claro 131 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista.

Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G., Rubertl, E., Rojas, G.E.E. 2018. Cretaceous carbonatites of the southeastern Brazilian Platform: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2): 317-345.

Gupta, A.K., Le Maitre, R.W., Haukka, M.T., Yagi, K. Geochemical studies on the carbonated apatite glimmerites from Damodar Valley, India. 1983. *Proceedings of the Japan Academy*, 59 (5): 1113-1116.

Hartmann, L.A. 1987. Isócrona Sm-Nd de 2 Ga em Minerais de Duas Amostras do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1., 1987, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre, SBGQ, v.1, p. 105-111.

Hartmann, L.A. 1991. Condições de metamorfismo no Complexo Granulítico Santa Maria Chico. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2): 107-113.

Kjarsgaard, B.A., Wooley. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: Evidence from a global database. 2008. *The Canadian Mineralogist*, (46): 741-752.

Lapin, A.V., Iwanuch, W., Ploshko, V. 1999. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, (29): 483-490.

Larsen, E.S., Pardee, J.T. 1929. The stock of alkaline rocks near Libby, Montana. *The journal of geology*, 37(2): 97-112. Disponível em: <[https://www.jstor.org/stable/30056449?readnow=1&seq=1#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/30056449?readnow=1&seq=1#metadata_info_tab_contents)>. Acesso em: 16 set. 2019.

Laux, J.H., Toniolo, J.A., Sander, A., Pinto, L.G.R., Parisi, G., Senhorinho, E.M. 2019. Seria 233 Ma a idade do carbonatito Três Estradas - Rio Grande do Sul? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 4., 2019. Gramado, *Anais...* Gramado, SBM, v.1, p.36.

Le Bas, M.J. 2008. Fenites associated with carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, (46): 915-932.

Le Maitre, R.W. 2002. Carbonatites. In: Le Maitre, R.R., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., Woolley, A.R. (Ed.). *Igneous Rocks: A classification and Glossary of Terms*. New York, Cambridge University Press, p. 10.

Luciano, R.J., Godoy, A.M. 2017. Geologia do complexo metacarbonatítico de Angico dos Dias, divisa Bahia/Piauí, Brasil. *Geociências*, 36(2): 301-314.

McDonough, W.F. & Sun, S.S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 67(5):1050-1056.

McKie, D. 1989. *Petrology. Encyclopedia of Earth Science*. Boston, Springer. 633p.

MMG. Milcreek Mining Group. 2018. *Independent Technical Report. Três Estradas Phosphate Project, Rio Grande do Sul, Brazil*. Salt Lake City, MMG, 591p.

Modreski, P.J., Armbrustmarcher, T.J., Hoover, D.B. 1995. *Carbonatite Deposits*. U. S. Geological Survey, 831p. (Open-File Report).

Morel, S.W. 1988. Malawi Glimmerites. *Journal of African Earth Sciences*, 7(7/8): 987-997.

Morogan, V. 1994. Ijolite versus carbonatite as sources of fenitization. *Terra Nova*, (6): 166-176.

Nardy, A.J.R., Machado, F.B. 2016. *Mineralogia Óptica*. São Paulo, Oficina de Textos, 128p.

Oliveira, I.L. 2015. *Isótopos de Nd e Sr em minerais de diferentes séries petrogenéticas nos complexos alcalino-carbonatíticos de Salitre e Catalão I*. Brasília, 254p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Philipp, R. P., Pimentel, M. M., Chemale JR, F. 2016. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, (46): 83-104.

Senhorinho, E. M. 2012. *Controle Estrutural dos carbonatitos no Rio Grande do Sul: análise de produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísicos*. Porto Alegre 180p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Toniolo, J.A., Grazia, C.A., Parisi, G. Pinto, L.G. 2011. Carbonatitos do Rio Grande do Sul, Brasil. *In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 5.*, 2011, Cidade de Goiás, *Poster...* Cidade de Goiás: SVAA.

Uliana, D. 2010. *Caracterização tecnológica do minério de fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG - área fosfertil.* São Paulo, 210p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Zaitsev, A.N., Williams, C.T., Jeffries, T.E., Strekopytov S., Moutte, J., Ivashchenkova, O.V., Spratt, J., Petrov. S.V, Wall, F., Seltmann, R. 2014. Rare Earth elements in phoscorites and carbonatites of the Devonian kola Alkaline Province, Russia: Examples from Kovdor, Khibina, Vuoriyarvi and Turiy Mys complexes. *Ore Geology Reviews*, (64): 477-498.



SAMPLE	ME-MS81 Ba ppm	ME-MS81 Ce ppm	ME-MS81 Cr ppm	ME-MS81 Cs ppm	ME-MS81 Dy ppm	ME-MS81 Er ppm	ME-MS81 Eu ppm	ME-MS81 Ga ppm	ME-MS81 Gd ppm	ME-MS81 Ge ppm	ME-MS81 Hf ppm	ME-MS81 Ho ppm	ME-MS81 La ppm	ME-MS81 Lu ppm	ME-MS81 Nb ppm	ME-MS81 Nd ppm	ME-MS81 Pr ppm
1	2400	104.5	180	0.35	4.02	1.98	2.36	23.9	6.27 <5	6.5	0.76	50.2	0.22	7.9	48.9	12.55	
2	1210	311	120	1.3	15.05	4.95	9.93	36.5	26.5 <5	23.3	2.39	131.5	0.32	388	170	41.2	
3	1590	474	50	0.25	11.65	3.08	10.9	8.8	24.3 <5	1.2	1.59	195	0.13	>2500	242	60.2	
4	>10000	4110	80	0.14	30.6	6.74	38	24.6	83.1 <5	0.7	3.87	2620	0.21	>2500	1310	395	
5	2460	104.5	100	0.26	1.94	0.8	1.86	17.2	3.8 <5	4.4	0.33	57	0.08	34	42.4	11.4	
6	1640	130.5	190	0.75	4.14	1.86	2.6	22.6	7.11 <5	6	0.77	64.6	0.2	28.2	63.1	15.85	
7	1015	68.7	180	0.66	2.81	1.16	2.08	22.2	4.67 <5	4.8	0.48	32.6	0.13	7	36.1	8.82	
8	844	757	100	0.64	2.5	8.25	18.2	9.9	44.9 <5	4.9	3.84	329	0.51	200	392	97	
9	>10000	871	50	0.17	19.85	5.2	18	8.1	43.8 <5	1	2.81	400	0.23	144.5	430	110.5	
10	7560	601	150	0.26	18.5	4.85	16.2	17.8	40.1 <5	16.4	2.56	236	0.3	370	334	81.1	
11	108	1115	190	0.45	33.9	9.72	27.9	20.1	67.1 <5	11.5	4.73	447	0.53	230	607	150.5	
12	461	337	350	1.12	14.85	5	10.75	19.1	26.7 <5	11.5	2.27	134.5	0.32	134	198.5	46.9	
13	1695	817	20	0.11	29.7	9.99	22.3	6.5	55 <5	2.2	4.59	346	0.63	45.8	450	109	
14	1165	733	190	0.72	24.7	8.17	22.3	11.2	45.8 <5	5.4	3.85	316	0.54	306	381	95.1	
15	2130	730	170	0.77	25.5	8.36	18.4	10.6	46.3 <5	4.9	3.85	316	0.57	361	379	94.2	
16	1125	737	190	0.05	24.2	8.46	17.85	10.8	44.7 <5	4.3	3.91	323	0.59	328	378	92.6	
17	1365	592	110	0.82	18.4	6.57	13.2	10.5	32.2 <5	3	2.95	282	0.5	219	279	71.6	
18	1535	734	120	0.48	25.6	8.28	18.5	8.6	48.9 <5	4.7	3.93	331	0.48	169	384	88.1	
19	802	803	30	0.21	30.5	9.4	21.7	6.6	58.8 <5	4.2	4.52	339	0.54	61.9	442	97.6	
20	2370	292	30	0.21	6.98	3.33	3.58	19.4	9.54 <5	5.6	1.27	150	0.35	104.5	104.5	29.2	
21	461	161.5	850	0.17	8.7	3.52	5.84	19.9	13 <5	7.5	1.5	89.2	0.32	88.5	103.5	25.4	
22	693	384	20	0.34	16.4	6.27	10.35	26.5	24.2 <5	9.6	2.64	158.5	0.5	136	191	46.9	
23	1215	102.5	230	0.54	4.39	1.94	2.98	20.3	5.73 <5	4.8	0.76	51	0.2	41	45.9	11.55	
24	773	92.9	480	0.68	4.77	1.89	2.97	20.3	7.76 <5	7.4	0.75	36.8	0.13	58.7	52.4	11.85	
25	1030	897	160	0.16	20.6	6.7	15.2	17.1	36.9 <5	7.3	3.29	431	0.52	124	379	99.3	
26	483	287	500	0.14	10.95	3.85	7.16	14.1	17 <5	8.9	1.74	116.5	0.4	146	148.5	35.7	
27	3650	231	940	1.79	10	3.52	6.03	23	14.5 <5	7	1.57	97	0.33	198.5	117	27.5	
28	1050	789	20	0.01	22.4	7.46	15.7	4.8	38 <5	1.2	3.43	357	0.62	153	352	92.4	
29	835	1120	30	0.46	42.7	13.25	29.1	12.5	69.9 <5	11	6.63	443	0.8	147.5	606	142	
30	2100	822	30	0.35	28	8.74	20.1	8.4	49.1 <5	3.4	4.13	357	0.6	74.2	433	104.5	
31	2050	790	320	1.22	21.9	6.74	17.05	12.5	38 <5	4.5	3.36	339	0.45	280	389	96.2	
32	822	466	640	1.72	11.7	3.68	9.38	15.8	21.5 <5	5.4	1.69	193.5	0.21	650	233	57.9	
33	614	1025	110	0.36	31.6	9.6	24.1	14.4	56.6 <5	5.4	4.69	430	0.61	150.5	504	126.5	
34	701	746	270	1.08	24.5	7.85	17.8	13	42.3 <5	5.9	3.8	311	0.5	368	376	90.9	
35	871	376	440	1.58	14.1	5.3	9.18	20.5	20.7 <5	12.4	2.27	149	0.44	173.5	182	45	
36	829	1145	90	0.14	31.2	8.62	26	17.8	56.4 <5	10.6	4.42	432	0.46	346	585	143	
37	4150	726	220	0.16	26.8	8.57	18.3	8.5	45.4 <5	4.4	4.13	302	0.61	205	387	92.3	
38	1610	777	160	0.69	25	8.19	18.8	9.9	42 <5	4.6	3.67	333	0.58	110	386	93	
39	2440	241	380	1.53	10.3	4.62	5.47	21.9	14.35 <5	10.5	1.77	120.5	0.46	127	103	26.8	
40	3990	960	250	0.51	28.3	8.85	21.2	14.7	48.7 <5	6.8	4.11	426	0.56	288	484	119.5	
41	1465	887	230	0.7	23.1	7.63	17.3	11.1	39.1 <5	4.8	3.74	433	0.56	484	390	100.5	
42	4740	269	20	0.47	8.28	2.65	5.24	23	11.3 <5	5.4	1.32	123.5	0.21	141.5	109	29.9	
43	2470	1450	100	0.61	55.6	17.2	38.6	26.6	94.5 <5	12	8.34	627	1.1	436	765	184	



SAMPLE	In	Re	Sb	Se	Te	Tl	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn
ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX	ME-4ACDX
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	0.038	<0.001	<0.05	0.3	0.01	0.04	<0.5	<0.5	14	6	20	<1	1	69	15	99
2	0.062	<0.001	<0.05	0.8	0.04	0.26	<0.5	<0.5	44	56	10	<1	35	35	16	135
3	0.059	<0.001	0.05	1.3	0.11	<0.02	0.9	0.5	29	44	<10	<1	6	40	48	92
4	0.069	<0.001	<0.05	3.1	0.27	<0.02	2.5	0.5	27	51	10	<1	1	19	234	94
5	0.028	<0.001	<0.05	0.2	0.04	0.03	<0.5	<0.5	15	14	10	<1	39	10	8	57
6	0.039	<0.001	<0.05	0.3	0.02	0.21	<0.5	<0.5	22	16	20	<1	67	11	17	99
7	0.032	<0.001	<0.05	0.3	0.02	0.12	<0.5	<0.5	24	30	10	<1	77	8	23	109
8	0.047	<0.001	<0.05	2.8	0.06	0.08	0.5	<0.5	14	24	10	<1	34	13	8	56
9	0.066	0.002	<0.05	2.6	0.09	0.03	1	0.7	6	6	10	<1	39	30	92	83
10	0.024	<0.001	<0.05	1.2	0.08	0.03	0.7	0.8	41	94	<10		2	50	50	119
11	0.056	0.001	0.07	2.4	0.09	0.12	0.8	<0.5	50	201	<10	1	71	32	10	105
12	0.038	<0.001	<0.05	0.5	0.05	0.11	0.5	<0.5	49	55	10	<1	118	7	19	139
13	0.085	<0.001	<0.05	4.3	0.15	0.02	0.7	<0.5	9	9	<10		5	3	19	45
14	0.055	0.001	<0.05	3.2	0.06	0.12	0.7	<0.5	21	27	<10	<1	65	44	13	100
15	0.079	<0.001	<0.05	3.1	0.06	0.12	0.8	<0.5	21	27	<10		54	30	13	95
16	0.093	<0.001	0.06	3.5	0.54	<0.02	1.1	<0.5	18	22	10	<1	64	33	10	78
17	0.057	<0.001	<0.05	2.5	0.09	0.12	0.8	<0.5	14	16	<10	<1	40	16	10	92
18	0.057	<0.001	<0.05	2.9	0.07	0.09	0.5	<0.5	15	23	<10	<1	41	15	11	76
19	0.076	0.001	<0.05	3.7	0.05	0.04	0.7	<0.5	12	9	<10	<1	<1	13	13	66
20	0.051	<0.001	<0.05	0.4	0.04	0.03	<0.5	<0.5	10	78	<10	<1	7	3	3	36
21	0.096	<0.001	0.05	0.7	0.2	0.03	0.5	<0.5	73	126	40	<1	315	10	32	141
22	0.124	<0.001	<0.05	1.1	0.05	<0.02	0.6	<0.5	51	40	40	<1	2	22	19	178
23	0.046	0.001	<0.05	0.6	0.04	0.05	0.5	<0.5	34	44	20		95	20	19	99
24	0.028	<0.001	<0.05	0.4	0.03	0.08	0.5	<0.5	84	305	10	<1	230	4	36	114
25	0.098	<0.001	<0.05	2	0.03	0.03	0.7	<0.5	33	56	<10	<1	56	14	12	115
26	0.046	0.001	<0.05	0.8	0.03	0.02	0.6	<0.5	49	95	<10	<1	198	17	15	131
27	0.131	0.001	<0.05	0.9	0.02	0.23	<0.5	<0.5	46	84	30	<1	203	12	21	198
28	0.058	<0.001	<0.05	3	0.08	<0.02	0.8	<0.5	7	12	<10	<1	<1	17	6	25
29	0.044	<0.001	<0.05	4.2	0.02	0.05	<0.5	<0.5	18	19	10	<1	4	11	6	110
30	0.074	0.001	<0.05	3.4	0.09	0.08	0.8	<0.5	16	16	<10		8	38	10	81
31	0.069	<0.001	0.06	2.7	0.05	0.19	0.6	<0.5	36	25	10	<1	125	50	18	190
32	0.036	0.001	0.06	1.1	0.1	0.51	0.8		89	72	30		356	143	22	334
33	0.051	<0.001	<0.05	3.7	0.03	0.07	<0.5	<0.5	22	29	10	1	50	22	9	96
34	0.045	0.001	<0.05	3.4	0.05	0.15	<0.5	<0.5	27	37	10	1	121	40	15	133
35	0.029	<0.001	<0.05	0.6	0.03	0.17	<0.5	<0.5	52	56	10	1	207	3	18	168
36	0.051	0.003	0.05	2.4	0.13	0.03	1.3	<0.5	108	248	<10		3	118	18	99
37	0.08	0.001	<0.05	3.7	0.08	0.02	0.5	0.7	22	25	10	1	85	25	13	93
38	0.064	0.001	<0.05	3	0.02	0.1	0.6	0.5	26	31	<10	<1	76	33	12	85
39	0.05	<0.001	<0.05	0.3	0.01	0.27	<0.5	0.6	37	14	10		160	16	18	167
40	0.086	0.001	<0.05	3	0.07	0.05	0.5	1.2	24	51	20	<1	102	162	23	138
41	0.057	0.001	<0.05	2.6	0.05	0.11	0.6	<0.5	29	31	10	<1	93	55	15	80
42	0.043	0.001	<0.05	0.6	0.02	0.04	<0.5	<0.5	11	3	10		8	22	3	112
43	0.345	0.001	0.07	6.6	0.41	0.14	0.7	1.8	44	56	10	3	131	260	47	267

SAMPLE DESCRIPTION	ME-ICP06 SiO2 %	ME-ICP06 Al2O3 %	ME-ICP06 Fe2O3 %	ME-ICP06 CaO %	ME-ICP06 MgO %	ME-ICP06 Na2O %	ME-ICP06 K2O %	ME-ICP06 Cr2O3 %	ME-ICP06 TiO2 %	ME-ICP06 MnO %	ME-ICP06 P2O5 %	ME-ICP06 SiO %	ME-ICP06 BaO %	OA-GRA05 LOI %	TOT-ICP06 Total %	C-IR07 C %	S-IR08 S %
44	21,8	7,36	19,7	18,05	3,37	0,46	0,13	0,01	0,72	0,76	14,4	0,31	0,32	10,8	98,19	0,43	0,02
45	33	8,74	11,05	16,7	6,51	3,03	2,48	0,026	2,75	0,24	1,17	1,19	1,69	11,15	99,73	2,94	1,25
46	33	7,61	16,8	14,85	9,76	0,6	4,64	0,061	5,06	0,34	1,29	0,17	0,22	7,02	101,42	1,86	1,16
47	33,6	6,27	20,1	14,15	10,2	0,49	3,65	0,01	5,09	0,19	0,23	0,11	0,23	6,84	101,16	1,73	0,67
48	45	9,41	9,36	14,45	5,74	4,8	0,32	<0,002	3,27	0,18	1,92	0,21	0,01	5,58	100,25	1,4	0,94
49	25,8	6,87	12,8	21,9	8,57	1,42	3,33	0,012	2,6	0,24	4,27	0,34	0,11	12,55	100,81	3,27	0,48
50	2,8	0,25	7,16	31	14,2	0,09	0,12	0,002	0,19	0,48	4,94	0,63	0,16	36,3	98,32	9,94	0,4
51	5,44	0,25	8,79	27,2	14,8	0,41	0,06	0,015	0,27	0,47	1,67	0,64	0,12	36,8	96,94	10,2	0,43
52	13,9	2,43	9,07	31	8,98	0,26	1,93	0,041	1,6	0,24	3,01	0,49	0,1	23,8	96,85	6,45	0,64
53	26,6	4,35	11,4	23,3	8,84	0,87	2,54	0,011	2,75	0,25	2,97	0,32	0,17	13,8	98,17	3,65	0,38
54	16,5	4,07	12,35	17,65	10,6	0,08	2,57	0,018	2,52	0,32	3,45	1,84	5,92	15,55	93,44	4,06	1,88
55	49,7	15,05	6,7	6,47	3	5,45	3,92	0,006	2,01	0,13	0,88	0,14	0,37	6,02	99,85	1,18	0,11
56	22	7,17	20	18,25	3,65	0,52	0,13	0,01	0,71	0,75	14,2	0,31	0,3	10,85	98,85	0,46	0,03
57	3,5	0,33	1,09	49,9	0,56	0,21	0,03	0,002	1,16	0,1	35,2	0,69	0,69	3,26	96,72	0,69	0,16
58	3,41	0,34	1,12	49,5	0,54	0,34	0,05	0,004	1,13	0,11	35,4	0,67	0,71	3,17	96,49	0,68	0,16
59	10,85	1,64	5,34	36,1	8,3	0,33	0,7	0,01	0,75	0,35	1,08	0,65	0,35	33,2	99,65	8,89	0,51
60	10,95	1,67	4,99	35,2	8,38	0,23	0,69	0,009	0,77	0,35	1,11	0,66	0,35	33,1	98,46	8,88	0,5
61	3,14	0,37	1,85	48,3	2,41	0,24	0,13	0,002	0,07	0,07	33,7	1,29	0,68	4,54	96,79	1,32	1,05
62	3,06	0,37	1,87	47	2,42	0,23	0,13	<0,002	0,07	0,07	32,9	1,27	0,68	4,52	94,59	1,36	1,08

SAMPLE	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
DESCRIPC	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd		
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
44	2680	1440	100	0,56	57,2	17,65	38,4	27,9	95,1	<5	11	8,39	627	1,13	396	796		
45 >10000	371	190	1,36	10,55	4,18	6,36	18	15,2	<5	5,3	1,72	184	0,32	181,5	156			
46	1800	342	450	4,1	15,25	5,06	9,2	22,7	22,1	<5	14,4	2,3	134	0,4	236	185		
47	1790	39,9	100	3,72	2,8	1,06	1,54	22,3	4,01	<5	6	0,46	16,9	0,07	19,1	25,2		
48	114,5	343	40	0,19	13,7	4,63	8,6	19,8	22,1	<5	20,8	2,07	128,5	0,41	185,5	187		
49	911	484	120	1,92	22,5	8,09	13,35	21,1	33,2	<5	11,7	3,48	213	0,53	198,5	252		
50	1425	528	50	0,09	17,95	4,7	12,4	4,8	29,8	<5	0,3	2,34	218	0,21	177	278		
51	1105	581	150	0,04	8,33	2,32	8,38	6	17,2	<5	0,6	1,21	277	0,17	273	255		
52	930	736	350	1,19	23	7,01	16,3	14,1	37,9	<5	5,6	3,33	323	0,45	549	359		
53	1520	569	120	1,72	19,15	5,75	13,55	15,3	31,8	<5	9,6	2,81	235	0,44	289	294		
54 >10000	3760	160	2,01	23,1	5,99	22,9	25,7	45,5	<5	7,7	3,14	2590	0,37	2010	1075			
55	3330	239	80	0,71	7,48	2,88	5,28	19,6	11	<5	6,6	1,2	114	0,26	138,5	108,5		
56	2650	1510	110	0,6	57,8	17,55	39,5	27,7	96,1	<5	12,9	8,49	651	1,08	420	811		
57	5980	3400	40	0,05	118,5	32,3	86,9	20,4	214	<5	35,7	16,45	1535	1,72	312	1895		
58	6390	3680	50	0,04	120,5	32,6	92,1	20,5	223	<5	35,8	16,55	1655	1,63	309	2010		
59	2980	465	100	0,57	15,85	5,5	11,1	8,6	25,3	<5	4,5	2,46	208	0,36	387	227		
60	3080	476	100	0,6	15,95	5,17	11,1	8,5	24,5	<5	4,3	2,41	213	0,37	368	236		
61	5960	2870	50	0,12	105,5	26	81,6	17,5	196,5	<5	4,2	13,7	1250	1,05	36,5	1675		
62	5960	2830	40	0,13	106,5	26,4	79,6	17,4	199,5	<5	4,2	14,2	1225	1,02	37,5	1640		





SAMPLE	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-MS42	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD	ME-4ACD
DESCRIPTION	Sb ppm	Se ppm	Te ppm	Tl ppm	Ag ppm	Cd ppm	Co ppm	Cu ppm	Li ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sc ppm	Zn ppm		
44	0,07	<0.2		0,45	0,14	<0.5	0,9	52	57	20	4	125	295	48	266	
45	<0.05	0,5	0,06	0,15		0,6	<0.5	33	68	20	11	90	83	16	127	
46	0,05	0,7	0,06	0,62	<0.5	<0.5		67	148	30	1	170	28	15	176	
47	<0.05	0,9	0,23	0,7		1,6	<0.5	99	870	20	2	338	33	53	131	
48	<0.05	0,6	0,06	0,03	<0.5	<0.5		19	209	<10	2	28	13	9	75	
49	<0.05	0,3	0,06	0,17	<0.5	<0.5		34	43	20	2	40	27	12	113	
50	<0.05	0,5	0,04	0,02		0,5	<0.5	10	10	<10	1	12	46	23	49	
51	<0.05	0,2	0,12	<0.02		0,7	0,5	24	12	<10	22	41	102	49	60	
52	<0.05	0,4	0,06	0,17		0,6	<0.5	32	38	10	1	127	19	18	126	
53	<0.05	0,4	0,05	0,18	<0.5	<0.5		35	60	10	2	65	31	20	103	
54	<0.05	0,3	0,04	0,23		0,8	<0.5	40	55	20	3	87	26	30	149	
55	<0.05	0,2	0,01	0,08	<0.5	<0.5		18	86	10	1	23	16	6	77	
56	0,11	<0.2	0,5	0,13	<0.5		0,8	49	57	20	4	118	261	46	259	
57	<0.05	0,4	0,08	0,02	<0.5		0,6	3	7	<10	3	17	82	11	16	
58	<0.05	0,5	0,08	0,02	<0.5		0,5	2	6	<10	4	17	82	11	17	
59	<0.05	0,2	0,09	0,08	<0.5	<0.5		23	22	10	17	44	53	16	74	
60	<0.05	0,5	0,09	0,07	<0.5	<0.5		18	23	10	14	45	48	16	75	
61	0,05	0,2	0,32	0,03	<0.5		0,7	16	61	<10	175	32	419	2	59	
62	<0.05	<0.2	0,29	0,02	<0.5		0,6	14	63	<10	196	31	426	3	63	