

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**MINERALOGIA E CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS ROCHAS
ALCALINAS ASSOCIADAS AOS DEPÓSITOS SUPERGÊNICOS DE ELEMENTOS
TERRAS RARAS (ETR) CAPÃO DO MEL E SOBERBO – COMPLEXO ALCALINO
DE POÇOS DE CALDAS, MG**

Victor Hugo Martins Cruz

Prof. Dr. Rodrigo Prudente de Melo

Me. Wagner Hansted Pocay

Rio Claro (SP)

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VICTOR HUGO MARTINS CRUZ

MINERALOGIA E CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS
ROCHAS ALCALINAS ASSOCIADAS AOS DEPÓSITOS
SUPERGÊNICOS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR)
CAPÃO DO MEL E SOBERBO – COMPLEXO ALCALINO DE
POÇOS DE CALDAS, MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP
2024

C957m Cruz, Victor Hugo Martins
Mineralogia e caracterização petrográfica das rochas alcalinas associadas aos depósitos supergênicos de Elementos Terras Raras (ETR) Capão do Mel e Soberbo – Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG / Victor Hugo Martins Cruz. -- Rio Claro, 2024
104 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Rodrigo Prudente de Melo
Coorientador: Wagner Hansted Pocay

1. Geologia. 2. Mineralogia e Petrografia. 3. Complexo Alcalino de Poços de Caldas. 4. Elementos Terras Raras. I. Título.

Victor Hugo Martins Cruz

MINERALOGIA E CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS
ROCHAS ALCALINAS ASSOCIADAS AOS DEPÓSITOS
SUPERGÊNICOS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR)
CAPÃO DO MEL E SOBERBO – COMPLEXO ALCALINO DE
POÇOS DE CALDAS, MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora
Rodrigo Prudente de Melo(orientador)
Washington Barbosa Leite Junior
Vinicius Gomes Rodrigues

Rio Claro, 19 de novembro de 2024.

Victor Hugo Martins Cruz

Assinatura do aluno

Rodrigo Prudente de Melo

Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao apoio do meu pai Hugo Souza Cruz, da minha mãe Andrea Martins e de todos os meus familiares, dos meus amigos e companheiros da republica Noea e das pessoas que me ajudaram em diversos momentos durante a graduação, em momentos difíceis percebemos o carinho e apoio que nos é dado.

Gostaria de agradecer também o apoio da Meteoric Resources e a Agência para Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral (ADIMB) que possibilitaram e financiaram a pesquisa para realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer também a minha namorada Marina Tiemi que além de me entender e me apoiar durante a realização desse trabalho me mostrou que o amor pode ser leve, descomplicado e fácil de se obter quando se tem a pessoa certa.

RESUMO

Trabalhos recentes de exploração no Complexo Alcalino de Poços de Caldas resultaram na descoberta de uma série de depósitos supergênicos de Elementos Terras Raras (ETR) classificados como do tipo *Ion-Adsorbed Ionic Clay*. Com recurso de 709Mt apresentando 2,500~6,000ppm de TREO com o teor de *cut-off* de 1,000ppm, o Sistema Caldeira tem sido apontado como o maior depósito de ETR do país, em termos de metal contido. e é caracterizado conter principalmente ETR pesados, cada vez mais utilizado na indústria de tecnologia devido as mudanças nas matrizes energéticas para fontes mais limpas de energia. Os modelos genéticos atuais sugerem que este tipo de depósito está associado ao intemperismo de granitos altamente diferenciados em climas tropicais úmidos, em que minerais portadores de ETR na rocha são destruídos durante o intemperismo liberando íons de ETR que se adsorvem nas argilas do perfil saprolítico. O Sistema Caldeira se difere da maioria dos depósitos *Ionic Clay* mundialmente conhecidos por ter se formado a partir do intemperismo de rochas peralcalinas miasquíticas/agpaíticas. No CAPC as rochas parentais são fonolitos peralcalinos, nefelina sienitos e raras básicas e ultrabásicas como leucita basanitos, basanitos, basaltos e lamprófiros. Além disso os teores médios de ETR do sistema caldeira são bem maiores que os teores dos depósitos formados pelo intemperismo de granitos. Acredita-se que a concentração e o tipo de minerais portadores de ETR da rocha tenha forte influência no controle e teor da mineralização. Entretanto pouco se sabe sobre os minerais portadores de ETR dessas rochas. Portanto essa proposta visa estudar dois dos depósitos do Sistema Caldeira (Capão do Mel e Soberbo) com o objetivo de compreender a mineralogia das rochas parentais dos depósitos, com foco nos minerais portadores de ETR. O trabalho focou na petrografia e mineralogia das rochas. Os minerais primários portadores de ETR identificados nas rochas foram a titanita, apatita e o zircão, além disso foram identificados que as alterações desses minerais por fluidos hidrotermais geraram minerais secundários enriquecidos em ETR, sendo principalmente a rinkita e a röntgenita os minerais secundários, porém a presença de outros minerais não é descartada.

Palavras-chave: ETR; Complexo Alcalino de Poços de Caldas; Nefelina Sienito; Petrografia.

ABSTRACT

Recent exploration work in the Poços de Caldas Alkaline Complex has resulted in the discovery of a series of supergene deposits of Rare Earth Elements (REE) classified as Ion-Adsorbed Ionic Clay. With a resource of 709 Mt presenting 2,500–6,000 ppm of TREO with a cut-off content of 1,000 ppm, the Caldeira System has been identified as the largest REE deposit in the country, in terms of contained metal. It is characterized as containing mainly heavy REE, increasingly used in the technology industry due to changes in energy matrices towards cleaner energy sources. Current genetic models suggest that this type of deposit is associated with the weathering of highly differentiated granites in humid tropical climates, in which REE-bearing minerals in the rock are destroyed during weathering releasing REE ions that adsorb on the clays of the saprolite profile. The Caldeira System differs from most of the world's known Ionic Clay deposits in that it was formed by the weathering of peralkaline miaskitic/agpaitic rocks. In the CAPC, the parent rocks are peralkaline phonolites, nepheline syenites, and rare basic and ultrabasic rocks such as leucite, basanites, basanites, basalts, and lamprophyres. In addition, the average REE contents of the Caldeira System are much higher than those of deposits formed by the weathering of granites. It is believed that the concentration and type of REE-bearing minerals in the rock have a strong influence on the control and content of mineralization. However, little is known about the REE-bearing minerals in these rocks. Therefore, this proposal aims to study two of the Caldeira System deposits (Capão do Mel and Soberbo) with the objective of understanding the mineralogy of the parent rocks of the deposits, with a focus on the REE-bearing minerals. The work focused on the petrography and mineralogy of the rocks. The primary minerals carrying REE identified in the rocks were titanite, apatite and zircon. Furthermore, it was identified that the alterations of these minerals by hydrothermal fluids generated secondary minerals enriched in REE, with rinkite and röntgenite being the main secondary minerals, although the presence of other minerals is not ruled out.

Keywords: REE; Alkaline Complex of Poços de Caldas; Nepheline Syenites; Petrography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudo, apresentando as principais cidades e rodovias para o acesso à área.....	15
Figura 2 – Imagem representativa da geologia da Nappe Socorro-Guaxupé....	25
Figura 3 – Províncias alcalinas da porção centro sul da América do Sul e suas relações com grandes estruturas, com destaque para a PMSM.....	17
Figura 4 – Lineamento do arco magmático de Cabo Frio.....	19
Figura 5 - Mapa geológico e de localização das litologias encontradas no CAPC–MG.....	20
Figura 6 – Mapa Radiométrico do Planalto de Poços de Caldas.....	23
Figura 7 – Imagem representando a análise estrutural da rede de drenagem, com dados estruturais.....	24
Figura 8 – Imagem representativa da localização das áreas adquiridas pelo Projeto Caldeira.....	25
Figura 9 – Mapa de localização dos furos do depósito Soberbo.....	26
Figura 10 - Mapa de localização dos furos diamantados do depósito Capão do Mel.....	28
Figura 11 – Diagrama APF (Feldspato Alcalino, Plagioclásio e Foide) com composição mineral estimada para as litologias observadas nos depósitos e diagrama com os minerais específicos dentro dos campos 11 e 15 (Streckeisen, 1976).....	32
Figura 12 - Mapa geológico da região dos depósitos Capão do Mel e Soberbo executado pelo time de Exploração da Meteoric Resources.....	33
Figura 13 - Mapa geológico da região dos depósitos Capão do Mel e Soberbo executado pelo time de Exploração da Meteoric Resources.....	34
Figura 14 – Amostras de mão coletadas dos furos de sondagem do depósito Capão do Mel.....	38
Figura 15– Imagens representativas dos feldspatos encontrados no depósito Capão do Mel. A) Foto de feldspatos a nicóis descruzados, com a presença de nefelina, opacos e carbonatos; B) Foto no mesmo local com nicóis cruzados; C) Foto de detalhe das inclusões de carbonato e opacos dentro de ripas de feldspato; D) Foto da mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....	40

Figura 16 – Imagens representativas das nefelinas encontradas no depósito Capão do Mel. A) Grande cristal de nefelina apresentando inclusões e aparentemente fraturas no seu interior a nicóis descruzados; B) Mesma localidade com nicóis cruzados, no interior da nefelina apresentam acículas de zeólita; C) Cristal de nefelina bem formado com intensa alteração interna de opacos, nicóis descruzados; D) A intensa alteração de opacos também apresenta alteração da nefelina para natrolita, nicóis descruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Ntr, natrolite; Op, opaque mineral.....41

Figura 17 – Imagem representativa da possível argilização. A) Possível argilização entre dois cristais de feldspato, com inclusões de fluorita a nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados, possível presença de albita formando veios no feldspato gerando pertita. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Fl, fluorite; Ill, illite; Kln, kaolinite.....42

Figura 18 – Imagens representativas de cristais de egrinas encontrados no depósito. A) Cristais de egrinas alterando para massa de minerais opacos, possível presença de cristal relíquia de titanita, a nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Cristais de egrina bem formados com “buracos” preenchidos por nefelina/natrolita e alteração para minerais opacos, a nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados; E) Detalhe dos cristais de egrina com inclusões de opacos e de buracos, a nicóis descruzados; F) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, aegirine; Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Ne, nepheline; Ntr, natrolite; Op, opaque mineral; Ttn, titanite.....43

Figura 19 – Imagem representativa de titanitas encontrada nas lâminas. A) Aglomerados de titanitas totalmente alterado para minerais opacos, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Detalhe de alteração incipiente de porções das titanitas para minerais opacos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, aegirine; Afs, alkali feldspar; Ne, nepheline; Op, opaque mineral; Ttn, titanite.....44

Figura 20 – Minerais opacos encontrados nas lâminas. A) Imagem de mineral opaco a nicóis descruzados; B) Imagem de luz refletida da mesma localidade; C) Imagem de mineral opaco próximo ao veio de carbonato com fluorita, nicóis descruzados; D) Imagem de luz refletida da mesma localidade. Abreviações: Afs,

alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....45

Figura 21 – Imagem representativa dos cristais de carbonato encontrados nas lâminas. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviações: Cb, carbonate mineral; Op, opaque mineral.....46

Figura 22 - Imagem representativa da pseudoleucita. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Ne, nepheline; Ntr, natrolite; Op, opaque mineral.....47

Figura 23 – Imagem representativa das fluoritas encontradas no depósito. A) Nicóis descruzados de um feio preenchido por fluoritas roxas com a presença de minerais opacos e ainda uma borda de alteração gerada pela passagem de fluidos; B) Nicóis cruzados da mesma localidade. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Fl, fluorite; Op, opaque mineral.....48

Figura 24 - Amostras de mão coletadas dos furos de sondagem do depósito Soberbo.....51

Figura 25 – Imagem representativa de feldspatos encontrada nas lâminas. A) Imagem a nicóis descruzados de grandes cristais de feldspato e de possivelmente nefelina, além de opacos; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Imagem em detalhe de feldspatos e de possíveis nefelinas, com inclusões de opacos e de fluoritas, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....52

Figura 26 - Imagem representativa de nefelina encontradas nas lâminas do depósito. A) Nefelinas encontradas parcialmente preservadas próximas a veio de feldspato, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Nefelinas preservadas ao redor de um possível cristal de nefelina alterado ou preenchido por minerais opacos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.....53

Figura 27 – Imagem representativa das egirinas encontradas nas lâminas do depósito. A) Aglomerado de egirinas rodeado por feldspatos, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Imagem de uma egirina parcialmente alterada rodeada por feldspatos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade nicóis cruzados; E) Imagem representativa de um cristal de egirina totalmente alterado para mineral

opaco; nicóis descruzados; F) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, aegirine; Afs, alkali feldspar; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....55

Figura 28 – Imagem representativa de titanita encontrada nas lâminas. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis descruzados. Abreviações: Aeg, aegirine; Afs, alkali feldspar; Ne, nepheline; Op, opaque mine ral; Ttn, titanite.....56

Figura 29 – Imagem representativa da possível leucita encontrada nas lâminas do deposito. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviação: Afs, alkali feldspar; Lct, Leucite; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....57

Figura 30 – Imagem representativa dos minerais opacos encontrados nas lâminas. A) Imagem em detalhe de grande mineral opaco, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Detalhe de mineral opaco cubico bem formado em veio de carbonato, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis descruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....58

Figura 31 – Imagem representativa de carbonatos encontrados nas lâminas. A) Imagem de veio de carbonato com possível fluoritas bem formadas, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Veios de carbonato com possíveis cristais de fluorita bem formados, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Op, opaque mineral.....59

Figura 32 – Imagem representativa de um veio de carbonatos com fluoritas e sulfetos. A) Imagem mais ampla do veio onde é possível notar a albitização na borda do veio e a potassificação mais distante; B) Detalhe do veio. Abreviações: Ab, albite; Afs, alkali feldspar; Ank, ankerite; Cb, carbonate mineral; Fl, fluorite; Gn, galena; Str, strontianite.....60

Figura 33 – Imagem de MEV apresentando os dois diferentes argilo minerais encontrados nas lâminas. A) Imagem da localidade; B) Composição estimada coletada por EDS da caulinita; C) Composição estimada coletada por EDS da illita. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Ill, illite; Kln, kaolinite; Ne, nepheline.....61

Figura 34 – Imagem de MEV representativa das alterações para argilo minerais. A) Imagem; B) Composição estimada coletada por EDS da caulinita; C) Composição estimada coletada por EDS da illita; D) Composição estimada coletada por EDS do

óxido de Fe; E) Composição estimada coletada por EDS do óxido de Fe e Ti.
Abreviações: Ill; illite; Kln, kaolinite.....61

Figura 35 – Imagem representativa das bordas de alteração ocorridas nos veios de fluorita.....62

Figura 36 – Imagem representativa dos minerais portadores e de suas alterações. A) Minerais de titanita alterados e concentração ETR; B) Imagem petrográfica da mesma localidade a nicóis descruzados; C) Titanita totalmente alterada apresentando concentração de ETR; D) Imagem petrográfica da mesma localidade a nicóis descruzados; E) Apatita apresentando alteração incipiente; F) Detalhe da concentração de fosfatos com ETR devido a alteração. Abreviações: Aeg, aegirine; Ab, albite; Afs, alkali feldspar; Ap, apatite; Ne, nepheline; Ttn, titanite.....64

Figura 37 – Imagem representativa dos fluorcarbonatos que apresentam ETR em sua composição. A) Imagem demonstrativa do tamanho relativo dos fluorcarbonatos; B) Imagem em detalhe; C) Grande concentração de fluorcarbonatos; D) Mineral grande e bom formado; E) Relação dos fluorcarbonatos com a alteração; F) Detalhe dos fluorcarbonatos. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Flc, fluorcarbonatos; Ill; illite; Kln, kaolinite; Op, opaque mineral.....66

Figura 38 – Imagem do mineral opaco que apresenta teores de ETR. A) Imagem petrográfica a nicóis descruzados do mineral opaco com forma diferenciada; B) Imagem do MEV do mesmo mineral apresentando flúor carbonetos com presença de ETR. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Flc, fluorcarbonatos; Fl, fluorite; Kln, kaolinite; Op, opaque mineral.....67

Figura 39 – Imagem representativa da alteração e implementação de fluorcarbonatos em outros minerais. A) Carbonato apresentando aureola de alteração, nicóis cruzados; B) Imagem de MEV apresentando minerais que contêm ETR; C) Feldspato apresentando aureola de alteração, nicóis cruzados; D) Imagem de MEV dos minerais de alteração que contém ETR. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Cb, carbonate mineral; Flc, fluorcarbonatos.....68

Figura 40 – Imagem representativa dos diferentes minerais portadores de ETR em diagrama ternário do depósito Capão do Mel.....72

Figura 41 – Imagem representativa dos diferentes minerais encontrados e das relações de ETRL e ETRP, do depósito Capão do Mel.....73

Figura 42 – Imagem representativa dos diferentes cristais de fosfato, zircão e fluorcarbonetos que apresentam ETR. Abreviações: Aeg, aegirine; Ab, albite; Ap, apatite; Flc, fluorcarbonatos; Op, opaque mineral; Zrn, zircon.....	74
Figura 43 – Imagem representativa dos diferentes minerais portadores de ETR no deposito Soberbo. Abreviações: Aeg, aegirine; Ab, albite; Afs, alkali feldspar; Ap, apatite; Cb, carbonate mineral; Kln, kaolinite. Op, opaque mineral.....	76
Figura 44 – Imagem representativa dos zircões encontrados nas lâminas do deposito. Abreviações: Ab, albite; Afs, alkali feldspar; Flc, fluorcarbonatos; Kln, kaolinite. Op, opaque mineral; Zrn, zircon.....	78
Figura 45 - Imagem representativa dos diferentes minerais portadores de ETR em diagrama ternário do deposito Soberbo.....	84
Figura 46 - Imagem representativa dos diferentes minerais encontrados e das relações de ETRL e ETRP, do deposito Soberbo.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição modal dos minerais do depósito Capão do Mel.....	35
Tabela 2 – Composição modal dos minerais do depósito Soberbo.....	49
Tabela 3 – Porcentagem dos elementos nos fluorcarbonetos no depósito Capão do Mel.....	68
Tabela 4 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, apatite; Ttn, titanite.....	71
Tabela 5 – Apresentação dos diferentes tipos minerais e da variação dos elementos encontrados no depósito.....	79
Tabela 6 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, apatite; Zrn, zircon.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS

Aeg	<i>Aegirine</i>
Afs	<i>Alkali feldspar</i>
CACP	Complexo Alcalino de Poços de Caldas
Cb	<i>Carbonate mineral</i>
EGMs	<i>Eudialyte Group Minerals</i>
ETR	Elementos Terras Raras
ETRL	Elementos Terras Raras Leves
ETRP	Elementos Terras Raras Pesados
Fl	<i>Fluorite</i>
HFSE	<i>High Field Strench Element</i>
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
LILE	<i>Large Ion Lithophile Elements</i>
Mmc	Massa Micro-cristalina
MEV	Microscopia Eletrônico de Varredura
MTREO	<i>Magnetic Rare Earth Oxides</i>
Ne	<i>Nepheline</i>
NeS	Nefelina Sienito
Ntr	<i>Natrolite</i>
PMSM	Província Magmática da Serra do Mar
Op	<i>Opaque Mineral</i>
TREO	<i>Total Rare Eath Oxide</i>
Ttn	Titanite

SUMÁRIO TABELA

5	RESULTADOS.....	37
5.1	Petrografia – Litotipos estudados.....	37
5.1.1	Capão do Mel.....	37
5.1.1	Tabela 1 – Composição modal dos minerais do depósito Capão do Mel.....	41
5.1.2	Soberbo.....	54
5.1.2	Tabela 2 – Composição modal dos minerais do depósito Soberbo.....	55
5.3	Minerais Portadores de Terras Raras.....	68
5.3.1	Capão do Mel.....	68
5.3.1	Tabela 3 – Porcentagem dos elementos nos fluorcarbonetos no depósito Capão do Mel.....	74
5.3.1	Tabela 4 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, apaptite; Ttn, titanite.....	77
5.3.2	Soberbo.....	79
5.3.2	Tabela 5 – Apresentação dos diferentes tipos minerais e da variação dos elementos encontrados no depósito.....	85
5.3.2	Tabela 6 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, apaptite; Zrn, zircon.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Fundamentação Teórica	17
1.2	Gênese dos Depósitos de Argila Lônica	17
1.3	Objetivos	20
1.4	Localização e acesso as áreas de estudo	21
2	GEOLOGIA REGIONAL	22
2.1	Nappe Socorro-Guaxupé	22
2.1.1	<i>Magmatismo Alcalino Cretáceo do Sudeste do Brasil</i>	23
2.1.2	<i>Evolução magmática do Complexo Alcalino de Poços de Caldas</i>	25
2.1.3	<i>Complexo Alcalino de Poços de Caldas</i>	26
2.2	Evidências de alteração Hidrotermal Registrada no CAPC	28
2.2.1	<i>Estruturas e passagem de fluidos</i>	29
3	GEOLOGIA DOS DEPOSITOS ESTUDADOS	32
3.1	Soberbo	32
3.2	Capão do Mel	34
4	METODOLOGIA	35
5	RESULTADOS	37
5.1	Petrografia – Litotipos estudados	37
5.1.1	<i>Capão do Mel</i>	37
5.1.1.1	<u>Minerais Essenciais</u>	43
5.1.1.2	<u>Minerais acessório</u>	48
5.1.1.3	<u>Minerais secundários</u>	50
5.1.2	<i>Soberbo</i>	52
5.1.2.1	<u>Minerais Essenciais</u>	55
5.1.2.2	<u>Minerais Acessórios</u>	59
5.1.2.3	<u>Minerais Secundários</u>	61
5.2	Evidências de alteração hidrotermal	63
5.3	Minerais portadores de Terras Raras	65
5.3.1	<i>Capão do Mel</i>	65
5.3.2	<i>Soberbo</i>	76

6	DISCUSSÕES	89
6.1	Papel da alteração hidrotermal.....	89
6.2	Estoques de ETR na rocha parental	90
7	CONCLUSÃO.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Fundamentação Teórica

Grandes depósitos supergênicos de Elementos Terras Raras (ETR) atualmente conhecidos como depósitos de Argilas Lônicas, são depósitos onde os ETR são encontrados principalmente na forma de íons adsorvidos em argilas intempéricas dos perfis regolítico formado a partir do intemperismo de diversos tipos de rocha, (e.g., Sanematsu and Watanabe, 2016) normalmente sendo rochas alcalinas super saturadas, saturadas e insaturadas (e.g., Wang et al., 2024).

Como qualquer outro grande sistema mineralizador, esses depósitos necessitam de uma somatória de fatores para que seja possível a sua existência. Esses fatores incluem, desde de a gênese das rochas parentais ricas em ETR até as condições de intemperismo adequadas para formação do regolito.

1.2 Gênese dos Depósitos de Argila Lônica

No caso dos depósitos hospedados em regolitos gerados pelo intemperismo de rochas magmáticas alcalinas, o primeiro fator é baixa taxa de fusão parcial de regiões enriquecidas no manto e a combinação da diferenciação magmática prolongada durante o período de ascensão e colocação do magma em regiões rasas da crosta (M. A. W. Marks & Markl, 2017; Wang et al., 2024). Esses processos acarretam na geração de minerais primários portadores de ETR e que normalmente são ricos em elementos terras raras leves (ETRL) (Wang et al., 2024).

Posteriormente para que haja o enriquecimento em ETR no perfil regolítico, é necessário que a rocha passe por processos que modifiquem ou destruam os minerais primários portadores de ETR. Nesse caso normalmente há uma combinação de processos hidrotermais que se somam ao intemperismo em condições adequadas e cujo resultado é a geração de concentrações economicamente lavráveis destes elementos em minerais secundários ou adsorvidos nas argilas no perfil regolítico (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012; Linnen et al., 2013).

Os processos hidrotermais são de grande importância na geração de depósitos supergênicos de ETR, pois causam a alteração dos minerais magmáticos, geralmente resistentes ao intemperismo, para minerais secundários menos resistentes como fluorcarbonatos, carbonatos e bicarbonatos, facilmente alterados pelo intemperismo

gerando argilominerais como a caulinita e a montmorilonita, facilitando a destruição da estrutura cristalográfica dos minerais pelo intemperismo e, portanto, facilitando a decomposição e liberação dos íons de ETR (Shi et al., 2024). Importante observar que segundo a literatura, os minerais neoformados durante o processo hidrotermal normalmente são enriquecidos em elementos terras raras pesados (ETRP) (Sanematsu & Watanabe, 2016a) e como resultado indireto desse processo, os depósitos de argila iônicas são as principais fontes de ETRP, que por suas características magnéticas possuem maior valor comercial.

O tipo de fluido é muito importante na geração de minerais hidrotermais de mais fácil decomposição pelos agentes intempéricos. Como reportado por Pan et al. (1993) fluidos ricos em CO_2 , PO_4^{3-} e F_2 de baixa temperatura, podem desestabilizar a titanita (CaTiSiO_5), um dos principais minerais primários portadores de ETR, gerando outros minerais secundários de menor granulação que incluem allanita, monazita, rutilo, calcita, apatita, clorita etc. Após a alteração hidrotermal por fluidos dominantes em flúor e empobrecidos em fosfato, há formação de fluorcarbonatos que são reportados como sendo facilmente degradados durante o intemperismo e um dos principais minerais hidrotermais portadores de ETR secundário nas rochas parentais desses depósitos (Smith et al., 2018).

É preciso ressaltar que processos hidrotermais que afetam as rochas parentais não são reportados em todos os depósitos do tipo Argilas Iônicas, porém, quando ocorrem são favoráveis no processo de formação e enriquecimento do depósito, de forma a facilitar a decomposição dos minerais pelo intemperismo (M. Marks et al., 2003; Sanematsu & Watanabe, 2016a; Wang et al., 2024; Wu et al., 2023).

Com relação ao intemperismo, para que o mesmo produza concentrações econômicas de ETR é preciso alguns fatores: (i) a rocha parental precisa estar localizada em uma região com clima subtropical à tropical; (ii) com temperaturas médias elevadas e; (iii) taxa de precipitação anuais moderadas a altas (Sanematsu & Watanabe, 2016b).

Durante o intemperismo os minerais portadores de ETR (e.g., fluorcarbonatos) são dissolvidos por águas ácidas presentes no solo e no perfil regolítico, acarretando na liberação de íons de ETR que são transportados como ETR^{3+} em solução ou como complexo iônicos, em que os ETR se ligam a complexos húmicos, carbonatados ou bicarbonato. Ao encontrar condições mais alcalinas (pH mais elevado) devido a interação fluido rocha na base do perfil regolítico, os íons tendem a serem adsorvidos

nas superfícies eletricamente carregadas de cristais de argila (e.g., Li et al., 2019; Linnen et al., 2013; Wang et al., 2024).

Shi et al. (2024) reportam a presença de defeitos estruturais nos minerais portadores de ETR como um outro fator importante na formação desses depósitos. Segundo os autores os minerais primários portadores de ETRP tem uma baixa taxa de decomposição intempérica, porém defeitos cristalográficos gerados durante a cristalização são abundantes, variando em escala sub a nanométrica, fazendo com que os minerais precursores sejam mais instáveis as ações intempéricas e ainda agilizando a sua decomposição e liberação dos ETRP, facilitando a formação dos depósitos tipo argilas iônicas.

A grande maioria dos trabalhos têm focado no estudo dos processos de formação de depósitos supergênicos de ETR sobre rochas super saturadas em sílica (granitos) normalmente compostos por feldspato alcalino, plagioclásio, muscovita e quartzo. Entretanto o entendimento sobre os processos geradores dos depósitos de ETR em regolitos gerados sobre rochas alcalinas insaturadas em sílica, compostas majoritariamente de feldspatos e feldspatoides, ainda é pouco compreendido e estudado.

Como descrito acima, os ETR são mobilizados e adsorvidos em argilo minerais, com a variação do litotipo ocorre a geração de diferentes argilominerais, devido a maior ou menor presença de elementos como a sílica e alumínio. No caso de depósitos sobre rocha super saturada os argilominerais mais frequentes encontrados são haloisita e caulinita, porém em depósitos de rocha insaturada em sílica os argilo minerais mais frequentes são illita e haloisita (Wang et al., 2024).

O intemperismo de feldspato alcalino e feldspatoides leva a criação de illita, que tem uma grande capacidade de adsorção e enriquecimento em ETR. Com o avanço do intemperismo a illita se transforma em caulinita e posteriormente para gibbsita, ocorrendo a perda do potencial de adsorção, ocasionando a liberação dos ETR para o perfil regolítico, que são reconcentrados em porções inferiores que ainda apresentam argilominerais capazes de realizar a adsorção.

A presença de quartzo nos perfis regolítico oriundos de granitos e sua ausência nos perfis de rochas insaturadas é outra grande diferença. Se por um lado a maior concentração de quartzo no perfil regolítico de rochas saturadas, aumenta a porosidade e permeabilidade, devido a migração do quartzo para as porções superiores do perfil, assim ampliando a intensidade da destruição da rocha parental e

consequentemente liberando maiores concentrações de ETR (Huang et al., 2021; Wang et al., 2024), por outro lado a geração de uma crosta rica em quartzo (40 a 60% de quartzo) (Wang et al., 2024) tende a inibir o avanço dos processos intempéricos e portanto diminuir as taxas de adsorção dos ETR pelas argilas. Em rochas insaturadas os feldspatoides e feldspatos alcalinos são alterados para argilominerais com grande potencial de adsorção, entretanto, a inexistência de quartzo reduz a porosidade do solo resultando em uma maior dificuldade de circulação da água e consequentemente em uma menor taxa de destruição da rocha parental, diminuindo o aporte de ETR para o perfil regolítico (Wang et al., 2024).

Trabalhos recentes de exploração realizados no Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC) resultaram na descoberta de depósitos supergênicos de ETR hospedados no regolito de rochas alcalinas (principalmente sienito e fonólito) do complexo. Os recursos globais dos depósitos encontrados no complexo são da ordem de 709Mt apresentando 2,500~6,000ppm de TREO com o teor de *cut-off* de 1,000ppm, o que configura uma das maiores reservas de ETR do país e provavelmente a maior do mundo em rochas alcalinas.

Apesar da importância econômica, pouco se sabe sobre os fatores primários e secundários que contribuíram para o enriquecimento em ETR e formação de concentrações econômicas desses metais a partir das rochas alcalinas no CAPC. Não se sabe com precisão quais minerais ígneos são os portadores de ETR nas diferentes rochas do complexo e também ainda não há nenhum tipo de estudo que investigue os possíveis efeitos da alteração hidrotermal na transformação de minerais ígneos portadores de ETR nas rochas parentais do depósito e sua possível contribuição na geração de minerais mais susceptíveis ao intemperismo.

1.3 Objetivos

Dentro desse contexto, esse trabalho estudou os controles primários da mineralização de ETR de dois depósitos do Sistema Caldeira, o depósito Soberbo e o Depósito Capão do Mel, localizados na porção sudeste do CAPC, de direito de lavra pertencente a empresa Meteoric Resources.

O trabalho consistiu na seleção e descrição de furos de sondagem dos depósitos Soberbo e Capão do Mel de onde foram coletadas amostras para análise petrográfica, análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análises de Microsonda Eletrônica. Também foram utilizados dados de análises químicas de rocha total para

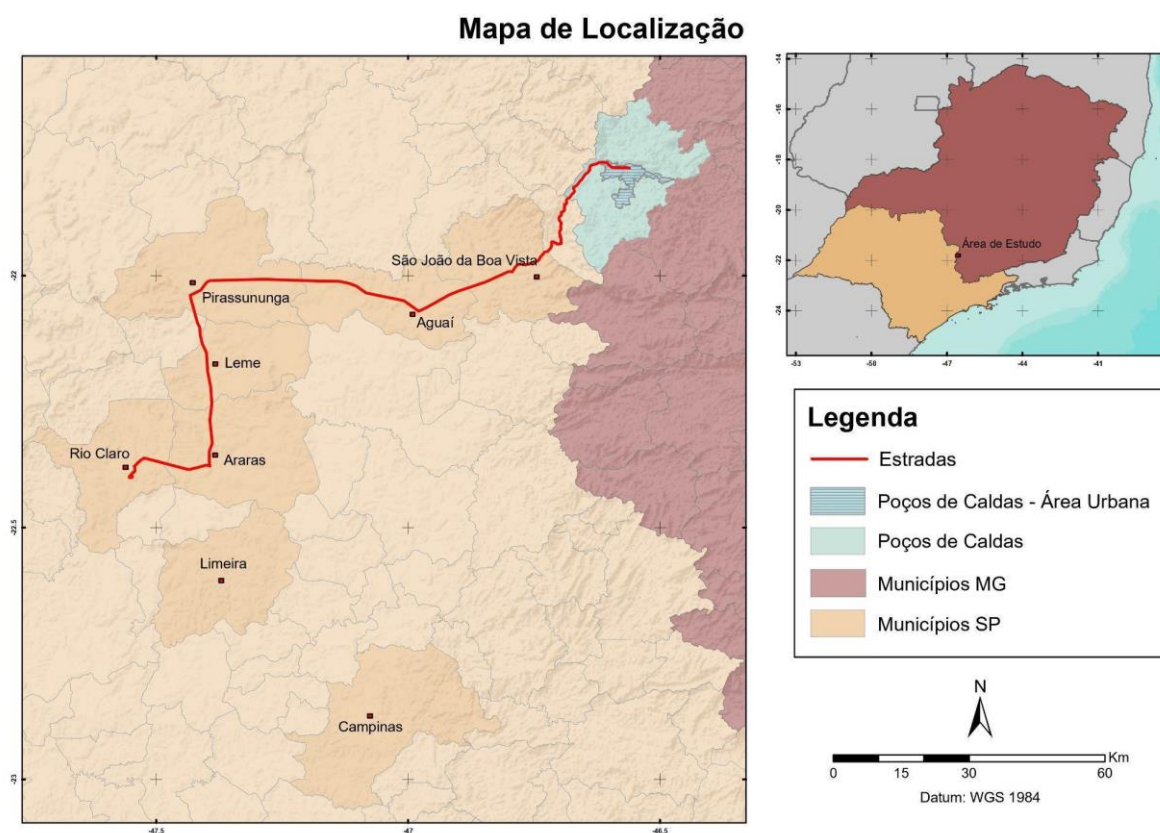
fazer a correlação entre diferentes assembleias minerais portadoras de ETR com teores primários de ETR na rocha, bem como os teores do perfil saprolítico desenvolvido sobre esses litotipos.

1.4 Localização e acesso as áreas de estudo

As áreas estudadas estão localizadas a sudeste do CAPC, há cerca de 160km da cidade de Rio Claro (Figura 1). As áreas compreendem os depósitos Capão do Mel e Soberbo (Figura 4). O tamanho total das áreas é de 12.3km², sendo o depósito Soberbo o maior com 7.7 km² e o Capão do Mel com 4.6 km².

Saindo de Rio Claro, é possível acessar a região através das seguintes rodovias: SP-191 rumo a Araras; SP-050 até Pirassununga; SP-225 até Aguaí; SP-344 em direção a São João da Boa Vista; SP-342 e BR-267 até Poços de Caldas; e, por último, continuando pela BR-146 em direção a Andradas, por cerca de 28 km.

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de estudo, apresentando as principais cidades e rodovias para o acesso à área.



2 GEOLOGIA REGIONAL

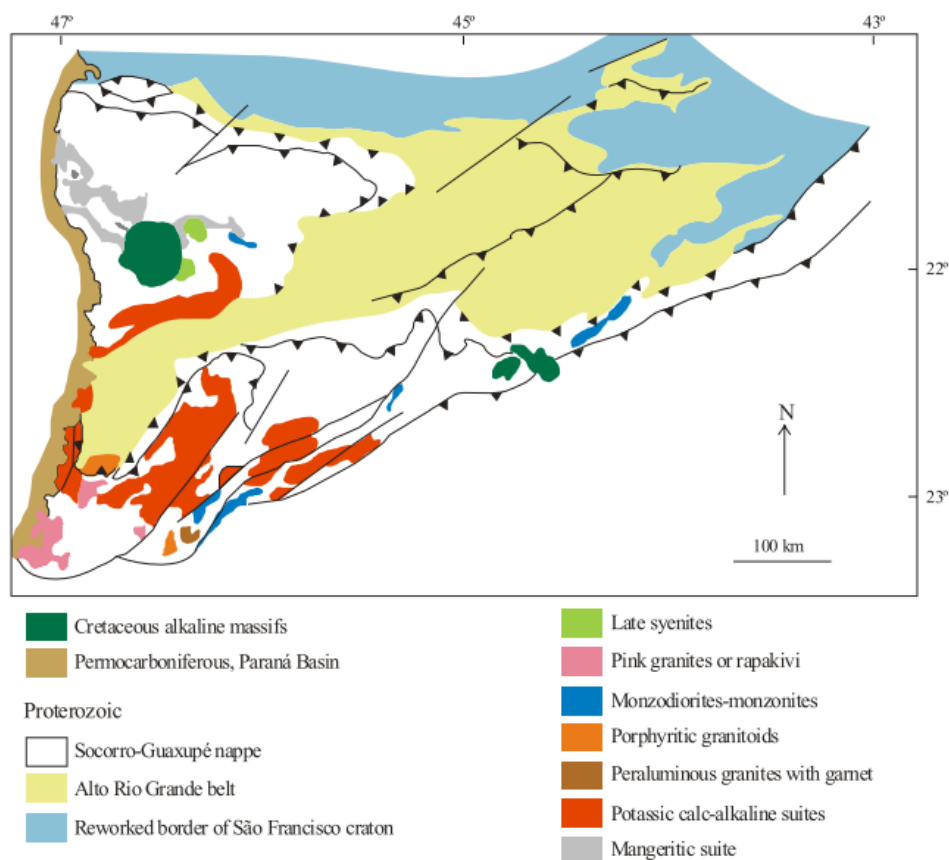
2.1 Nappe Socorro-Guaxupé

A Nappe Socorro Guaxupé (NSG) está localizada no sul da Faixa Brasília e compreende um ambiente de arco magmático, que é uma porção espessa da crosta continental inferior à média que foi fundida parcialmente. É dividida em três principais unidades: uma granulítica inferior, uma diatexítica intermediária e uma metatexítica superior. A nappe apresenta rochas com grau metamórfico elevado e o pico do metamorfismo foi a ~625Ma, que ocasionou a formação de grandes volumes de rocha diatexítica com alto potássio (Salazar Mora et al., 2014a). Geograficamente as rochas da Nappe estão expostas em dois segmentos: (i) Complexo Socorro, ao Sul, e; (ii) Complexo Guaxupé (onde está intrudido o CAPC) ao norte, como pode ser observado na figura 2 (e.g., Melo & Oliveira, 2013). Esses segmentos são separados por rochas mais antigas que incluem ortognaisse e migmatito riaciano que compreendem o embasamento da Nappe. As rochas da Nappe Socorro-Guaxupé são predominantemente granito, charnockito e gnaisse de alto grau metamórfico (M. D. C. Campos Neto & Caby, 1999; Ulbrich et al., 2005; Salazar Mora et al., 2014).

No entorno do complexo alcalino as rochas encaixantes do maciço incluem majoritariamente granito e gnaisse com xistosidade e mergulho variáveis (Ellert, 1959; C. de B. Gomes et al., 2023; Guarino et al., 2021; Schorscher & Shea, 1992; Vlach et al., 2018). O gnaisse apresenta porções fenitizadas (processos metasomático de alteração das rochas encaixantes em rochas alcalinas) e é intrudido por diques e sills de rochas alcalinas cortando as estruturas (C. de B. Gomes et al., 2023; Guarino et al., 2021;).

O bloco alóctone da nappe é delimitado ao N e NE pela zona de cisalhamento Nova Resende – Barbacena, que limita a nappe com o Cratón do São Francisco. A o S e SE é separado pela zona de cisalhamento Carandaí – Mogi Guaçu, separando o bloco tectônico de Jundiá (F. F. M. Almeida, 1983; Artur et al., 1988; Gardar, 1990).

Figura 2 – Imagem representativa da geologia da Nappe Socorro-Guaxupé.



Retirado de Ulbrich et al., (2005) e modificado de Haddad (1995).

2.1.1 Magmatismo Alcalino Cretáceo do Sudeste do Brasil

O magmatismo alcalino ocorrido no final do período Cretáceo (~91-78 Ma) no sudeste do Brasil durou até o começo do Eoceno (~80-55 Ma) e é caracterizado por intrusões no setor norte da Província Magmática da Serra do Mar (PMSM), ao longo do lineamento de Cabo Frio (Figura 2), marcado por vários corpos intrusivos de rochas alcalinas (Guarino et al., 2019, 2021; Melluso et al., 2017; Thompson et al., 1998). Essas intrusões apresentam maior afinidade sódica e de forma esporádica afinidade potássica a ultrapotássica (C. B. Gomes et al., 2011; C. de B. Gomes et al., 2023; Guarino et al., 2019).

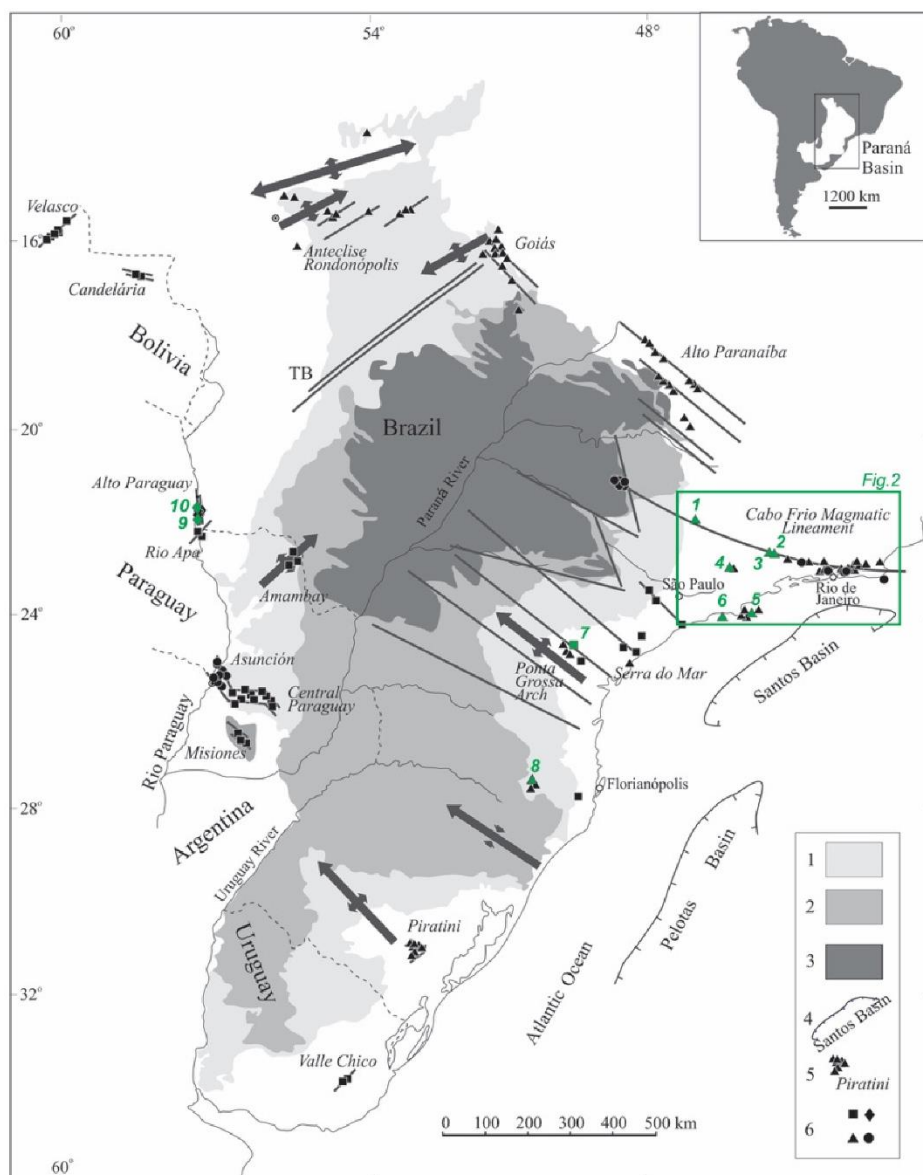
Intrusões alcalinas cretáceas não estão restritas somente no PMSM. No sul do Brasil, no Arco de Ponta Grossa (APG), no Paraguai e também no Uruguai, há registros de eventos mais antigos do começo do cretáceo (~130 Ma). Na figura 3 é

possível observar as ocorrências alcalinas na porção centro sul da América do Sul. (C. B. Gomes et al., 2011; C. de B. Gomes et al., 2021; Lustrino et al., 2005; Morbidelli Al et al., 1995).

Segundo Almeida (1983) o magmatismo alcalino meridional da plataforma Sul-Americana foi causado pela reativação de antigas estruturas, como zonas de cisalhamento e falhas, foi então chamada de reativação Wealdeniana. Esse evento de intenso tectonismos causou a reativação de antigos falhamentos, surgimento de novos blocos de falhas, soerguimento de arcos, abatimento de bacias costeiras e ocasionando a subsidência da Bacia Bauru (Fernandes, 1998). A reativação Wealdeniana é considerada a causadora do rompimento do supercontinente Gondwana e abertura do Atlântico Sul (F. F. M. Almeida, 1983; Carneiro et al., 2012). Associado aos eventos de reativação ocorreram inúmeros eventos de intrusões de magmas básicos e algumas ocorrências de magma alcalino durante o Jurássico até o Cretáceo inferior, sendo que o maior aporte de magma alcalino foi durante o Cretáceo superior, ocasionando a geração de inúmeras intrusões de rochas alcalinas na crosta.

O magmatismo alcalino de Poços de Caldas faz parte de uma intrusão de “*hot spot*” que proporcionou a implementação das rochas alcalinas na crosta e devido a sua movimentação tectônica gerou os lineamentos de extrusões de rochas alcalinas como o Lineamento de Cabo Frio (Figura 4).

Figura 3 – Províncias alcalinas da porção centro sul da América do Sul e suas relações com grandes estruturas, com destaque para a PMSM.



Retirado de C. de B. Gomes et al., (2021).

2.1.2 Evolução magmática do Complexo Alcalino de Poços de Caldas

Segundo Ellert (1959) o magmatismo alcalino iniciou-se com um processo de soerguimento escalonado de blocos do embasamento cristalino. A atividade vulcânica teve início concomitantemente ao soerguimento apresentando alternâncias de fases explosivas e efusivas, gerando brechas e tufos, intercalados com derrames de lavas básicas. Brechas e lavas são encontradas por quase toda a porção interna da caldeira (R. F. Almeida & Paradella, 1976; Ellert, 1959; Gardar, 1990; C. de B. Gomes et al., 2023; H. H. Ulbrich et al., 2005; H. H. G. J. Ulbrich, 1984; Vlach et al., 2018).

Posteriormente a colocação dos magmas básicos no sul do complexo ocorreu a inserção de derrames de lava fonolítica.

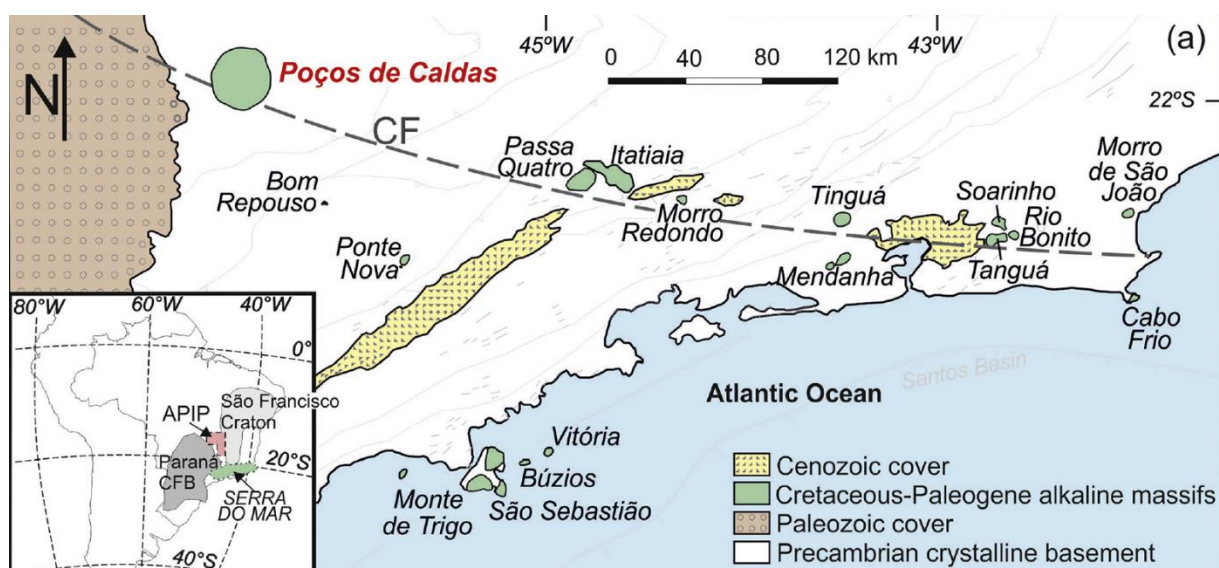
Com a diminuição e posterior encerramento das atividades vulcânicas, a porção central da caldeira colapsou, causando a ascensão do magma nefelínico ao longo de fendas circulares e radiais, nas porções periféricas do complexo. Entretanto na porção central estas feições estruturais não são encontradas para condicionar a forma geométrica das intrusões (Gardar, 1990; H. H. G. J. Ulbrich, 1984).

Segundo Alves (2003), o colapso do edifício vulcânico principal deu início a nova etapa do CAPC, com a formação de diques anelares, a geração de novos corpos intrusivos de nefelina sienito, a geração de brechas intrusivas e piroclásticas, assim como os diques e coberturas fonolítica associadas. A colocação dos diques gerou abatimento e basculamento localizado, com soerguimento próximo ao dique anelar e rebaixamento nas áreas centrais do complexo, além dos derrames de lava fonolítica nas áreas centrais abatidas (Alves, 2003; Ellert, 1959; H. H. G. J. Ulbrich, 1984).

2.1.3 Complexo Alcalino de Poços de Caldas

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC) está localizado nos municípios de Poços de Caldas, Caldas e Águas da Prata. É o maior Complexo Alcalino da América do Sul e o segundo maior do mundo. Está situado no extremo oeste, do lineamento magmático de Cabo Frio (Ferroni et al., 2018; Guarino et al., 2021) (Figura 4), noroeste do setor potássico-ultrapotássico da Província Mágica da Serra do Mar (PMSM) (Figura 2). A idade do complexo é datada de ~78 Ma, fim do período Cretáceo (Guarino et al., 2021).

Figura 4 – Lineamento do arco magmático de Cabo Frio.



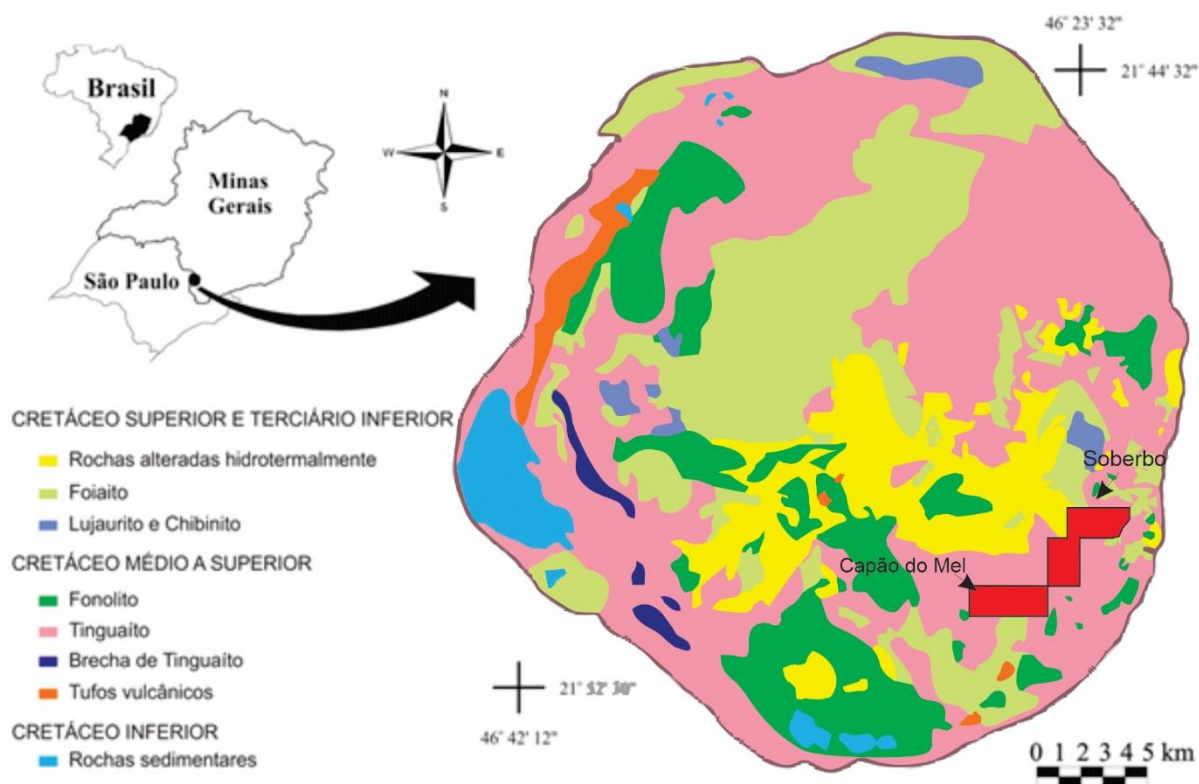
Retirado de Guarino et al., (2021).

O complexo tem estrutura circular com cerca de ~28 km de diâmetro, abrangendo uma área de mais de 800 km². É encaixado em rochas Neoproterozóicas da Nappe Guaxupé-Socorro e também em arenitos da Formação Botucatu, da Bacia do Paraná (Ellert, 1959; C. de B. Gomes et al., 2021; Guarino et al., 2021).

As rochas que compõe o complexo são principalmente fonolito e tinguaito (~80%), nefelina sienito e foiaíto, além de brechas, tufos, raras rochas básicas e ultrabásicas como leucita basanito, basanito, basalto e lamprófiro (Ellert, 1959; Guarino et al., 2019a; Schorscher & Shea, 1992) (Figura 5). Segundo Guarino et al. (2021) a gênese dessas rochas estaria relacionada a uma fonte inicial oriunda da fusão parcial da litosfera rica em K e altamente metassomatizada. Segundo os autores esse magmatismo gerou uma câmara magmática agpaítica/miasquítica que se diferenciou devido a prolongada cristalização fracionada de minerais máficos a partir de um melt originalmente básico.

No interior do complexo são reconhecidos pelo menos 20 subestruturas circulares, remanescentes que representam domos vulcânicos e centros emissores de magma associados a subsidência de caldeiras (Ellert, 1959).

Figura 5 - Mapa geológico e de localização das litologias encontradas no CAPC– MG.



Fonte: Adaptado de Ellert (1959); Ulbrich (1984); Sardinha et al., (2018).

Clique ou toque aqui para inserir o texto. Click or tap here to enter text. Clique ou toque aqui para inserir o texto. Clique ou toque aqui para inserir o texto. Clique ou toque aqui para inserir o texto. Clique ou toque aqui para inserir o texto.

2.2 Evidências de alteração Hidrotermal Registrada no CAPC

Dentro do contexto magmático do CAPC é reportado a existência de rochas com algum nível de alteração hidrotermal (Capovila, 2001; C. de B. Gomes et al., 2023; Guarino et al., 2021; H. H. G. J. Ulbrich, 1984). Segundo Gardar (1990) as rochas hidrotermais localizadas na porção centro-sul do complexo, apresentam coloração bege esbranquiçado a creme claro. Os minerais mais comuns associados ao processo hidrotermal nas rochas do CAPC são fluorita, pirita e a transformação de feldspato para argilo minerais como a illita (Capovila, 2001; Gardar, 1990). De maneira geral os processos hidrotermais atuaram no enriquecimento e perda de metais alcalinos sendo muitas vezes descrito como o potássio enriquecido e o sódio empobrecido. As rochas enriquecidas em potássio são informalmente denominadas de rochas potássicas de maneira genérica e sem caracterização das mesmas.

Esses processos hidrotermais na área do CAPC são os responsáveis por mineralizações e reconcentrações de alguns bens minerais como zircônio, molibdênio,

ferros, ETR e elementos radioativos (Barretto & Fujimori, 1986; Gardar, 1990; H. H. G. J. Ulbrich, 1984). Como observado e descrito por Capovila (2001) na mina de urânio desativada, Osami Utsumi, da Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e no Morro do Ferro é reportado alteração hidrotermal nas rochas, porém a alteração apresenta diferenças entre as duas localidades.

Na mina Osamu Utsumi os fluidos hidrotermais enriqueceram a rocha em K_2O e empobreceram em outros elementos como SiO_2 e Na_2O , concentrando elementos terras raras e elementos radioativos (Capovila, 2001; Gardar, 1990).

No Morro do Ferro, segundo Barretto & Fujimori (1986) a introdução de um magma tinguaítico gerou o hidrotermalismo rico em ETR, tório e ferro, alterando e concentrando esses elementos nas rochas encaixantes e posteriormente gerando intensa modificação mineralógica (sericitização e caulínização) da rocha, além do alto grau de lixiviação da rocha em elementos como sílica, potássio, sódio e magnésio.

Portanto a variação da alteração hidrotermal no CAPC não causou apenas o enriquecimento de alguns elementos e empobrecimento de outros, mas também a destruição de minerais primários (e.g., zircão e titanita) e argilização, processo particularmente comum na mina Osamu Utsumi (Capovila, 2001).

2.2.1 Estruturas e passagem de fluidos

No interior do CAPC é reportado a presença de diversas estruturas rúpteis (falhas e fraturas) maiores que truncam estruturas circulares subordinadas interpretadas como decorrentes do magmatismo ocorrido posteriormente ao abatimento da caldeira (Alves, 2003; Barretto & Fujimori, 1986; Capovila, 2001; Gardar, 1990; Hamza, 1982; H. H. G. J. Ulbrich, 1984). Foram realizados mapas para a melhor compreensão das estruturas, um dos melhores exemplos é o da NucleoBrás de 1975, o mapa radiométrico do planalto de Poços de Caldas (Figura 6).

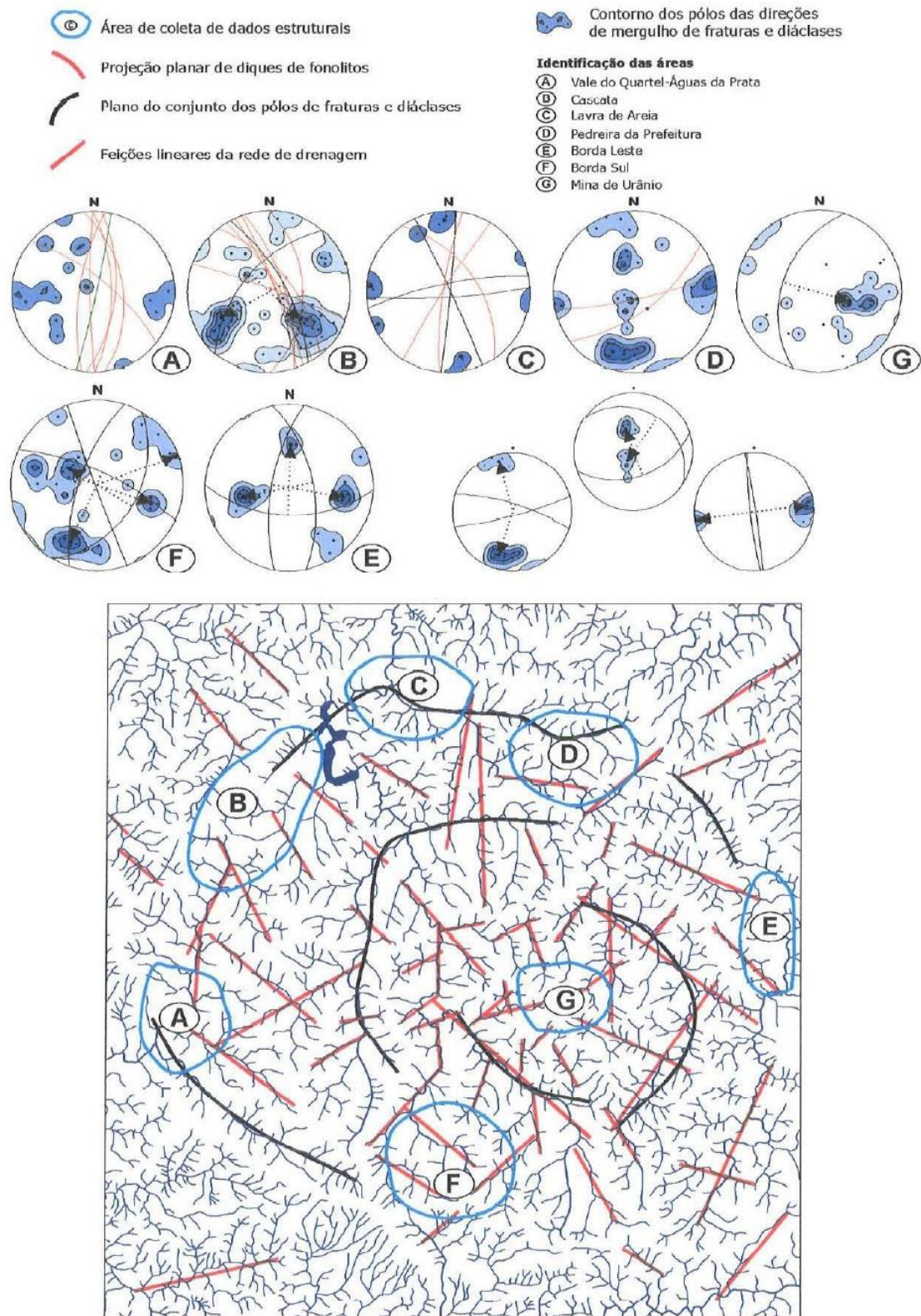
Figura 6 – Mapa Radiométrico do Planalto de Poços de Caldas.



Retirado do repositório das Indústrias Nucleares do Brasil.

Dados estruturais coletados em diferentes localidades do complexo apresentam padrões de fratura e descontinuidades, com orientações para NE-SW, NW-SE e N-S (figura 7). Essas estruturas condicionam as drenagens e também a colocação de corpos intrusivos e subvulcânicos. Além disso pode se interpretar que os diques cortam as rochas vulcânicas aproveitando planos de fraqueza que foram produzidos durante a reativação de antigos lineamentos. Segundo Gardar (1990) a mina de desativada de urânio Osamu Utsumi apresenta estar localizada em uma porção de estruturas importantes na massagem de fluidos, sendo essa localizada como ponto G na figura 7, portanto onde são localizados os dois depósitos.

Figura 7 – Imagem representando a análise estrutural da rede de drenagem, com dados estruturais.

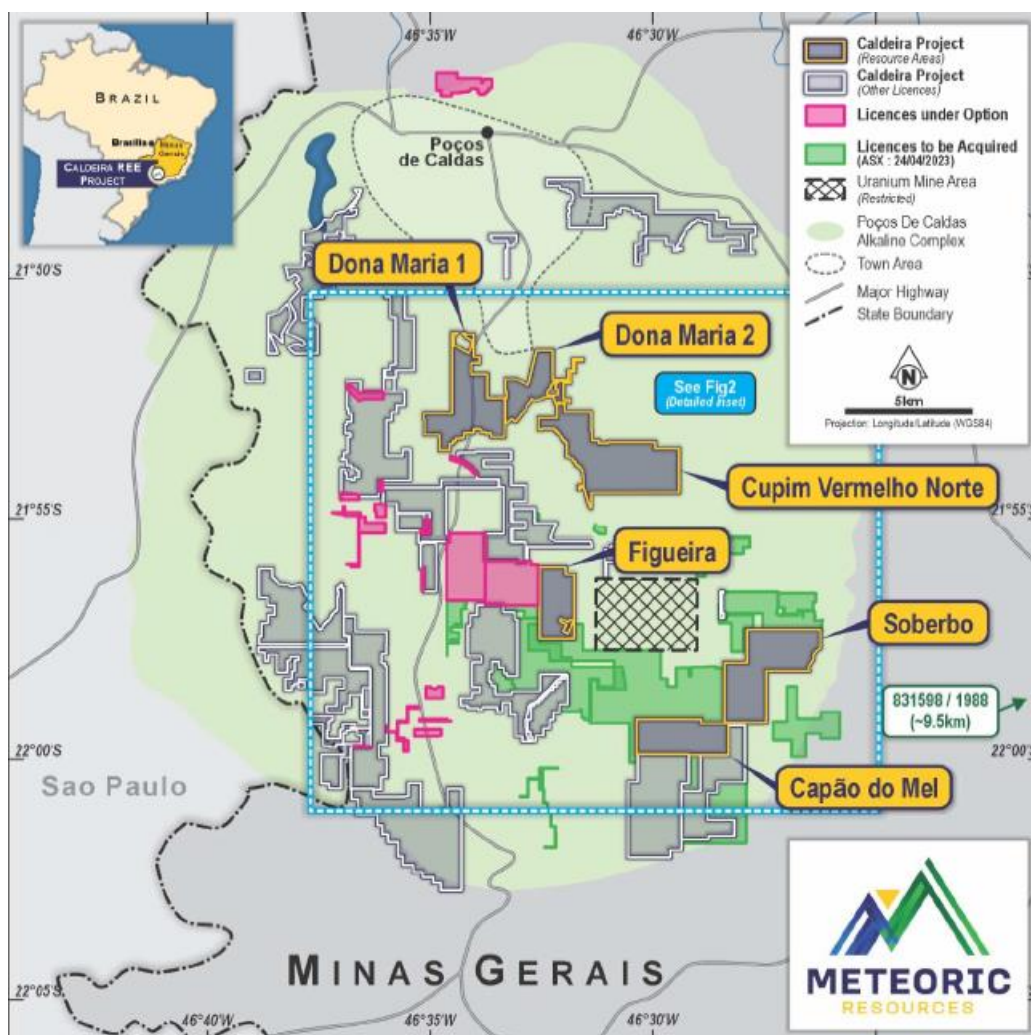


Modificado de (Gardar, 1990) e retirado de (Alves, 2003).

3 GEOLOGIA DOS DEPOSITOS ESTUDADOS

Os depósitos estudados são o Capão do Mel e o Soberbo, de detenção dos direitos de lavra da empresa Meteoric Resources, porém a empresa apresenta outras localidades que apresentam potencial para extração de ETR (Figura 8).

Figura 8 – Imagem representativa da localização das áreas adquiridas pelo Projeto Caldeira.



Retirado de Meteoric Análises (2023).

3.1 Soberbo

O depósito Soberbo é um dos maiores depósitos do projeto Caldeira, tendo em sua totalidade 772,72ha. O depósito está localizado na zona rural de Pocinhos do Rio Verde, distrito do município de Caldas há cerca de 5 km da mina desativada de urânio Osamu Utsumi da Indústrias Nucleares do Brasil (INB) (Figura 9). O recurso global do depósito é de 229Mt somando recursos indicados e inferidos apresentando 2,730ppm

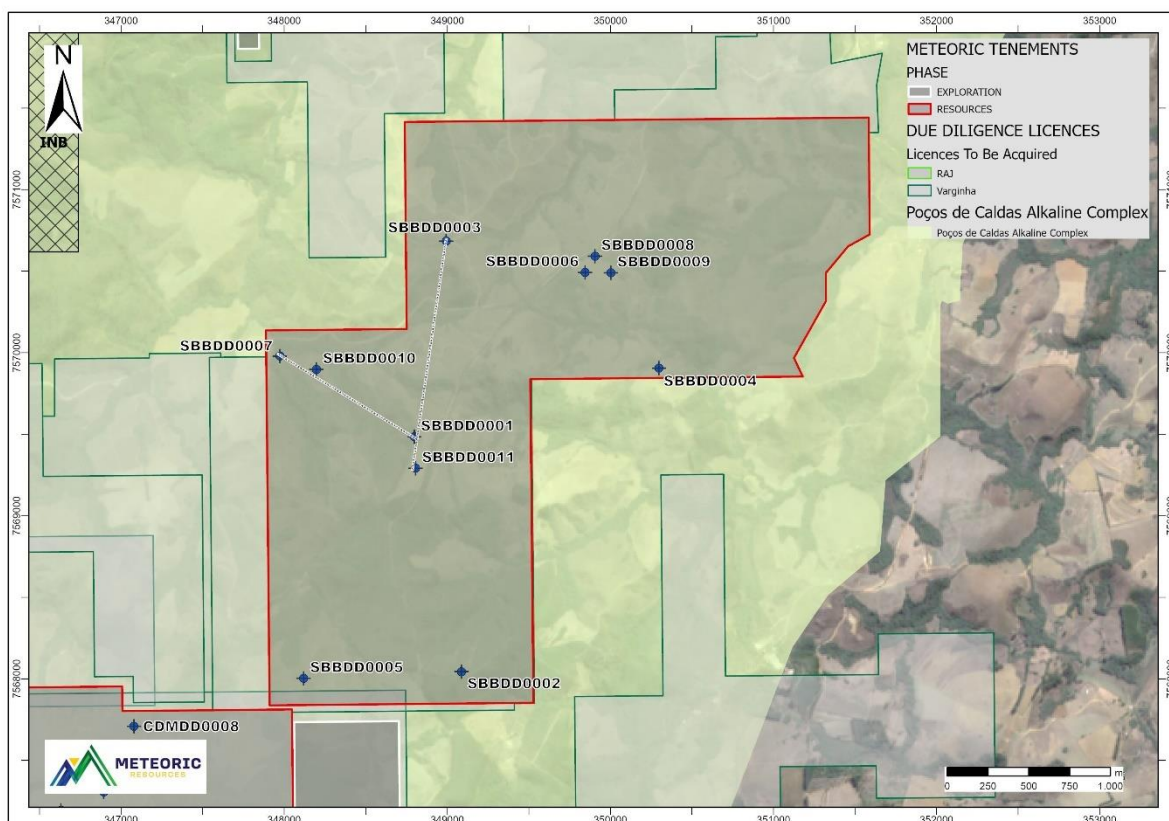
de TREO e razão de Óxidos Magnéticos de Terras Raras (*MREO*)/Óxidos Totais de Terras Raras (*TREO*)= 24.5% (Meteoric Resources, 2023).

Os trabalhos de exploração executados pela Meteoric Resources incluem 11 furos de sondagem diamantada no depósito que se somam à campanha de trado mecanizado realizado pela empresa JOGMEC que inclui aproximadamente 337 furos com profundidade média de 20m, além de 200 furos de *air core* na área.

As rochas parentais presentes sob o perfil regolítico do depósito Soberbo incluem fonólito, egrina fonolito e em menor quantidade, egrina nefelina sienito.

O corpo de minério tem cerca de 25m de espessura, apresentando morfologia estratiforme respeitando o relevo e com orientação NE-SW. Os teores do depósito estão concentrados nos horizontes B e C do perfil regolítico, não apresentando separação das concentrações de ETRL e ETRP, ocorrendo de forma majoritária juntos.

Figura 9 – Mapa de localização dos furos do depósito Soberbo.



Cedido por Meteoric Resources.

3.2 Capão do Mel

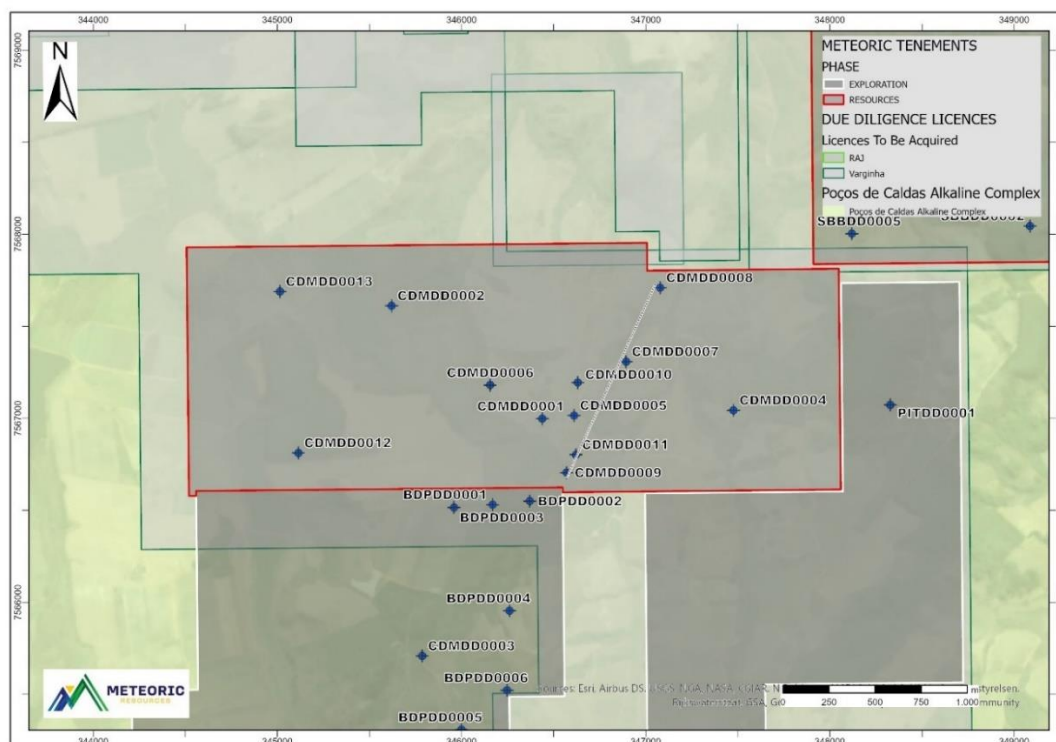
O depósito Capão do Mel é um alvo um pouco menor que o Soberbo em área (457,27ha). Está localizado imediatamente à sudoeste do depósito Soberbo (Figura 10). O recurso global do depósito é de 142Mt somando recursos medido, inferido e indicado com 3,888ppm TREO com razão de $MREO/TREO$ de 21.3% (Meteoric Resources, 2023). A empresa anunciou a previsão de iniciar a lavra no presente depósito em 2027.

Assim como no depósito Soberbo foram realizados furos de sondagem, totalizando 13 furos diamantados pela Meteoric Resources e cerca de 427 furos de trado mecânico realizados pela empresa JOGMEC, além de 300 furos de *air core* no depósito.

As rochas parentais presentes sob o perfil regolítico do depósito Capão do Mel são principalmente sienitos com variações mineralógicas e texturais.

O corpo de minério tem cerca de 25m de espessura, como corpo do minério apresentando morfologia estratiforme respeitando o relevo e com orientação NE-SW. Assim como no depósito Soberbo os ETR estão concentrados nos horizontes B e C, também não apresentando separação dos ETRL e ETRP dentro do perfil regolítico.

Figura 10 - Mapa de localização dos furos diamantados do depósito Capão do Mel.



Cedido por Meteoric Resources.

4 METODOLOGIA

Na etapa inicial da pesquisa foi realizado um trabalho de levantamento bibliográfico e de integração de dados em que foram realizadas pesquisas em plataformas de busca de artigos e teses, consulta ao acervo geológico da INB (Indústrias Nucleares do Brasil) em busca de relatórios petrográficos, análises mineralógicas, e, principalmente, produtos cartográficos da área de estudo. Também foram utilizados mapas geológicos da área produzidos pela equipe de exploração da Meteoric Resources, dados de seções geológicas e de furos de sondagem que foram integrados em plataforma SIG. Após a etapa de integração de dados foram selecionados furos de sondagem diamantada para descrição e coleta de amostras representativas da rocha parental dos depósitos estudados. Os furos foram selecionados ao longo de seções, geológicas representativas do depósito, que cortam os corpos de minério englobando zonas com alto teor e porções marginais de baixo teor. Nessa fase também foi realizado um trabalho de campo na área do depósito para coleta de amostras e reconhecimento geológico dos litotipos mapeados.

As amostras coletadas foram selecionadas e separadas para a confecção de lâminas polidas para o estudo petrográfico em luz transmitida e refletida. No total foram confeccionadas 17 lâminas petrográficas a partir das amostras coletadas nos furos sondagem diamantada e de amostras de mão coletadas em campo. A confecção das lâminas foi feita no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP). No presente trabalho foram coletadas amostras de cinco furos do depósito Soberbo para a análise petrográfica e identificação mineralógica, sendo amostrados os furos de sigla SBDD0001, SBDD0003, SBDD0007, SBDD0010 e SBDD0011, realizadas seis lâminas polidas denominadas de SBDD01_17-87, SBDD03_17-05, SBDD7_10-10, SBDD10_36-08, SBDD10_38-07 e SBDD11_27-11 e para o depósito Capão do Mel também foram amostrados cinco furos, sendo eles denominados de CDMDD0007, CDMDD0008, CDMDD0009, CDMDD0010 e CDMDD0011. Destas cinco amostras foram realizadas lâminas polidas para a petrografia, denominadas de CDMDD7_38-37, CDMDD8_39-10, CDMDD9_28-52, CDMDD10_54-64 e CDMDD11_25-88. A análises petrográficas foi feita utilizando um microscópio petrográfico de luz polarizada da marca Olympus modelo BX40 do Laboratório de Petrografia do Departamento de Geologia da UNESP campus de Rio Claro. Para aquisição de imagens de luz transmitida e refletida foi

utilizada uma câmera Canon 5D mark II acoplada a um microscópio Zeiss Axioscop 40 Pol. do Laboratório de Inclusões fluidas do Departamento de Geologia da UNESP.

Parte das amostras analisadas petrograficamente foram selecionadas para imageamento e para análises de Espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O equipamento utilizado foi um MEV da marca JEOL modelo JSM-6010 LA, também do Departamento de Geologia da UNESP – Rio Claro. A maioria das imagens obtidas foram do tipo backscattered utilizando feixe de elétrons com tensão aceleradora de 15kV. Isso permitiu identificar os principais elementos químicos dos minerais presentes nas rochas analisadas em análises do tipo EDS, incluindo minerais portadores de Ce e terras raras que destoam da maioria dos demais minerais por apresentar-se fortemente brilhante nas imagens backscattered. Nas lâminas do Capão do Mel a granulação mais grossa ajudou na identificação e localização das áreas de interesse marcadas na petrografia. Foram analisadas quatro lâminas, sendo elas a CDMDD7_38-37, CDMDD8_39-10, CDMDD10_54-64 e CDMDD11_25-88.

As amostras em que foram identificados minerais portadores de ETR durante as seções de MEV, foram selecionadas para análises de Microsonda eletrônica. As análises de Microsonda Eletrônica foram feitas em minerais portadores de ETR, minerais formadores de rocha e as alterações, foram realizadas em uma microsonda da marca JEOL e modelo JXA-8230. Por se tratarem de minerais muito pequenos geralmente menor que 5 μ , as análises foram executadas utilizando feixe com diâmetro de 1 μ para minerais menores e 10 μ para minerais maiores, corrente potencial de 1.000E-007 nA, tensão de aceleração de 15kV. Os dados foram obtidos na forma de óxidos os elementos analisados foram F, MgO, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃, La₂O₃, Ce₂O₃, Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Gd₂O₃, Er₂O₃, Tb₂O₃, Dy₂O₃, Yb₂O₃, UO₂, ThO₂, CaO, PbO, SrO, SO₃, Y₂O₃, P₂O₅, TiO₂, BaO, K₂O, FeO, MnO, ZnO e CO₂.

No total foram feitas 160 análise de microsonda em 4 amostras de rochas do Depósito Capão de Mel e 87 análises de microsonda em 4 amostras do Depósito Soberbo. Os dados de Microsonda foram tratados utilizando o programa Excel, sendo realizada a normalização dos dados escolhidos e para gerar os diagramas foi utilizando o software PetroGraph versão 1.0.5.

5 RESULTADOS

5.1 Petrografia – Litotipos estudados

A composição mineralógica das amostras analisadas foi classificada com base no diagrama Q-A-P-F e Série Sódica de Streckeisen (1976), utilizando os valores da composição modal estimadas na petrografia. Os diagramas da Figura 11 mostram que as rochas dos dois depósitos caem no campo 11 do diagrama Q-A-P-F, sendo considerados como fonólito, porém ao ser levada em consideração a composição modal dos minerais formadores nefelina, feldspato alcalino (ortoclásio) e piroxênio (egirina) é possível utilizar o diagrama da Série Sódica, onde as amostras podem ser consideradas como nefelina sienito.

Os litotipos observados nas amostras foram separados por depósito, tendo nefelina sienito e egirina nefelina sienito com litotipos predominantes no depósito Capão do Mel. Para o depósito Soberbo maior variedade foi encontrada, sendo um correspondente hipoabissal de egirina nefelina sienito, egirina nefelina fonolito e nefelina fonolito.

5.1.1 *Capão do Mel*

As amostras estudadas do depósito Capão do Mel são de nefelina sienito e egirina nefelina sienito. Os mapas geológicos mais antigos (Ellert, 1959; H. H. G. J. Ulbrich, 1984) indicam que as rochas na região do depósito são principalmente sienito, tinguaito e fonólito (Figura 12). Mapeamento mais recente realizado pela equipe que exploração da Meteoric Resources (Figura 13), mostra uma faixa de nefelina sienito na porção central do depósito com aproximadamente 700 metros de espessura. À oeste e imediatamente a leste dessa faixa predominam rochas classificadas como tinguaito. Na porção SW da área ocorrem rochas classificadas como foiaíto e na porção SE brechas. Tinguaito é definido como uma variedade de textura do fonolito, apresentando composição modal de feldspato alcalino, nefelina (com ou sem outro foide) e acículas de egirina, porém embora ainda utilizado em trabalhos locais, esse termo não é mais recomendado pela IUGS. O foiaíto é definido atualmente como uma variedade de nefelina sienito com textura traquítica (arranjo subparalelo de acículas de feldspato, indicando fluxo magmático), onde os cristais de feldspato apresentam

arranjo subparalelo devido ao fluxo de magma. Dessa forma as rochas predominantes no depósito incluem variedade hipoabissais de fonólito e nefelina sienito.

Figura 11 – Diagrama APF (Feldspato Alcalino, Plagioclásio e Foide) com composição mineral estimada para as litologias observadas nos depósitos e diagrama com os minerais específicos dentro dos campos 11 e 15 (Streckeisen, 1976).

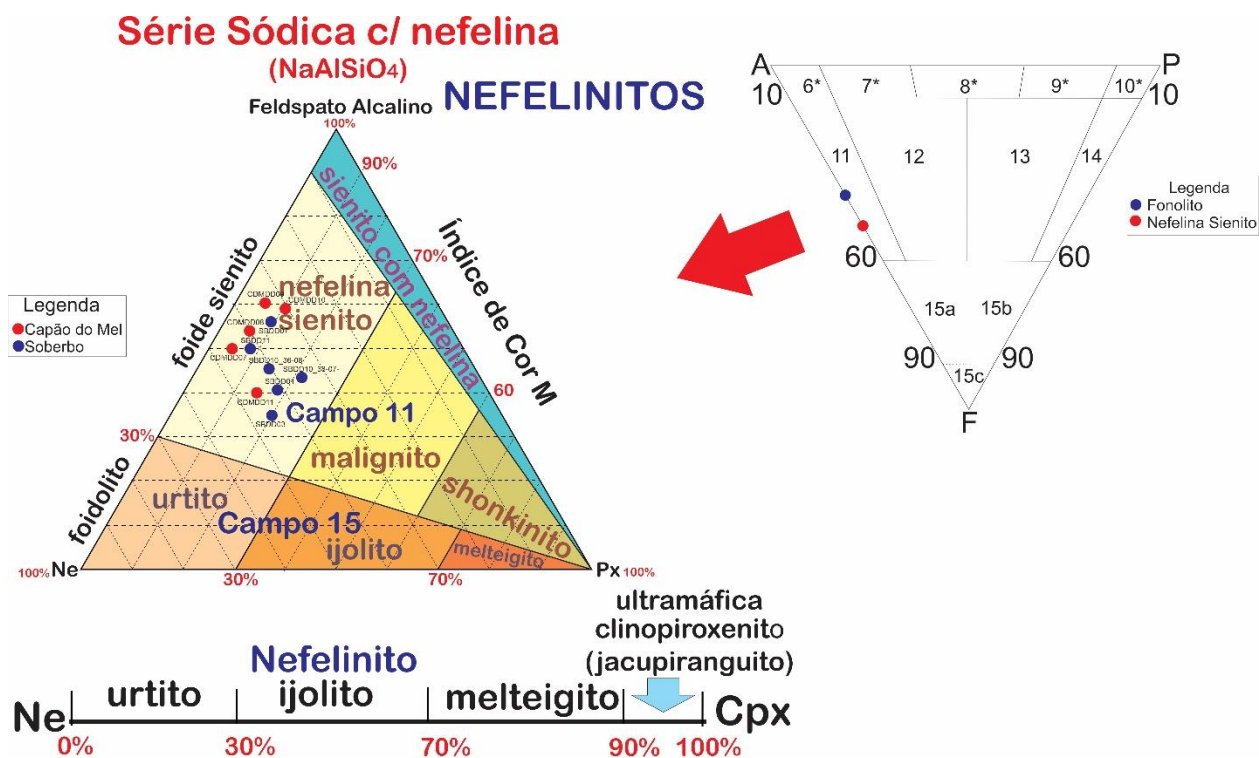
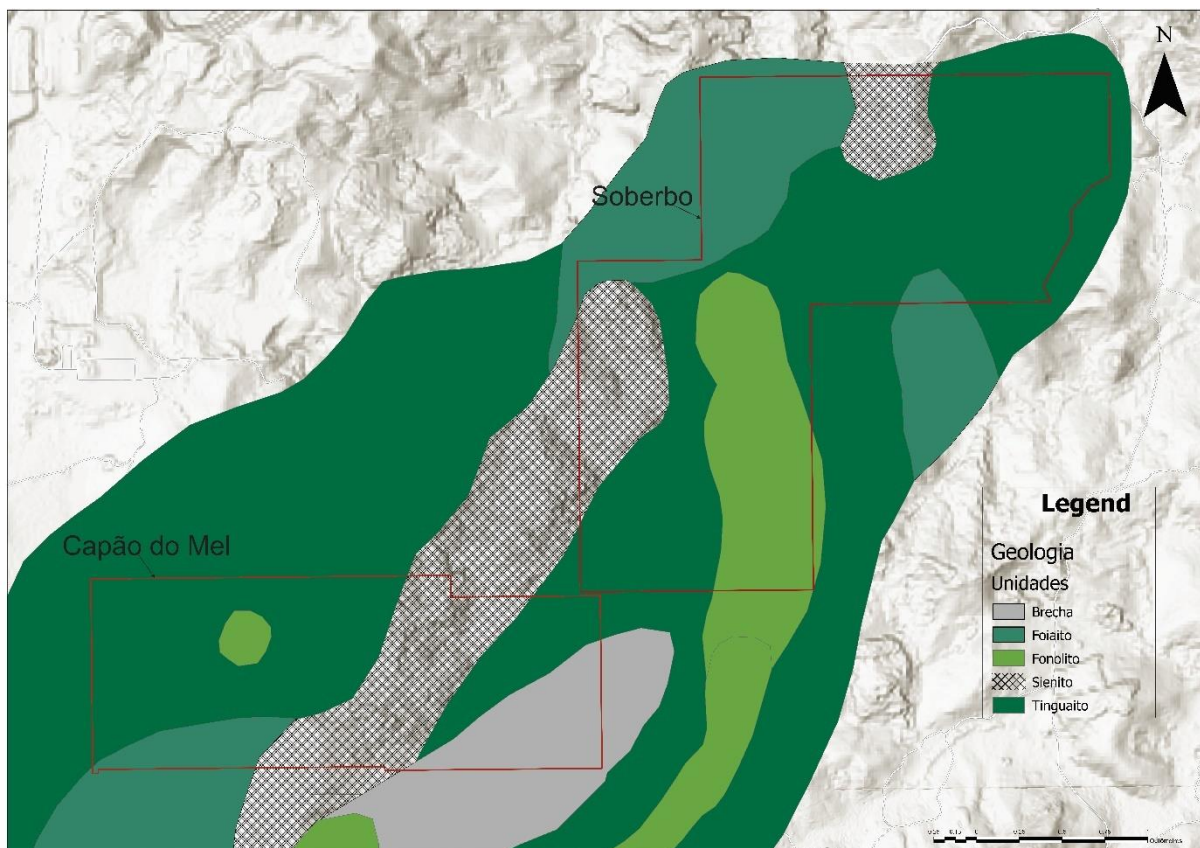


Figura 12 - Mapa geológico da região dos depósitos Capão do Mel e Soberbo executado pelo time de Exploração da Meteoric Resources.

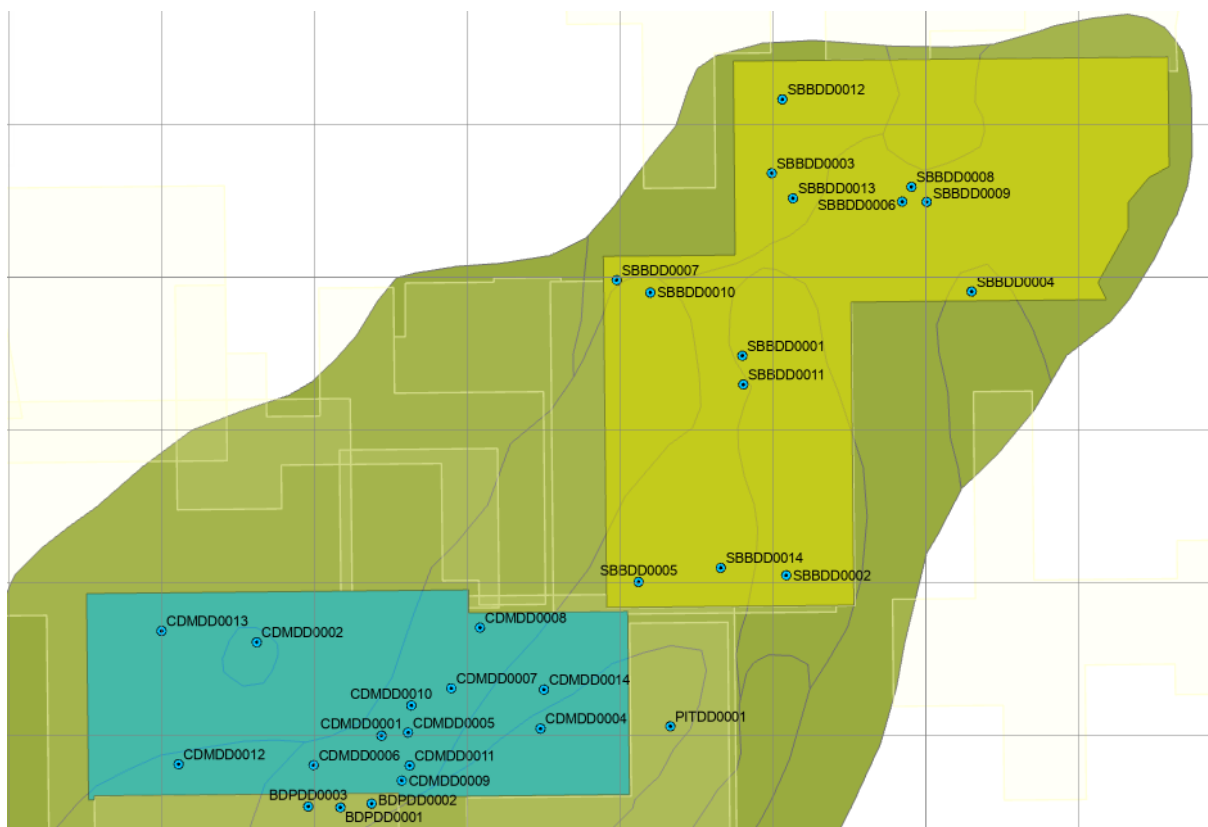


Fonte: Meteoric Resources

As amostras estudadas foram coletadas em furos de sondagem ao longo de uma seção NE-SW na porção central do depósito. Os minerais formadores de rochas identificados nas amostras estudadas são: feldspato alcalino (ortoclásio), nefelina e piroxênio (egirina). Como minerais acessórios foram identificados: titanitas, apatita, pirita, galena, oxi-hidróxidos de ferro e manganês, arfvesonita e leucita.

No anexo I é apresentada o perfil topográfico correspondente as seções em que foram realizadas e retiradas as amostras de furo de sondagem.

Figura 13 - Mapa de pontos dos furos de sondagem e das seções realizadas da região dos depósitos Capão do Mel e Soberbo executado pelo time de Exploração da Meteoric Resources.



Fonte: Meteoric Resources

A Tabela 1 apresenta de maneira sucinta os principais minerais encontrados nas amostras estudadas, sua proporção modal nas rochas, a frequência de ocorrência, o tamanho aproximado dos cristais e seus principais produtos de alteração.

Tabela 1 – Composição modal dos minerais do depósito Capão do Mel.

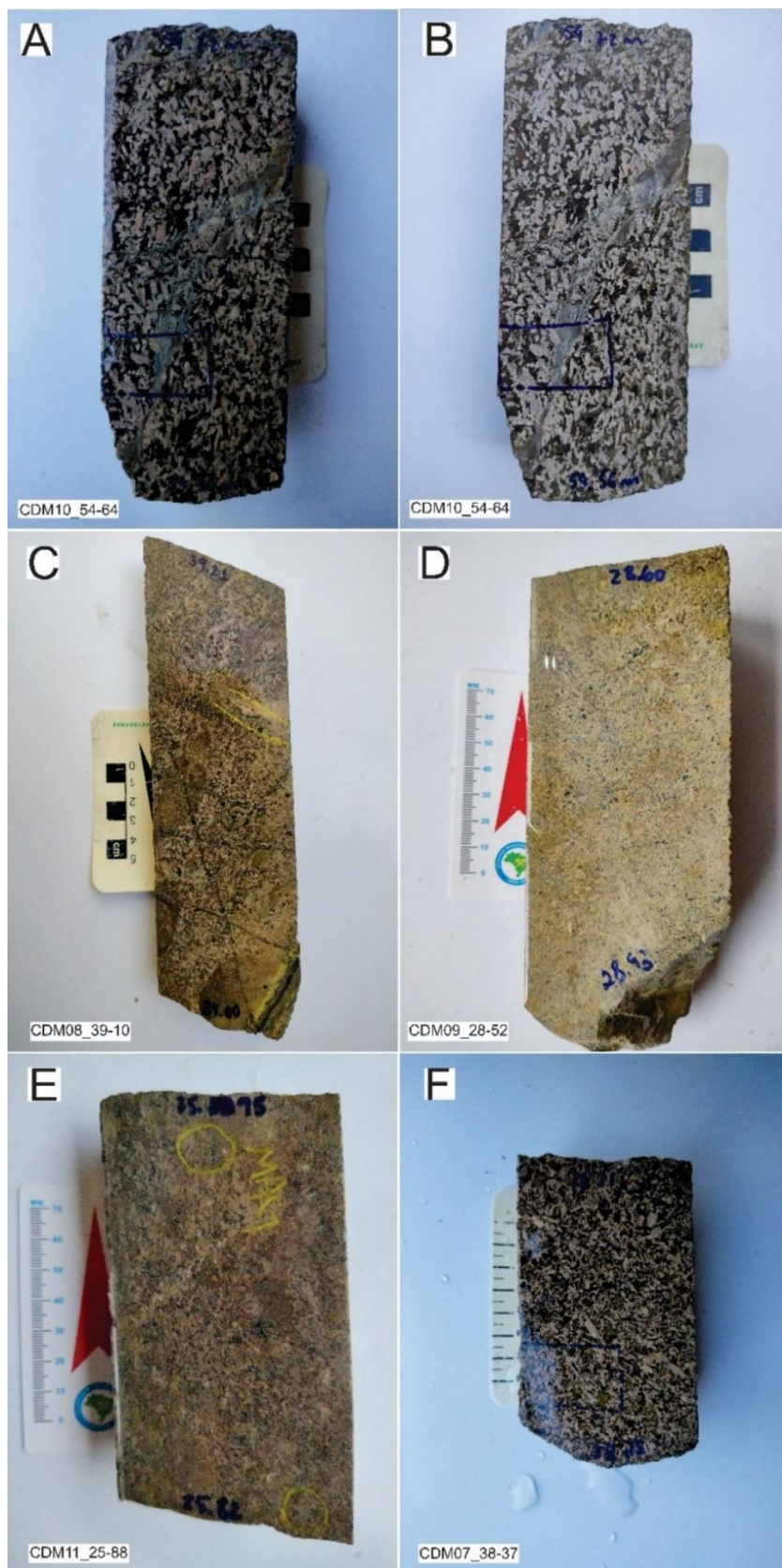
Capão do Mel					
Minerais	% Modal	Frequência	Tam. Cristais	Tipo	Alteração
Ortoclásio	40 - 60%	A.P.	3 - 7mm	Es.	Illita-Caolinita
Nefelina	30 - 40%	A.P.	3 - 5mm	Es.	zeolitas - Caolinita
Aegirina	8 - 10%	A.P.	3 - 5mm	Es.	Ox./Hidro. Fe
Calcita	5 - 8%	A.P.	1 - 3mm	Sec./Prec.	-
Leucita	<1%	Ev.	2 - 3 mm	Ac.	Ox./Hidro. Fe
Arfvedsonita	<1%	Ev.	1 - 3 mm	Ac.	-
Titanita**	1 - 6%	Fr.	3 - 5 mm	Ac.	rontgenita/rinkita
Apatita**	1%	Fr.	2 - 3 mm	Ac.	-
Zircão**	*	-	-	-	-
Rinkita**	?	Rr.	<1mm	Sec.	-
Rontgenita**	?	Rr.	1 - 2 mm	Sec.	-
Galena	*	-	-	-	-
Pirita	?	Fr.	1 - 5 mm	Ac./Sec.	-
Ankerita	*	-	-	-	-
Estroncianita	?	Rr.	1 - 3 mm	Sec.	-
Fluorita	?	A.P.	1 - 3 mm	Sec.	-
Zeolitas	?	A.P.	2 - 5mm	Sec.	-
Caulinita	?	A.P.	2 - 6mm	Sec.	-
Illita	?	A.P.	3 - 4mm	Sec.	-
Ox./Hidro. Fe	5 - 10%	A.P.	3 - 5mm	Sec.	-

?= não estimado; A.P. = Sempre presente; Ev. = Eventual; Fr= frequente; Rr.= raro; Es.= Essencial; Ac.= Acessório; Sec.= Secundário; Prec.= precipitado hidrotermal; * = não presente; **= Portadores de ETR;

Foi observado, em praticamente todas as amostras, a presença de minerais secundário produto de transformações deutéricas/hidrotermais, que incluem: argilominerais como caulinita e illita, fluoritas, carbonatos e massas microcristalinas que possivelmente são oriundos da alteração de outros minerais e da passagem de fluidos.

De maneira geral o depósito apresenta rochas com minerais, coloração e textura bastante alteradas, veios e vênulas hidrotermais são bastante frequentes nas amostras observadas, porém ainda apresentam granulação média a alta (Figura 14) e trama intersticial das ripas de feldspato. É comum a presença de textura fluxo magmático nas rochas com maior granulação.

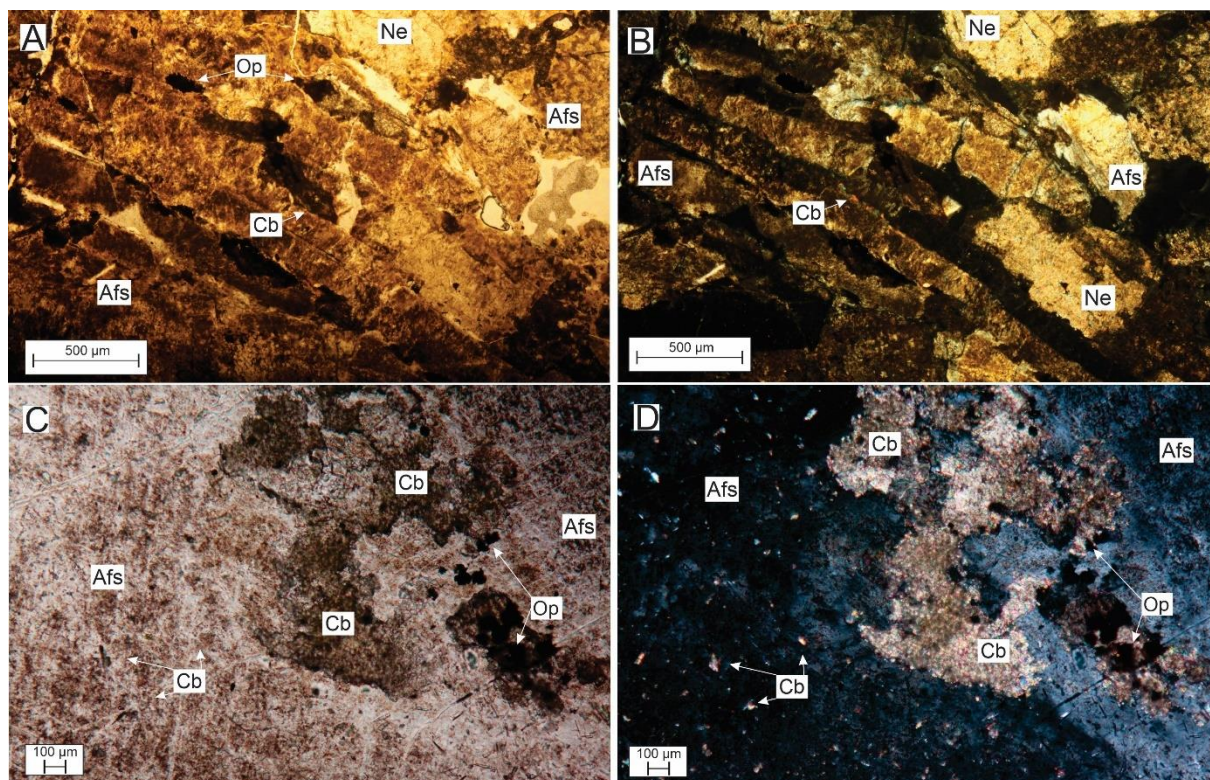
Figura 14 – Amostras de mão coletadas dos furos de sondagem do depósito Capão do Mel.
A) Egirina Nefelina Sienito; C) Nefelina Sienito; D) Nefelina Sienito; E) Nefelina Sienito; F)
Titanita Nefelina sienito.



5.1.1.1 Minerais Essenciais

O feldspato alcalino identificado na rocha é o ortoclásio. Os cristais normalmente apresentam tamanho variando de 4-7mm nos sienito e de 5mm nos fonólito. Ocorrem como cristais prismáticos com formato tabular e compõe entre 40-60% da composição modal das rochas analisadas. É comum nos cristais de feldspatos alcalinos prismáticos a presença de alteração dada por uma “sujeira” marrom a creme, possivelmente relacionada a alteração secundária com a formação de caulinita e illita. Inclusões são bastante frequentes no feldspato, como pode ser observado na coloração amarronzada nas figuras 15a e 15c. Capovila (2001) descreve inclusões de minerais de urânio, como a pechblenda, nos feldspatos da mina Osamu Utsumi. Segundo o autor esses minerais são produtos da alteração hidrotermal ocorrida no local, no depósito Capão do Mel inclusões também são frequentes nos feldspatos, porém sendo mais comuns carbonatos e minerais opacos (Figura 15c). Outra característica observada em alguns cristais de feldspato é a presença de pertitas (exsolução de lamelas de plagioclásio dentro do feldspato), porém não apresentam frequência constante e são bastante pequenas, da ordem de 1mm (Figura 17).

Figura 15 – Fotomicrografia representativas dos feldspatos encontrados no deposito Capão do Mel. A) Foto de feldspatos a nicóis descruzados, com a presença de nefelina, opacos e carbonatos; B) Foto no mesmo local com nicóis cruzados; C) Foto de detalhe das inclusões de carbonato e opacos dentro de ripas de feldspato; D) Foto da mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.

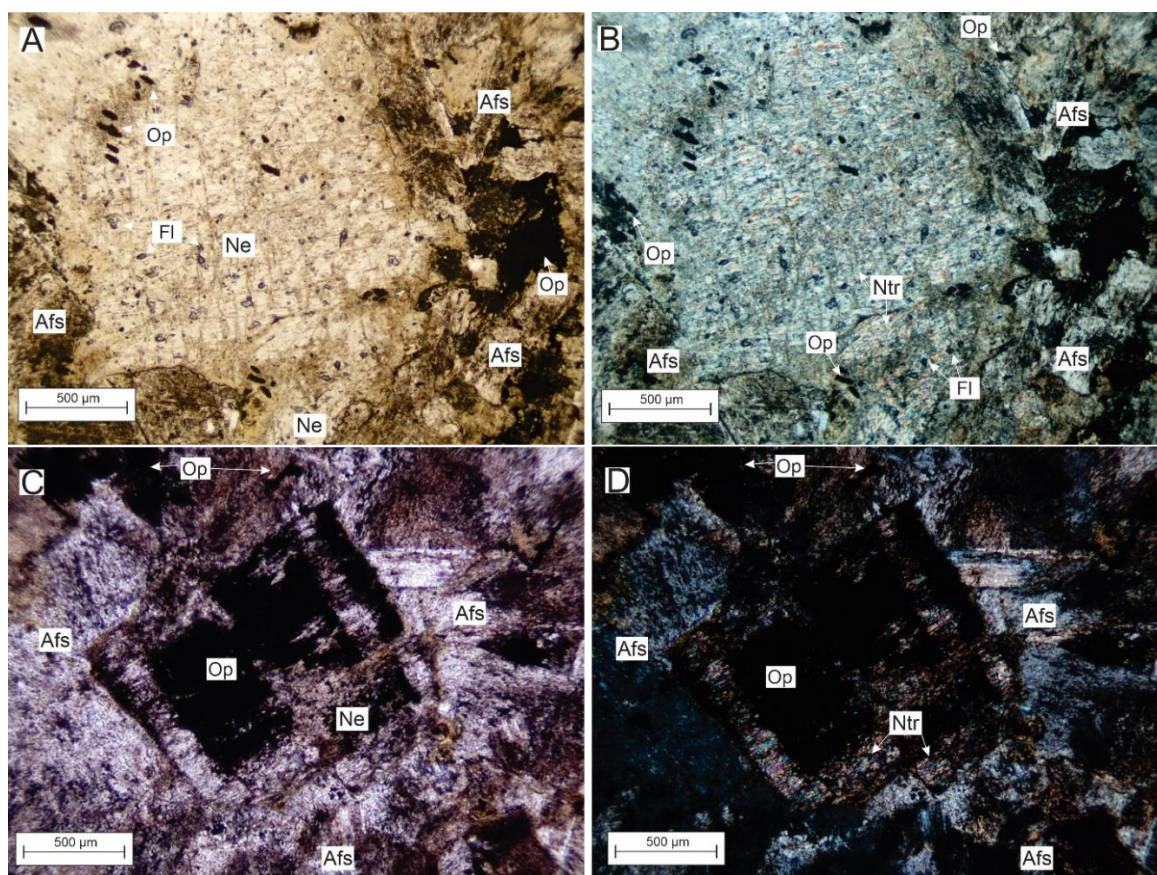


Os cristais de nefelina normalmente apresentam tamanho variando de 3-5 mm nos sienitos e 2-3 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato tabular e compõe 30-40% da composição modal das rochas analisadas. Entretanto em todas as rochas estudadas a nefelina não apresenta as características habituais. Geralmente ocorrem com coloração castanha a nicóis descruzados e a nicóis cruzados apresenta birrefringência moderada com acículas internas, indica que a nefelina passou por um processo de alteração e o mineral formado possivelmente é do grupo da zeólita devido a seu habito fibroso e alta birrefringência, podendo ser natrolita ou thonsonita (Fig. 16a e b).

Assim como no feldspato, inclusões são bastante frequentes e muitos são opacos, possivelmente sendo piritas, goethita, óxidos de titânio e oxi-hidróxidos de ferro, além ainda da presença de fluoritas de coloração leve mente roxa com habito granular, como pode ser visto na figura 16a e c.

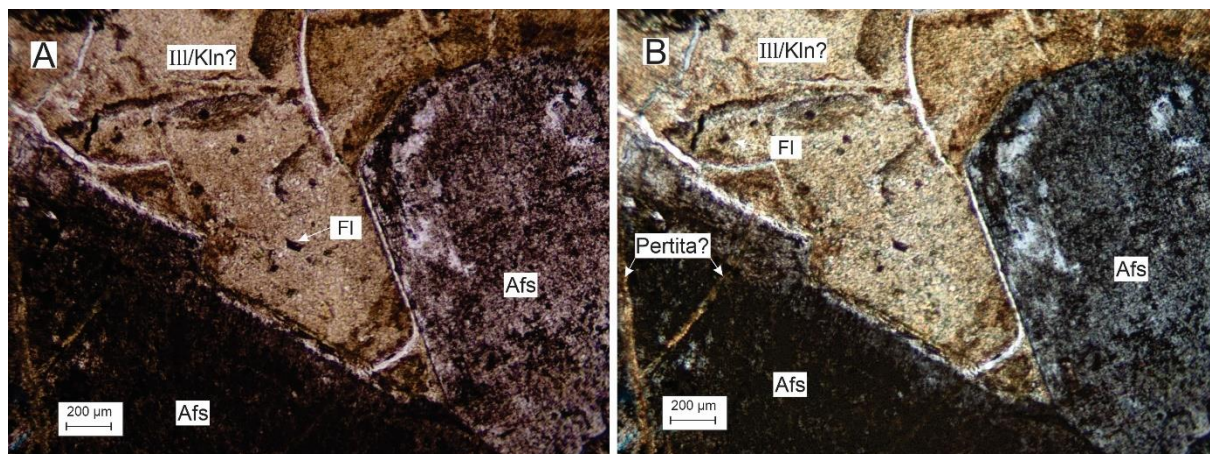
Em quase todas as lâminas, nas bordas da nefelina ocorre um mineral de coloração amarelo esverdeado pálido, identificado como caulinita gerada pela alteração hidrotermal.

Figura 16 – Fotomicrografia representativas das nefelinas encontradas no depósito Capão do Mel. A) Grande cristal de nefelina apresentando inclusões e aparentemente fraturas no seu interior a nicóis descruzados; B) Mesma localidade com nicóis cruzados, no interior da nefelina apresentam acículas de zeólita; C) Cristal de nefelina bem formado com intensa alteração interna de opacos, nicóis descruzados; D) A intensa alteração de opacos também apresenta alteração da nefelina para natrolita, nicóis descruzados. Abreviações: Afs, alkali feldspar; Fl, fluorite; Ne, nepheline; Ntr, natrolite; Op, opaco mineral.



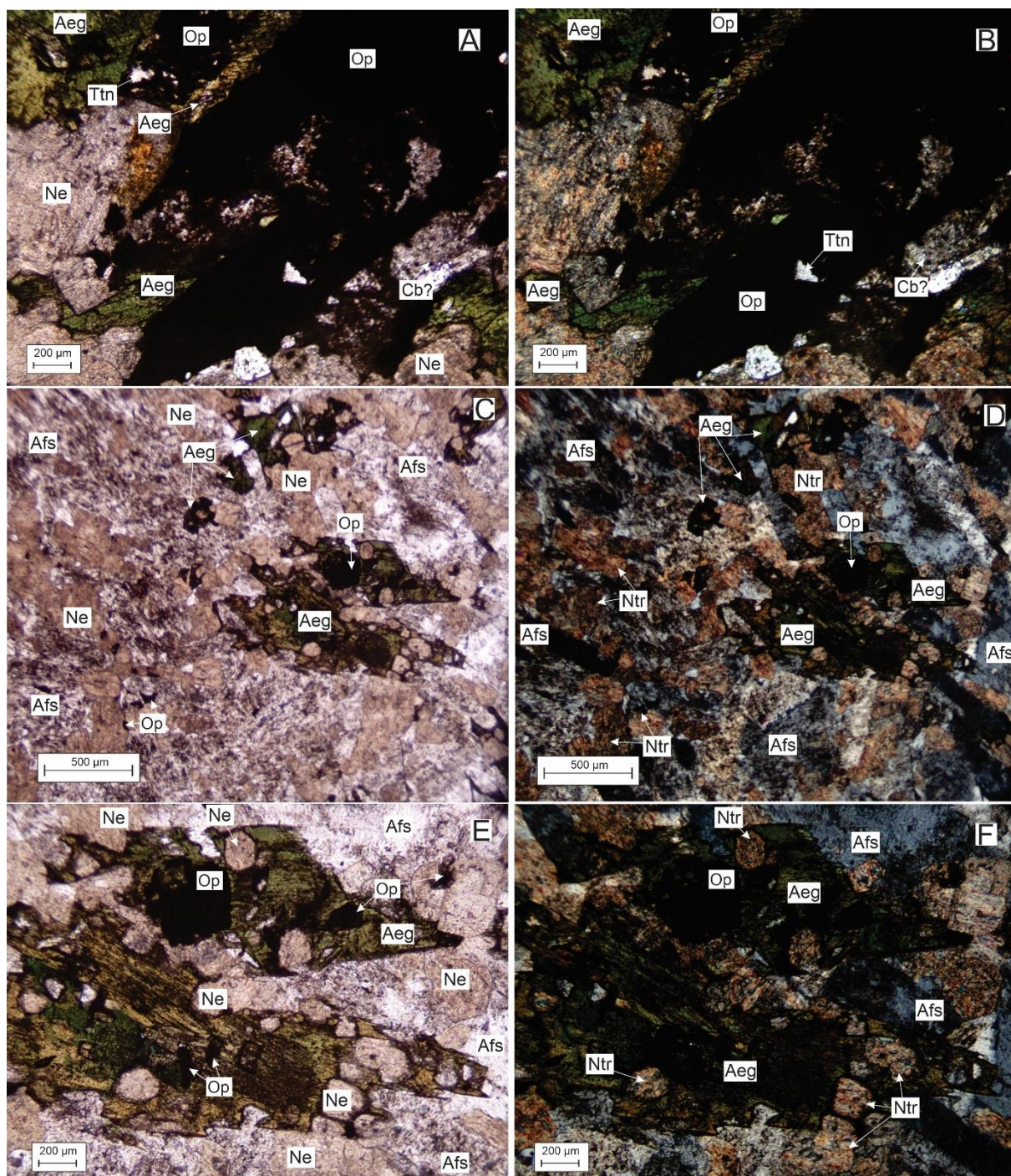
Em grande parte das rochas é observada a presença de minerais com coloração amarelo pastel claro a nicóis descruzados e a mesma coloração a nicóis cruzados não apresentando uma birrefringência característica, além disso alguns minerais apresentam uma feição amorfa. Provavelmente o mineral é um argilo mineral que foi criado pela alteração hidrotermal, sendo uma caulinita ou illita (Figura 17).

Figura 17 – Fotomicrografia representativa da argilização. A) Possível argilização entre dois cristais de feldspato, com inclusões de fluorita a nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados, possível presença de albita formando veios no feldspato gerando pertita.
 Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Fl, *fluorite*; Ill; *illite*; Kln, *kaolinite*.



Os cristais de egirina normalmente apresentam tamanho variando de 2-4 mm nos sienitos e 2-3 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato prismático e compõe 5-10% da composição modal das rochas analisadas. A egirina muitas vezes é encontrada apenas como esqueletos, mantendo parcialmente a sua forma prismática. Muitas vezes são parcialmente substituídas por minerais opacos e argilo minerais, podendo ser oxi-hidróxidos de ferro, piritas, galenas, caulinita etc. Como é possível observar na figura 18, onde a egirina ocorre preservada, juntamente com a alteração para minerais opacos e apresentando “buracos” nos cristais. Nos nefelina sienitos do Capão do Mel é observado que as egirinas são alteradas para argilominerais, com uma leve coloração marrom escuro a marrom amarelado, muitas vezes ocorrendo nas bordas dos minerais, mas também apresentando no interior do mineral (Figura 18e).

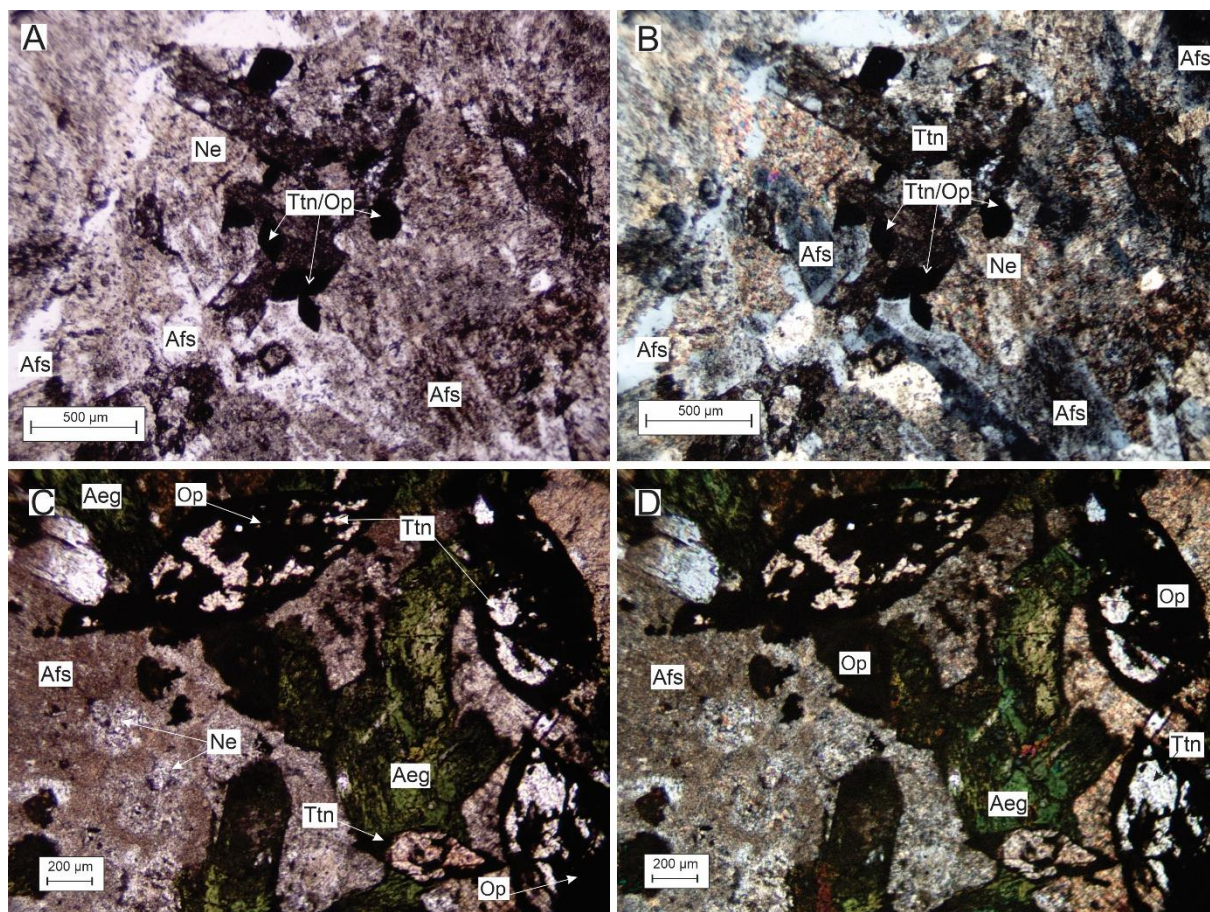
Figura 18 – Fotomicrografia representativas de cristais de egirinas entrados no depósito. A) Cristais de egirinas alterando para massa de minerais opacos, possível presença de cristal relíquiar de titanita, a nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Cristais de egirina bem formados com “buracos” preenchidos por nefelina/natrolita e alteração para minerais opacos, a nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados; E) Detalhe dos cristais de egirina com inclusões de opacos e de buracos, a nicóis descruzados; F) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Ne, *nepheline*; Ntr, *natrolite*; Op, *opaque mineral*; Ttn, *titanite*.



5.1.1.2 Minerais acessório

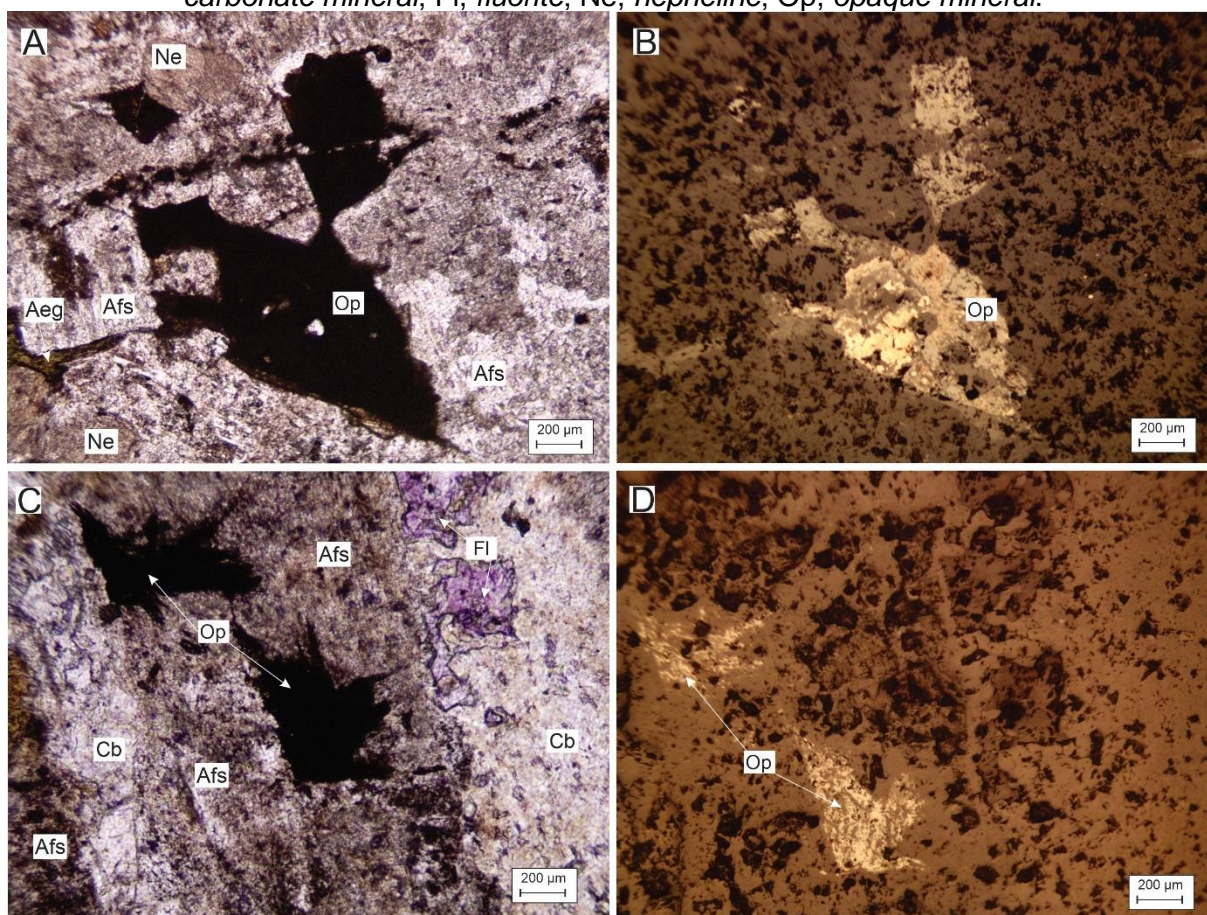
Os cristais de titanita apresentam tamanho variando de 3-5 mm nos sienitos e 2-4 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato prismático, os bem formados apresentam o habito cuneiforme característico e compõe 1-3% da composição modal das rochas analisadas. Também é outro mineral encontrado em todas as rochas estudadas, com maior ou menor expressividade, porém normalmente encontrada totalmente deteriorada e sem suas características marcantes, sendo muitas vezes reconhecida devido a sua forma cuneiforme preservada, sendo apenas um pseudomorfo (Fig. 19a). O mineral possivelmente altera para óxidos e hidróxidos de ferro e titânio. Quando preservado a titanita apresenta uma coloração marrom claro, com relevo extremamente forte positivo e birrefringência extrema, apresentando o habito cuneiforme e ou granular (Fig. 19c).

Figura 19 – Fotomicrografia representativa de titanitas encontrada nas rochas. A) Aglomerados de titanitas totalmente alterado para minerais opacos, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Detalhe de alteração incipiente de porções das titanitas para minerais opacos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Afs, *alkali feldspar*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*; Ttn, *titanite*.



Os minerais opacos em luz refletida foram identificados como pirita, goethita, galena e oxi-hidróxidos de ferro e titânio. A maioria dos opacos observados são produto da alteração de minerais primários (principalmente egrina e outros minerais máficos) ou acessórios (e.g., titanita) (Figura 20). Entretanto alguns cristais de opacos são cristais de sulfeto (pirita e galena) aparentemente de origem primária e em alguns casos, secundária.

Figura 20 – Fotomicrografia dos minerais opacos encontrados nas rochas. A) Imagem de mineral opaco a nicóis descruzados; B) Imagem de luz refletida da mesma localidade; C) Imagem de mineral opaco próximo ao veio de carbonato com fluorita, nicóis descruzados; D) Imagem de luz refletida da mesma localidade. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Fl, *fluorite*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



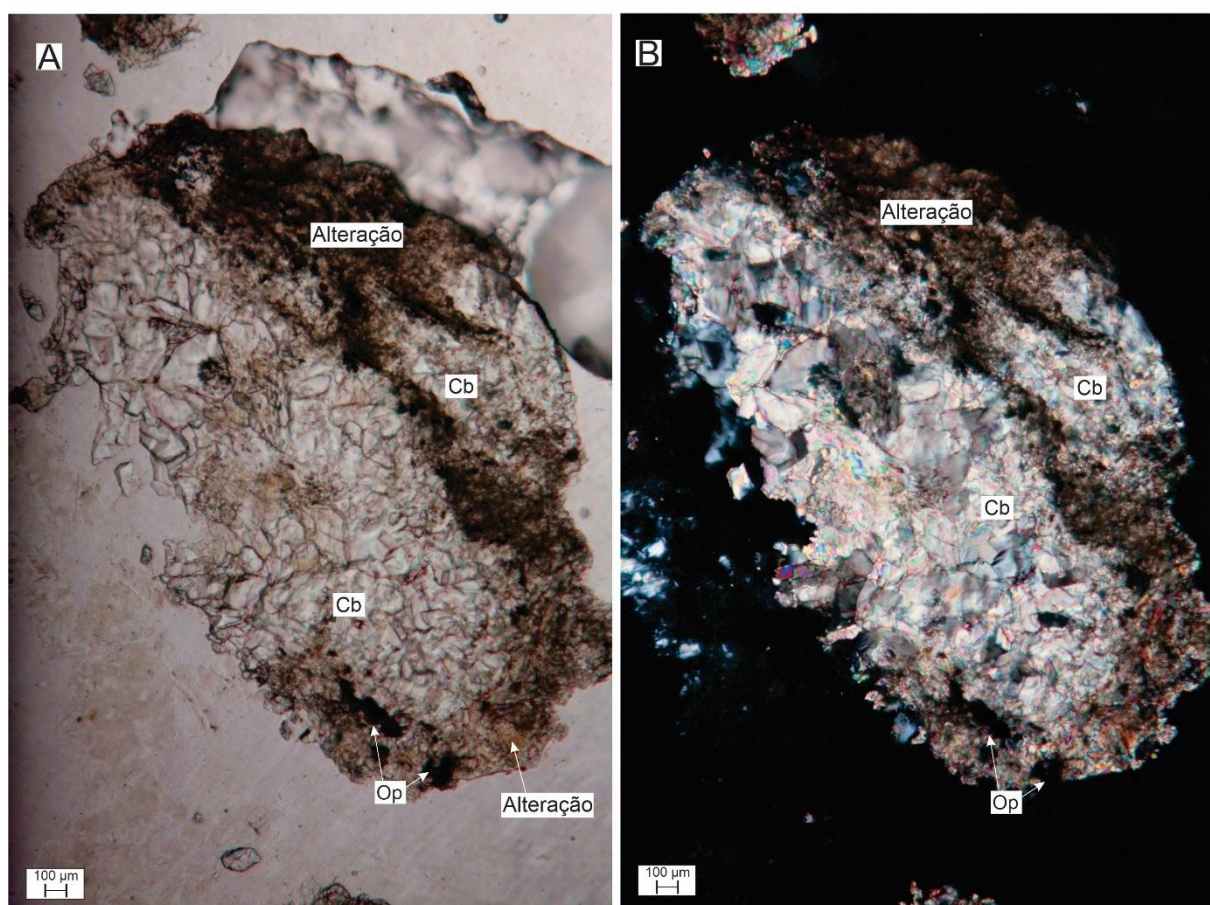
Os cristais de sulfeto estão disseminados e ocorrem na forma de cristais cúbicos quando bem formados, ocorrem em diversos tamanhos variando de 1-5mm, o hábito normalmente é maciço a granular e compõem cerca de 5-10% dos minerais analisados nas rochas. Em algumas ocasiões agregadas de minerais opacos são encontrados em um único ponto, além de muito presentes como inclusões em outros

minerais. Muitos desses minerais aparentam ser oriundos de alteração de outros minerais devido a sua forma maciça, provavelmente são sulfetos e até mesmo fosfatos (Figura 20).

5.1.1.3 Minerais secundários

Os carbonatos observados no depósito são a calcita e minoritariamente a dolomita, com algumas ocorrências de estroncianita. Apresentam tamanho variando de 1-3 mm no sienito e 1-2 mm no fonólito. Ocorrem majoritariamente como cristais anhedrais, com formato granular e compõe 1-3% da composição modal das rochas analisadas. Quando bem formados apresentam a sua clivagem perfeita característica, a birrefringência extrema e o relevo forte negativo (Figura 21).

Figura 21 – Fotomicrografia representativa dos cristais de carbonato encontrados nas rochas. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviações: Cb, *carbonate mineral*; Op, *opaque mineral*.

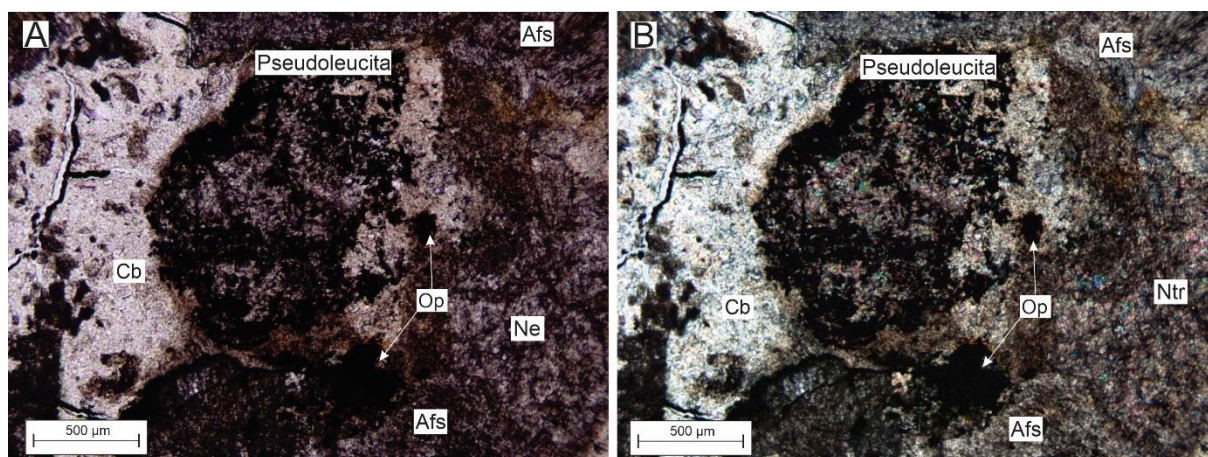


Os carbonatos em inúmeras observações das rochas eram concentrados em veios e vênulas, além de disseminados pela rocha como inclusões em outros minerais

(Figura 15c). A coloração é incolor, porém foram observados porções em que o carbonato apresentava uma leve coloração amarelada, possivelmente oriunda da alteração hidrotermal ocorrida (Figura 21a), o que talvez possa indicar a sua cristalização anterior ou concomitantemente a passagem dos fluidos.

A pseudoleucita é encontrada na rocha devido ao seu formato arredondado diferente dos outros minerais encontrados. Apresenta tamanho variando de 2-5 mm nos nefelina sienitos e 1-3 mm no fonólito. Ocorrem como cristais anhedrais, com formato granular e compõe <1% da composição modal das rochas analisadas. Devido a alteração não demonstram suas características habituais, observados a formação de massas microcristalinas e concentração de minerais opacos em seu interior, sendo possivelmente o carbonato com outros minerais formando essa massa extremamente fina e cinza, de difícil diferenciação, podendo ser observado pequenos cristais com birrefringência extrema, o que leva a crer ser um agregado de minerais com carbonato, como pode ser observado na figura 22 de um exemplar.

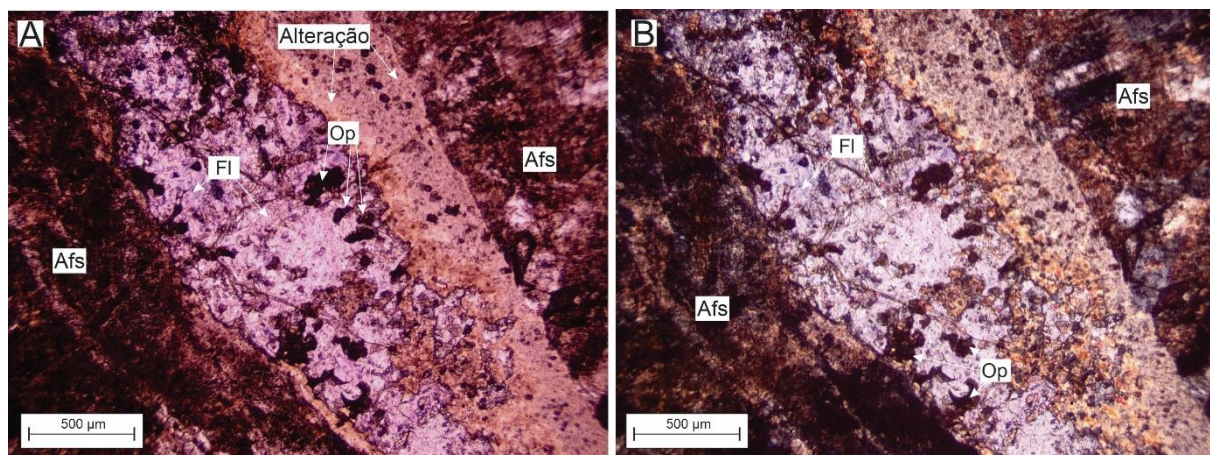
Figura 22 - Fotomicrografia representativa da pseudoleucita. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Ne, *nepheline*; Ntr, *natrolite*; Op, *opaque mineral*.



Os cristais de fluorita apresentam tamanho variando de 3-7 mm nos sienitos e 2-4 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato granular, maciço e em algumas localidades fibroso, compõe 1-4% da composição modal das rochas analisadas. É presente em todas as lâminas muitas vezes apenas como inclusões (Figuras 16 e 17) e preenchendo vênulas, mas podendo preencher veios, apresenta coloração roxa intensa que persiste a nicóis cruzados (Figura 23b). Algumas variantes

incolores foram observadas e identificadas devido a seu habito octaédrico e extinção total a nicóis cruzados.

Figura 23 – Fotomicrografia representativa das fluoritas encontradas no deposito. A) Nicóis descruzados de um feio preenchido por fluoritas roxas com a presença de minerais opacos e ainda uma borda de alteração gerada pela passagem de fluidos; B) Nicóis cruzados da mesma localidade. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Fl, *fluorite*; Op, *opaque mineral*.



5.1.2 Soberbo

Os tipos litológicos encontrados nas amostras do deposito Soberbo foram caracterizados como sendo egirina nefelina fonolito, nefelina fonolito e ainda um possível correspondente hipoabissal de egirina nefelina sienito. As lâminas interpretadas foram utilizadas amostras de furo de sondagem disponibilizado pela empresa. As lâminas no geral apresentam granulação fina a média, com trama intersticial das ripas de feldspato e também normalmente apresentam textura de fluxo magmático. Todas as rochas apresentam algum nível de alteração, sendo intempérico ou de hidrotermalismo, dificultando o entendimento evolutivo dos minerais e das suas correlações, além de dificultar o entendimento e equiparação dos furos, devido aos diferentes graus de intensidade da alteração. No mapa geológico da INB (INB, 2011) o depósito Soberbo está localizado essencialmente sobre tinguaito (variedade textural do fonólito) (Figura 11). No mapa geológico disponibilizado pela Meteoric Resources (Figura 12), são mapeados tinguaito e fonolito na maior parte do depósito, foiaíto e sienito/foiaíto na porção leste da área. As amostras estudadas foram coletadas em furos de sondagem ao longo de duas seções, uma N-S e outra NW-SE, no anexo I

são apresentadas a seções topográfica com localidade dos furos e dos locais de retirada das amostras.

Os minerais formadores de rochas identificados nas amostras estudadas são: feldspato alcalino (ortoclásio), nefelina e piroxênio (egirina). Como minerais acessórios foram identificados: titanita, pirita, galena, oxi-hidróxidos de ferro e titânio, apatita e zircão. A Tabela 2 apresenta de maneira sucinta os principais minerais encontrados nas amostras estudadas, sua proporção modal nas rochas, a frequência de ocorrência, o tamanho aproximado dos cristais e seus principais produtos de alteração.

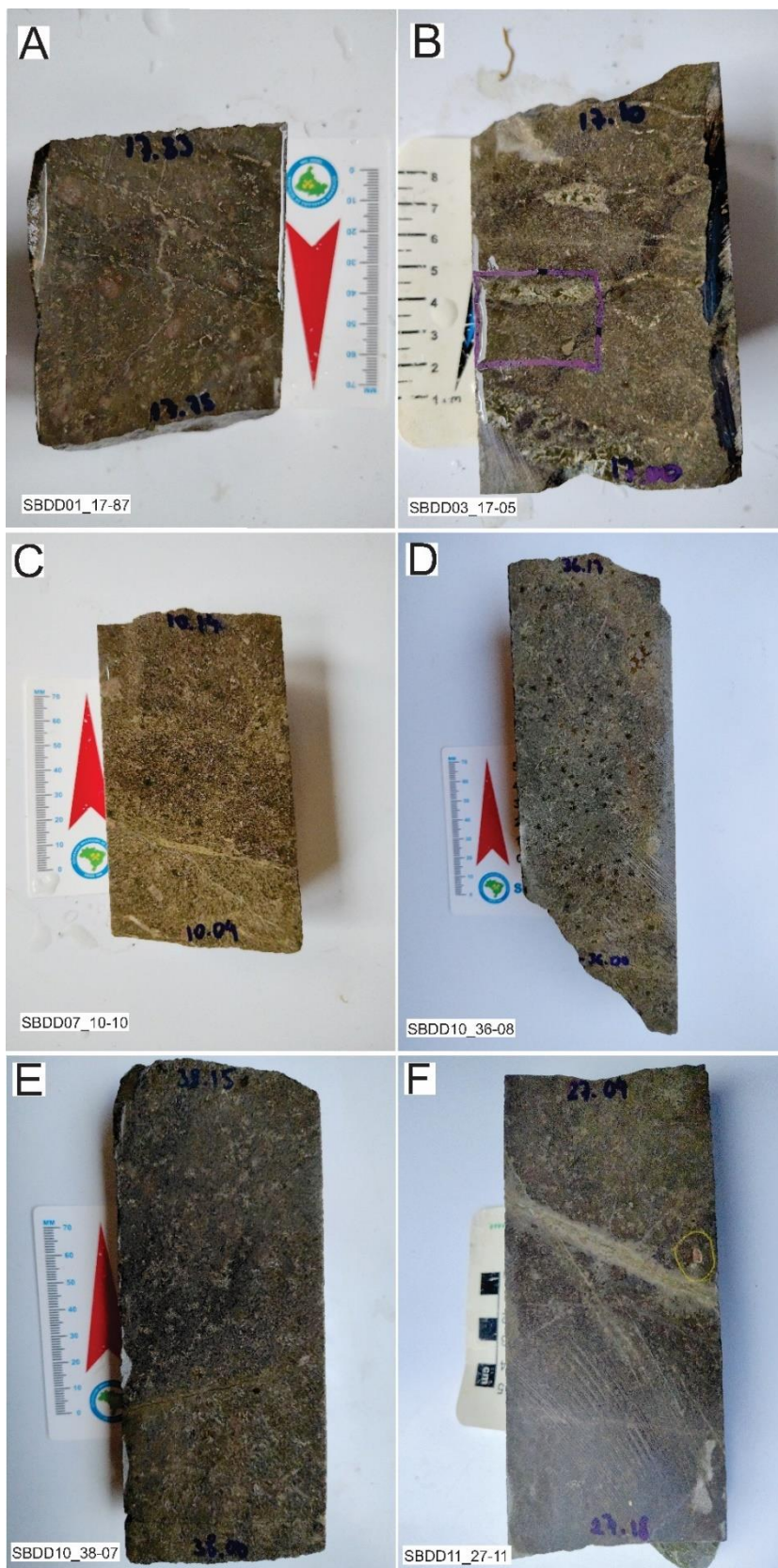
Tabela 2 – Composição modal dos minerais do depósito Soberbo.

Soberbo					
Minerais	% Modal	Frequencia	Tam. Cristais	Tipo	Alteração
Ortoclásio	30 - 40%	A.P.	2 - 5mm	Es.	Ilita-Caolinita
Nefelina	20 - 30%	A.P.	1 - 3mm	Es.	zeolitas - Caolinita
Aegirina	8 - 15%	A.P.	2 - 5mm	Es.	Ox./Hidro. Fe
Calcita	5 - 8%	A.P.	1 - 3mm	Sec./Prec.	-
Leucita	<1%	Ev.	2 - 5 mm	Ac.	Ox./Hidro. Fe
Arfvedsonita	<1%	Ev.	1 - 3 mm	Ac.	-
Titanita**	1 - 3%	Fr.	2 - 4 mm	Ac.	rontgenita/rinkita
Apatita**	1%	Fr.	2 - 3 mm	Ac.	-
Zircão**	<1%	Rr.	1 mm	Ac.	rontgenita/rinkita
Rinkita**	?	Rr.	1 - 2 mm	Sec.	-
Rontgenita**	?	Rr.	1 - 3 mm	Sec.	-
Galena	?	Rr.	1 - 3 mm	Sec./Prec.	-
Pirita	?	Fr.	1 - 5 mm	Ac./Sec.	-
Ankerita	?	Rr.	2 - 3 mm	Sec./Prec.	-
Estroncianita	?	Rr.	2 - 3 mm	Prec.	-
Fluorita	1 - 6%	A.P.	1 - 4 mm	Prec.	-
Zeolitas	?	A.P.	2 - 5mm	Sec.	-
Caulinita	?	A.P.	2 - 4mm	Sec.	-
Illita	?	A.P.	2 - 5mm	Sec.	-
Ox./Hidro. Fe	5 - 10%	A.P.	2 - 4mm	Sec.	-

?= não estimado; A.P. = Sempre presente; Ev. = Eventual; Fr.= frequente; Rr.= raro;
 Es.= Essencial; Ac.= Acessório; Sec.= Secundário; Prec.= precipitado
 hidrotermal; * = não presente; **= Portadores de ETR;

A figura 23 apresenta as amostras coletadas dos respectivos furos de sondagem, demonstrando as características observadas em amostra de mão, como veios e vênulas, a granulação fina das amostras e a presença de minerais arredondado

Figura 23 - Amostras de mão coletadas dos furos de sondagem do depósito Soberbo. A) Fonólito; B) Fonólito; C) Correspondente Hipabissal Egirina Nefelina Sienitos; D) Nefelina Fonólito; E) Egirina Nefelina Fonólito; F) Egirina Nefelina Fonólito.

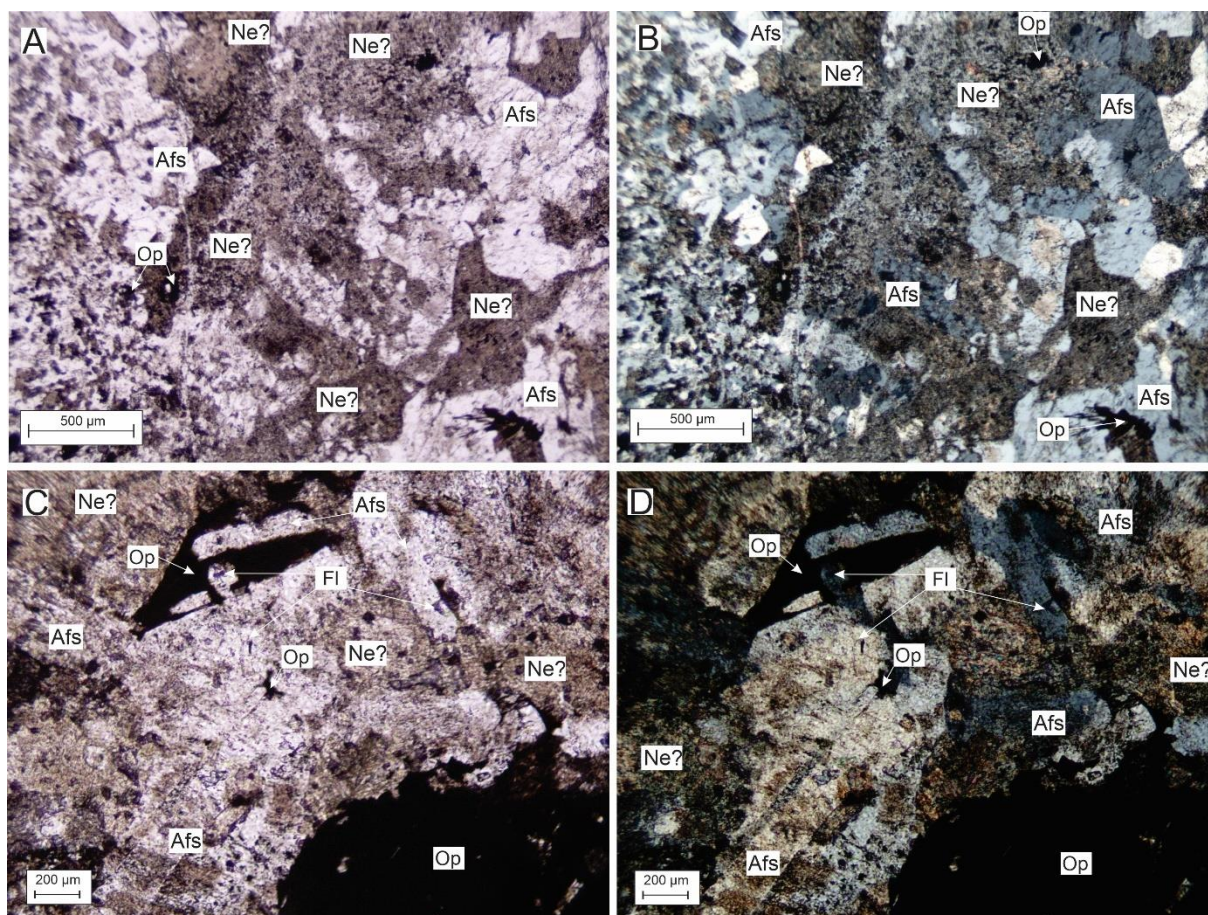


5.1.2.1 Minerais Essenciais

O feldspato alcalino identificado na rocha é o ortoclásio. É o mineral de maior expressividade nas rochas, apresenta os cristais com tamanhos de 2-5mm em todos os litotipos. Ocorrem como cristais prismáticos com formato tabular e compõe entre 40-60% da composição modal das rochas analisadas, apresentando uma trama intersticial (Figura 24). Assim como no depósito Capão do Mel os cristais de ortoclásio apresentam uma “sujeira” marrom a creme, que gera uma certa turbidez na lâmina, possivelmente relacionada a alteração secundária com a formação de caulinita e illita.

Inclusões são bastante frequentes nos cristais de ortoclásio, possivelmente sendo pirritas, goethita, óxidos de manganês e oxi-hidróxidos de ferro, além ainda da presença de fluoritas (Figura 24c).

Figura 24 – Fotomicrografia representativa de feldspatos encontrada nas rochas. A) Imagem a nicóis descruzados de grandes cristais de feldspato e de possivelmente nefelina, além de opacos; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Imagem em detalhe de feldspatos e de possíveis nefelinas, com inclusões de opacos e de fluoritas, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Fl, *fluorite*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.

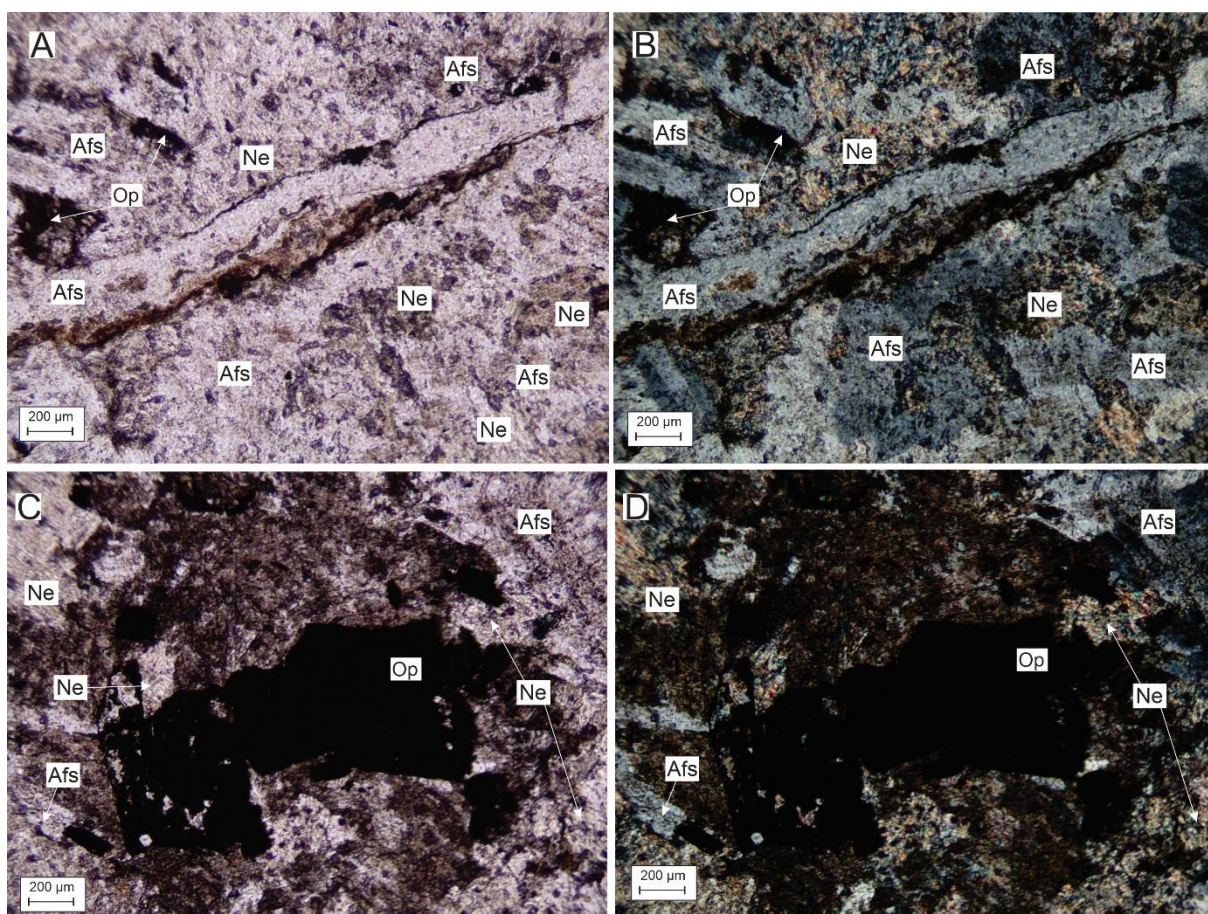


Os cristais de nefelina normalmente apresentam tamanho variando de 3-4 mm no nefelina sienito hipoabissal e 2-3 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato tabular e compõe 30-35% da composição modal das rochas analisadas. Entretanto em todas as lâminas estudadas a nefelina não apresenta as características habituais. Geralmente ocorrem com coloração castanha a nicóis descruzados e a nicóis cruzados apresenta birrefringência moderada com acículas internas, indicando que a nefelina passou por um processo de alteração e o mineral formado possivelmente é do grupo da zeólita devido a seu habito fibroso e alta birrefringência, podendo ser natrolita ou thonsonita (Figura 25).

Assim como no feldspato, inclusões são bastante frequentes e muitos são opacos, possivelmente sendo pirita, goethita, óxidos de titânio e oxi-hidróxidos de ferro, além ainda da presença de fluorita de coloração leve mente roxa com habito granular, como pode ser visto na figura 25a, c.

Figura 25 - Fotomicrografia representativa de nefelina encontradas nas lâminas do deposito.

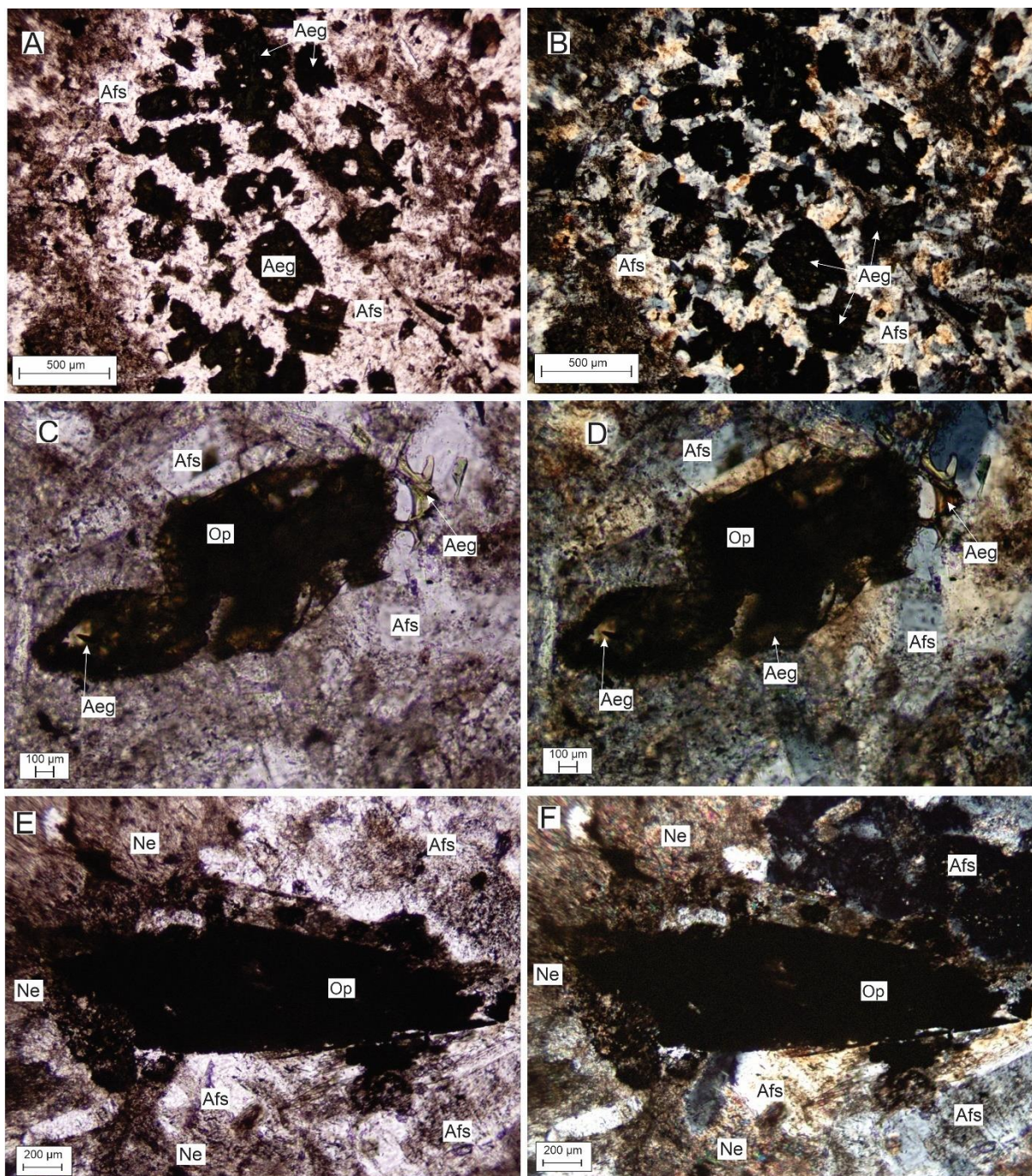
A) Nefelinas encontradas parcialmente preservadas próximas a veio de feldspato, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Nefelinas preservadas ao redor de um possível cristal de nefelina alterado ou preenchido por minerais opacos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



Os cristais de egirina normalmente apresentam tamanho variando de 2-4 mm nos sienitos e 1-4 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais, com formato prismático e compõe 5-10% da composição modal das rochas analisadas (Figura 26). A egirina muitas vezes é encontrada apenas como esqueletos, mantendo parcialmente a sua forma prismática, muitas vezes são parcialmente substituídas por minerais opacos e argilo minerais, podendo ser oxi-hidróxidos de ferro, piratas, galenas, caulinita etc.

A grande parte das egirinas são completamente alteradas para minerais opacos e muitas vezes essa alteração também é associada a formação de argilominerais, tanto nas bordas quanto no interior dos minerais (Figura 26e). No fonólito é observado que os cristais de egirina são alterados para argilominerais, com uma leve coloração marrom escuro a marrom amarelado, os argilominerais são possivelmente são caulinita e minoritariamente illita.

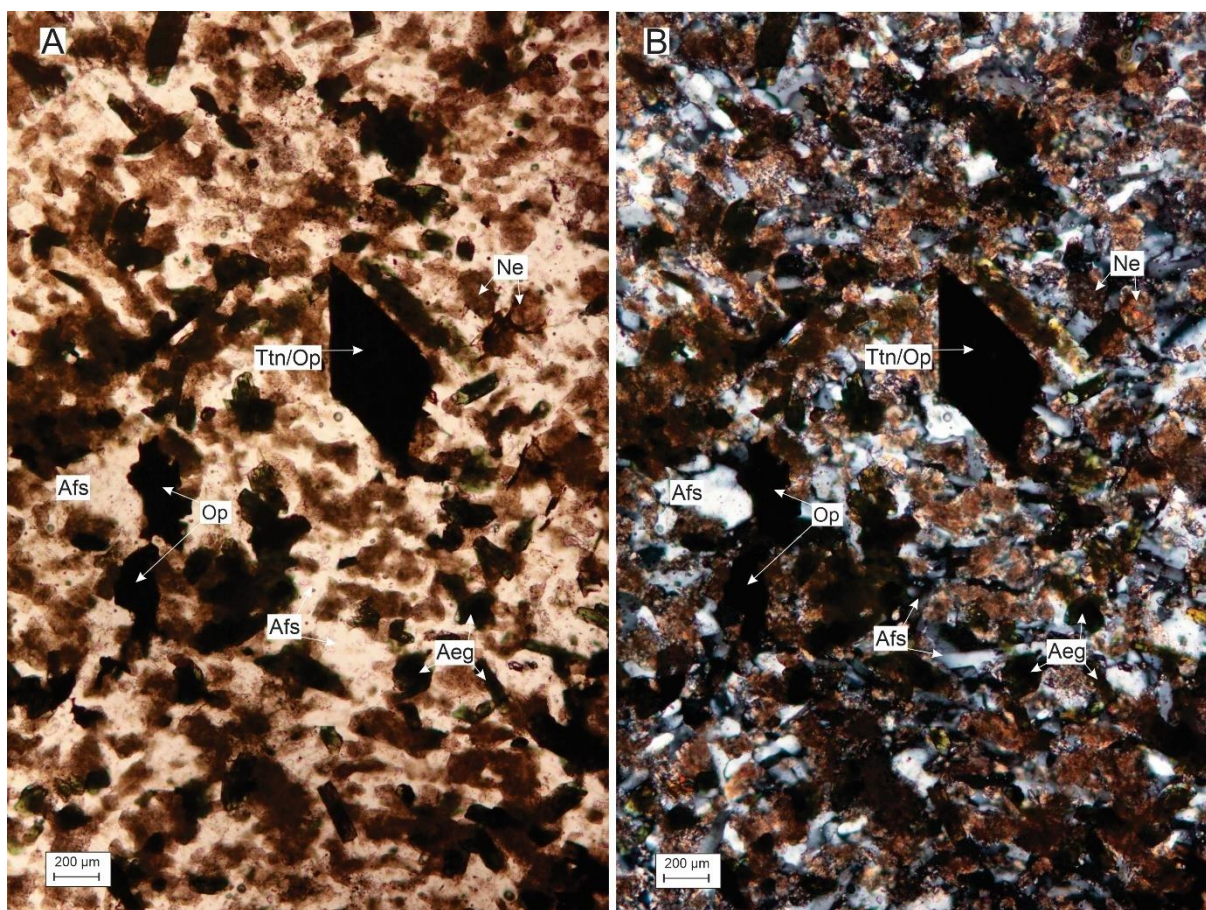
Figura 26 – Fotomicrografia representativa das egrinas encontradas nas rochas do depósito. A) Aglomerado de egrinas rodeado por feldspatos, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Imagem de uma egrina parcialmente alterada rodeada por feldspatos, nicóis descruzados; D) Mesma localidade nicóis cruzados; E) Imagem representativa de um cristal de egrina totalmente alterado para mineral opaco; nicóis descruzados; F) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Afs, *alkali feldspar*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



5.1.2.2 Minerais Acessórios

A titanita é menos frequente, mas é observada em algumas lâminas, apresentam tamanho variando de 2-3 mm nos sienitos e 1-3 mm no fonólito. Ocorre muitas vezes alteradas e totalmente degradadas apenas remanescendo o seu hábito cuneiforme característico (Figura 27), compõe menos de 1% da composição modal rocha. Os minerais opacos tendem a ocupar as vacâncias geradas da alteração da titanita ou de, sendo óxidos e hidróxidos de ferro e titânio.

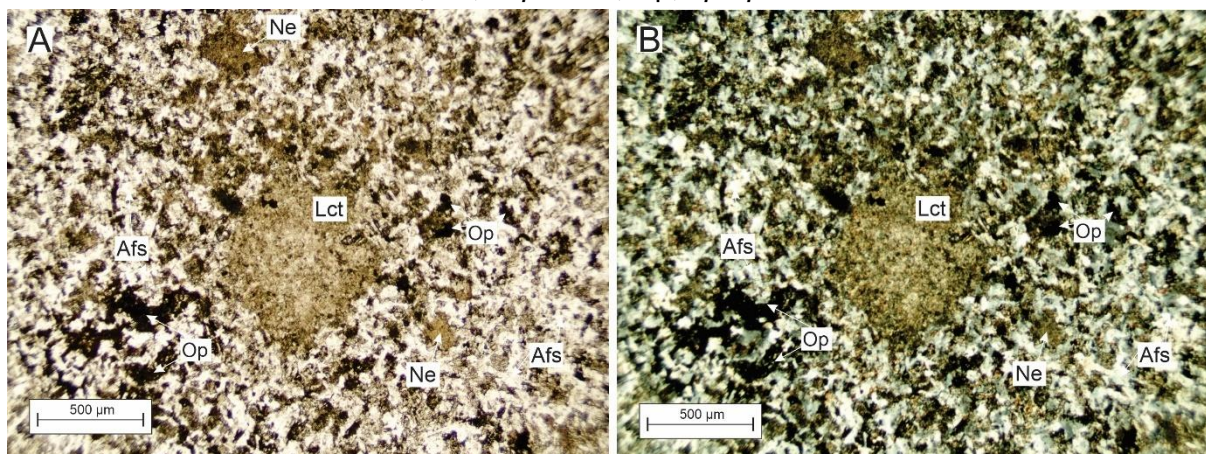
Figura 27 – Fotomicrografia representativa de titanita encontrada nas lâminas. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis descruzados. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Afs, *alkali feldspar*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mine ral*; Ttn, *titanite*.



A leucita é identificada na rocha como minerais arredondados de tamanho entre 1-3 mm, e não é observado em todas as rochas (Figura 29). Apresenta coloração amarelo pálido a creme, ocorre como cristais anhedrais de formato granular, compreendem cerca de menos de 1% da composição modal da rocha. Normalmente apresentam inclusões de minerais opacos como os oxi-hidróxidos de ferro e algumas

vezes ocorrem inclusões de carbonato formando agregados microcristalinos de coloração cinza claro, esses agregados apresentam uma alta birrefringência.

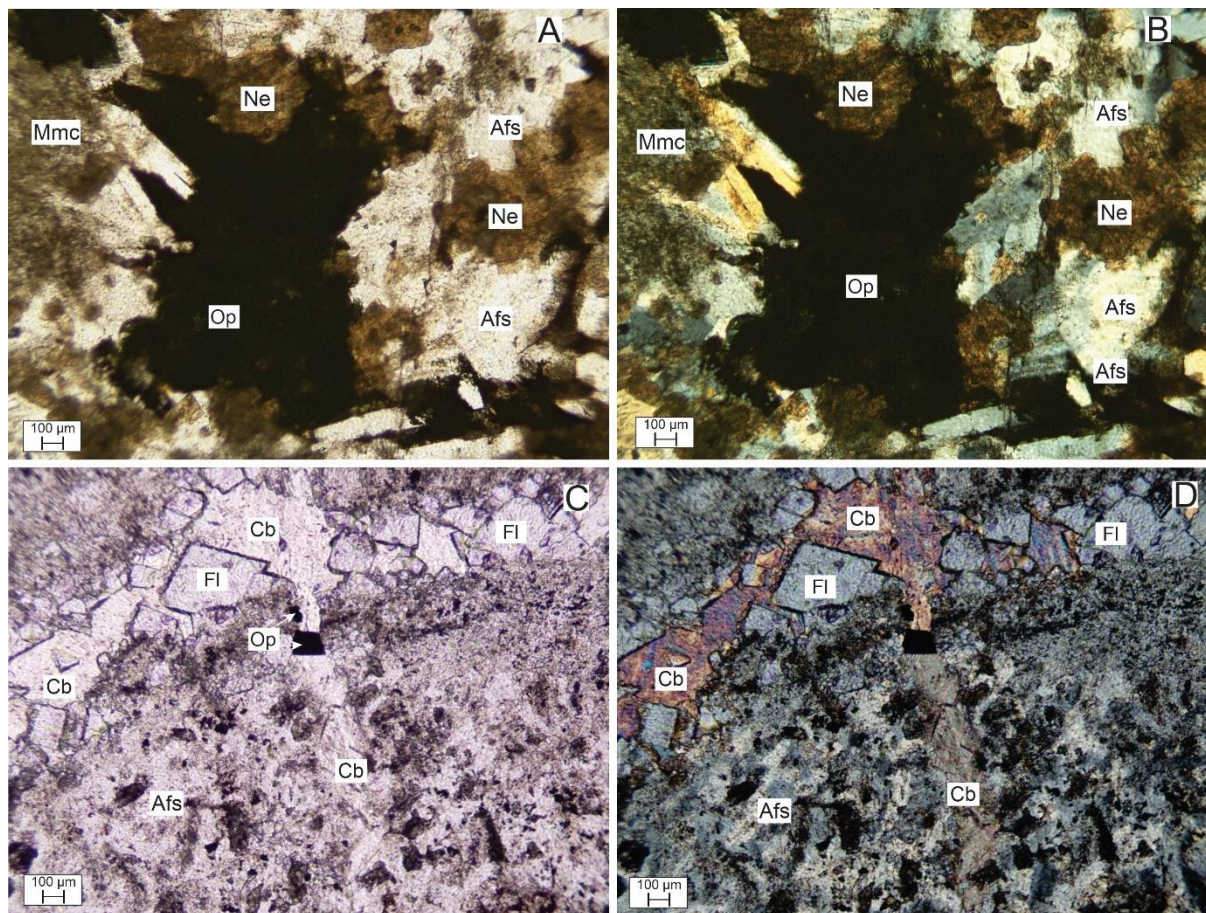
Figura 29 – Fotomicrografia representativa da possível leucita encontrada nas lâminas do depósito. A) Nicóis descruzados; B) Nicóis cruzados. Abreviação: Afs, *alkali feldspar*; Lct, *Leucite*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



Os minerais opacos em luz refletida foram identificados como pirita, galena e oxi-hidróxidos de ferro e titânio. A maioria dos opacos observados são produto da alteração de minerais primários (principalmente egrina e outros minerais máficos) ou acessórios (e.g., titanita) (Figura 28). Entretanto alguns cristais de minerais opacos são cristais de sulfeto (pirita e galena) aparentemente de origem primária e em alguns casos, secundária (Figura 30).

Os cristais de sulfeto estão disseminados ocorrem na forma de cristais cúbicos quando bem formados, ocorrem em diversos tamanhos variando de 1-6mm, o habito normalmente é maciço a granular e compõem cerca de 5-10% dos minerais analisados nas rochas. Em algumas ocasiões agregadas de minerais opacos são encontrados em um único ponto, além de muito presentes como inclusões em outros minerais. Muitos desses minerais aparentam ser oriundos de alteração de outros minerais devido a sua forma maciça, provavelmente são sulfetos e até mesmo fosfatos (Figura 25 e 27).

Figura 30 – Fotomicrografia representativa dos minerais opacos encontrados nas lâminas. A) Imagem em detalhe de grande mineral opaco, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Detalhe de mineral opaco cubico bem formado em veio de carbonato, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis descruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Fl, *fluorite*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



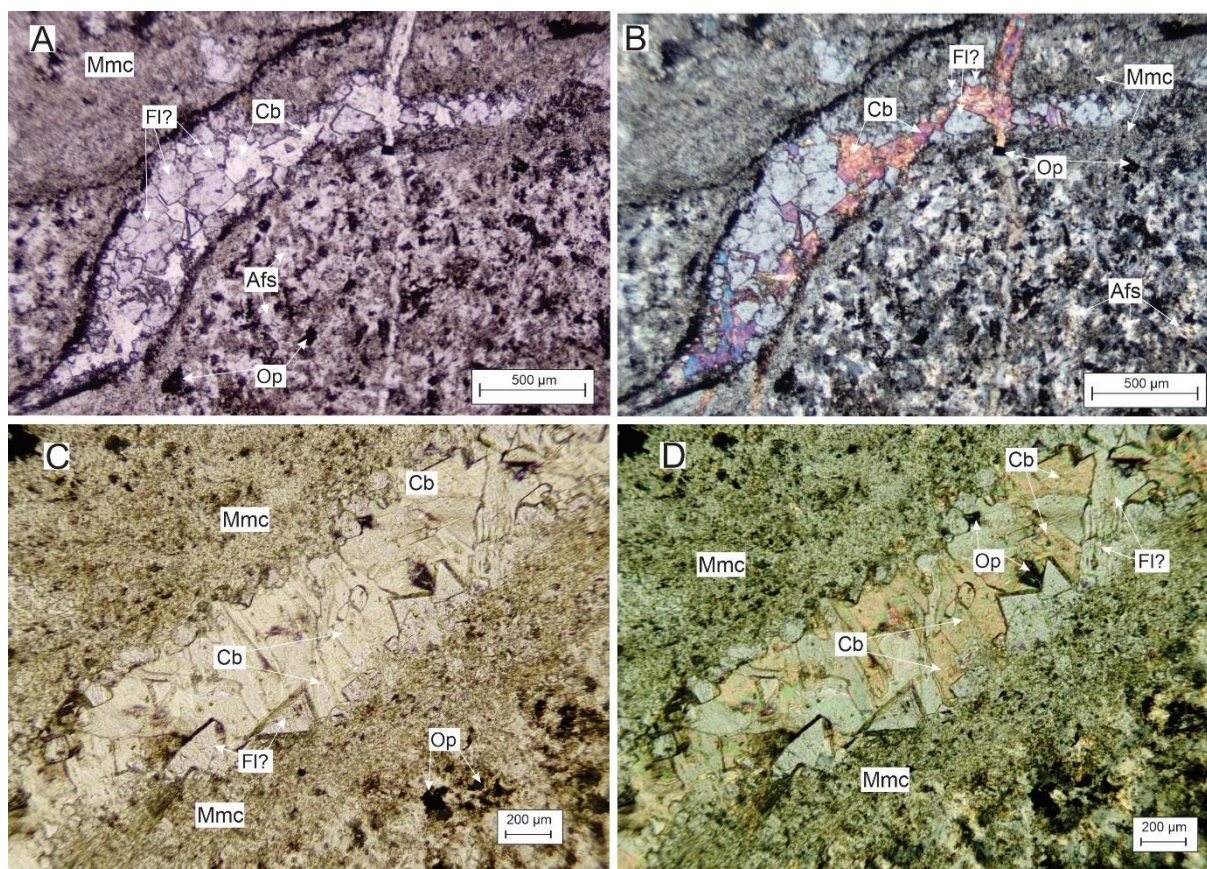
5.1.2.3 Minerais Secundários

Os carbonatos observados no depósito são a calcita e minoritariamente a dolomita, com ocorrências esporádicas de estroncianita, apresentam tamanho variando de 1-3 mm no sienito e 1-4 mm no fonólito. Ocorrem majoritariamente como cristais subhedrais, com formato granular e compõe 1-5% da composição modal das rochas analisadas. Quando bem formados apresentam a sua clivagem perfeita característica, a birrefringência extrema e o relevo forte negativo (Figura 31).

Assim como no Capão do Mel carbonatos são encontrados em praticamente todas as lâminas, porém com o maior diferencial é que no depósito Soberbo os carbonatos são muito mais frequentes preenchendo veios e fraturas do que

disseminados nas rochas (Figura 31). A inclusão de carbonatos em outros minerais ocorre, porém é menos frequente. São bastante frequentes com minerais opacos, principalmente nos veios ou próximos a eles (Figura 30), minerais como a pirita, galena e oxi-hidróxido de ferro e manganês são os minerais que compõem os opacos.

Figura 31 – Fotomicrografia representativa de carbonatos encontrados nas lâminas. A) Imagem de veio de carbonato com fluoritas bem formadas, nicóis descruzados; B) Mesma localidade a nicóis cruzados; C) Veios de carbonato com cristais de fluorita bem formados, nicóis descruzados; D) Mesma localidade a nicóis cruzados. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Fl, *fluorite*; Ne, *nepheline*; Op, *opaque mineral*.



Os cristais de fluorita apresentam tamanho variando de 1-2 mm nos sienitos e 2-4 mm no fonólito. Ocorrem como cristais subhedrais e quando presentes preenchendo os veios são euhedrais, com formato granular, maciço e em algumas localidades fibroso preenchendo vênulas, compõe 1-4% da composição modal das rochas analisadas. É presente em todas as lâminas muitas vezes apenas como inclusões (Figuras 25 e 31), mas podendo preencher veios, apresenta coloração roxa intensa ou incolor quando bem cristalizado (Figura 31a), as variantes incolores foram identificadas devido a seu hábito octaédrico.

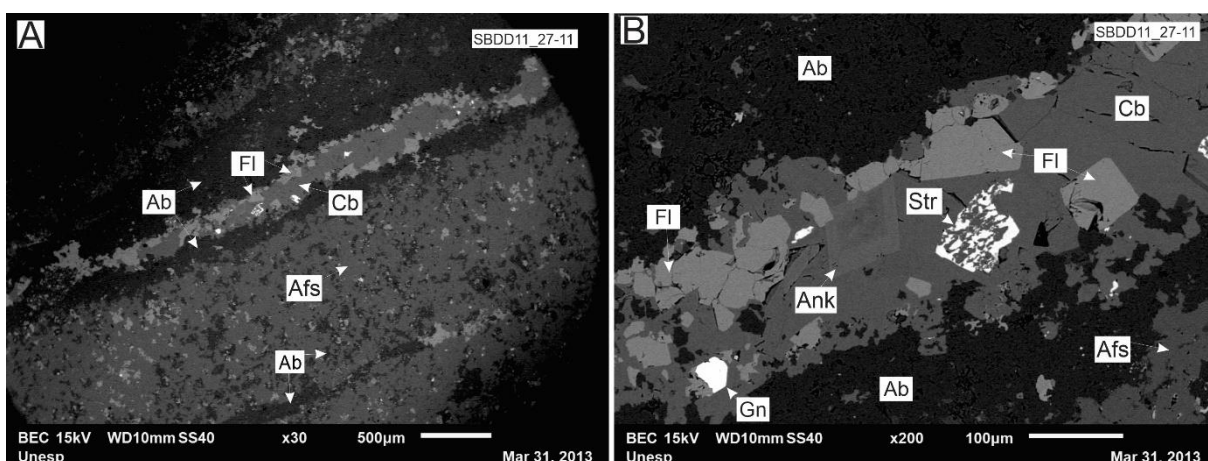
5.2 Evidências de alteração hidrotermal

Nos dois depósitos estudados há evidências de alteração hidrotermais das rochas. A alteração parece ser pervasiva na rocha alterando de maneira generalizada os minerais mais susceptíveis, mesmo em rochas onde a textura ígnea está relativamente bem preservada. As evidências mais claras do processo de alteração é a presença de veios e vênulas de fluorita e carbonato, com alteração metassomáticas nas bordas.

Os veios observados nas amostras estudadas possuem espessura variando de 1 a 4 cm. São compostos por fluorita, calcita e ankerita, podendo conter siderita, estroncianita e galena (Figura 32b). Nos veios mais espessos a porção mais próxima das bordas é marcada por albitização da rocha indicando metassomatismo sódico (Figura 32a), que é caracterizada por forte lixiviação marginal ao veio e pela destruição quase que completa dos minerais máficos (egirina).

Em zonas intermediárias os minerais máficos estão parcialmente destruídos e alterados para óxidos e hidróxidos de ferro, manganês e titânio. A nefelina, nessa porção está alterada para albita quando a lixiviação é extrema e natrolita em casos menos extremos.

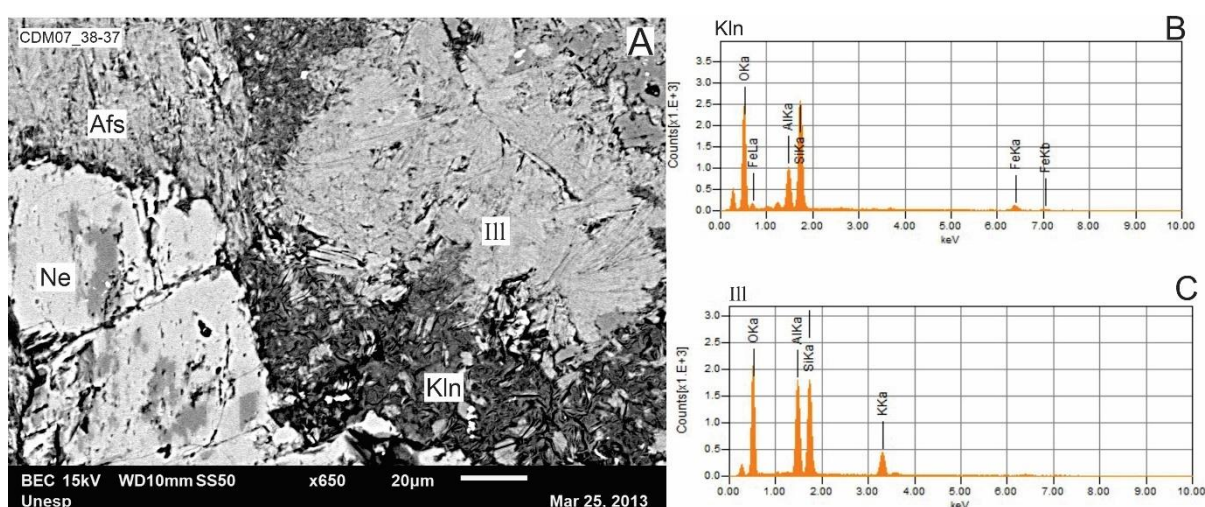
Figura 32 – Imagem de MEV representativa de um veio de carbonatos com fluoritas e sulfetos. A) Imagem mais ampla do veio onde é possível notar o metassomatismo gerando albitana borda do veio; B) Detalhe do veio. Abreviações: Ab, albita; Afs, *alkali feldspar*; Ank, ankerite; Cb, *carbonate mineral*; Fl, *fluorite*; Gn, *galena*; Str, *strontianite*.



O feldspato é sempre relacionado, bordejado ou apresenta inclusões de minerais com uma textura fibrosa, com aparência de pétalas, que possivelmente são argilo minerais oriundos da alteração hidrotermal. Com o uso do MEV foi possível observar

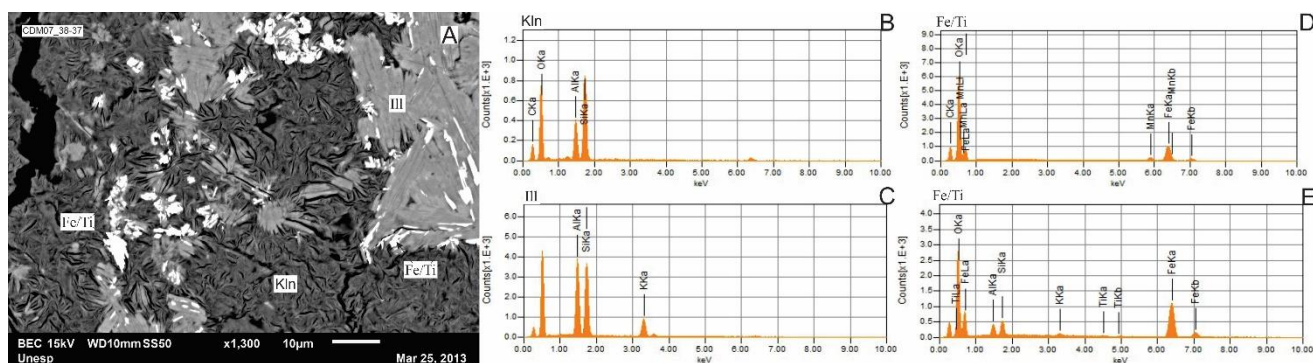
sua composição, com isso foi identificado dois tipos principais, nos quais um apresenta potássio, com a concentração do alumínio equiparável a concentração de sílica; e os argilominerais que não apresentavam potássio em sua composição, apenas alumínio e sílica. Provavelmente esses minerais formados da alteração do feldspato e mas não somente da sua alteração, são a illita e a caulinita respectivamente (Figura 33).

Figura 33 – Imagem de MEV apresentando os dois diferentes argilo minerais encontrados nas lâminas. A) Imagem da localidade; B) Composição estimada coletada por EDS da caulinita; C) Composição estimada coletada por EDS da illita. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Ill, *illite*; Kln, *kaolinite*; Ne, *nepheline*.



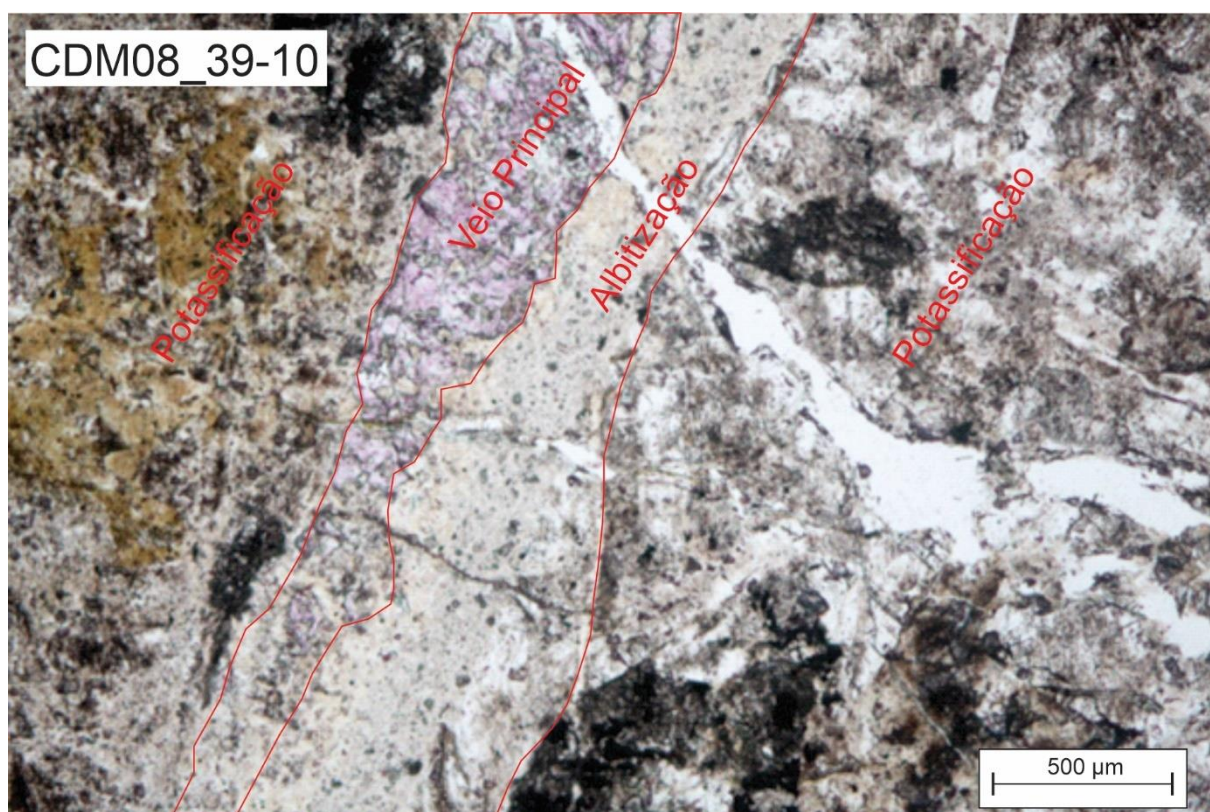
Além disso foi observada a concentração de oxi-hidróxidos de ferro e titânio nas acículas de caulinita e em algumas porções de illita, o que pode ser uma correlação entre as alterações de argilização e a de geração de minerais opacos (Figura 34).

Figura 34 – Imagem de MEV representativa das alterações para argilo minerais. A) Imagem; B) Composição estimada coletada por EDS da caulinita; C) Composição estimada coletada por EDS da illita; D) Composição estimada coletada por EDS do óxido de Fe; E) Composição estimada coletada por EDS do óxido de Fe e Ti. Abreviações: Ill, *illite*; Kln, *kaolinite*.



A alteração hidrotermal pode ser intensa a ponto de destruí completamente a estrutura cristalina dos minerais, criando espaços e lacunas que são preenchidos pela formação de novos minerais secundários. A alteração hidrotermal em algumas localidades é tão intensa ao ponto de ser criado um veio composto de fluorita e carbonato, com bordas de albitização, ou seja, de metassomatismo sódico e ainda nessas bordas ser concentrado o potássio retirado dos minerais alterados (Figura 35).

Figura 35 – Fotomicrografia representativa das bordas de alteração ocorridas nos veios de fluorita.



5.3 Minerais portadores de Terras Raras

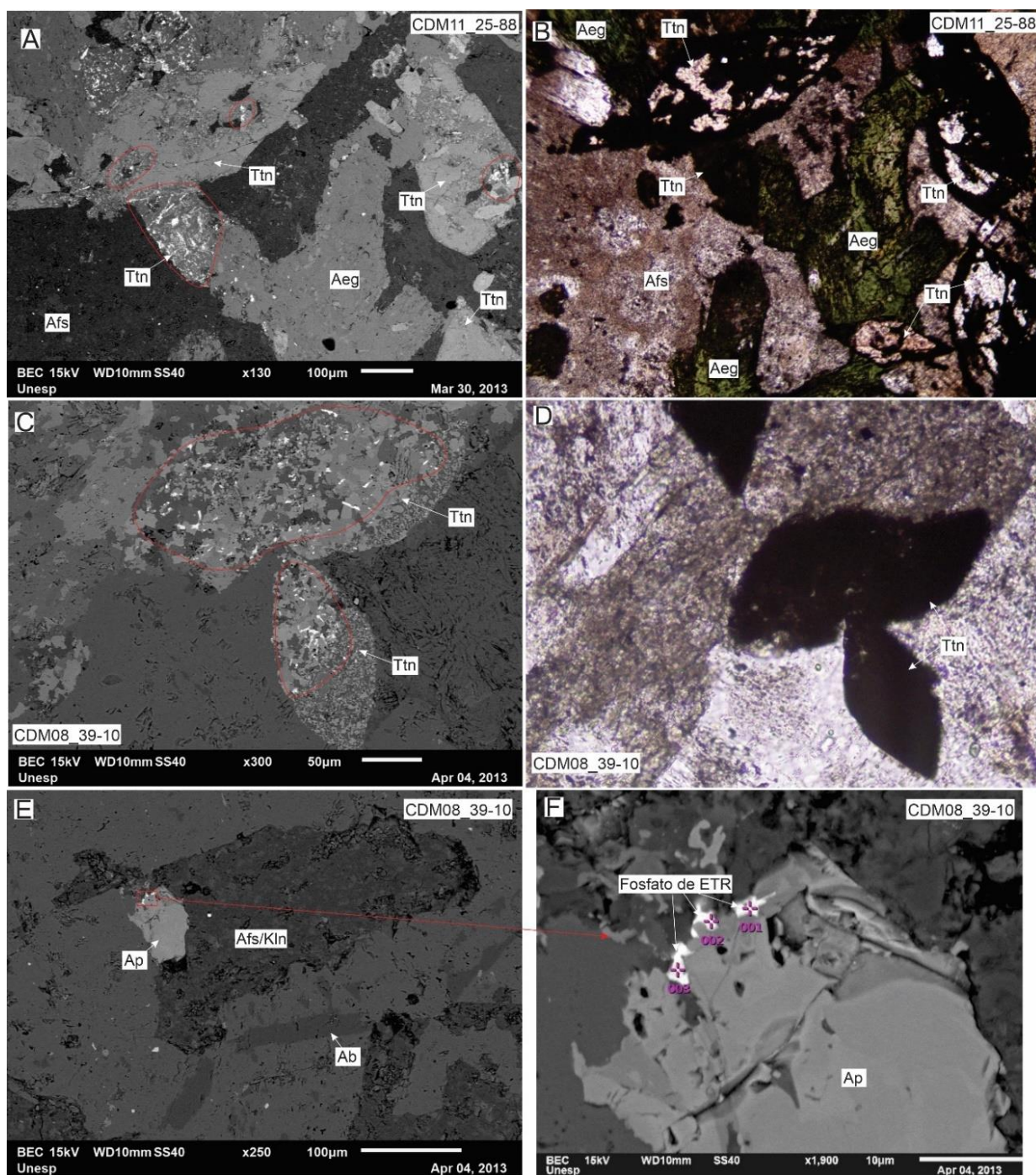
A alteração hidrotermal realiza um papel importante no desarranjo das estruturas cristalinas dos minerais primários portadores de ETR, causando a liberação desses elementos. Porém ao mesmo tempo causou a criação de minerais secundários portadores de ETR.

5.3.1 Capão do Mel

Os minerais primários identificados como portadores de ETR no depósito Capão do Mel são: a titanita e a apatita. Os minerais primários foram alterados apresentando,

gerado dessa alteração minerais rico em ETR como os fluorcarbonetos (Figura 36). A titanita é esparsamente relatada na literatura como sendo portadora primaria de elementos terras raras. Na figura 36 a e c os círculos em vermelho representam minerais de titanita que estão alterados e apresentam concentração ETR como o Ce, La e Nd, indicando que a alteração é responsável pela liberação dos elementos. Foram encontrados em menores concentrações e com menor frequência fosfatos de cálcio que apresentavam Ce e La, também de fosfatos de cálcio que não apresentam concentrações de ETR detectáveis no MEV, possivelmente sendo uma apatita (Figura 36 e, f), que também é amplamente descrita na literatura como sendo portadora primaria destes elementos.

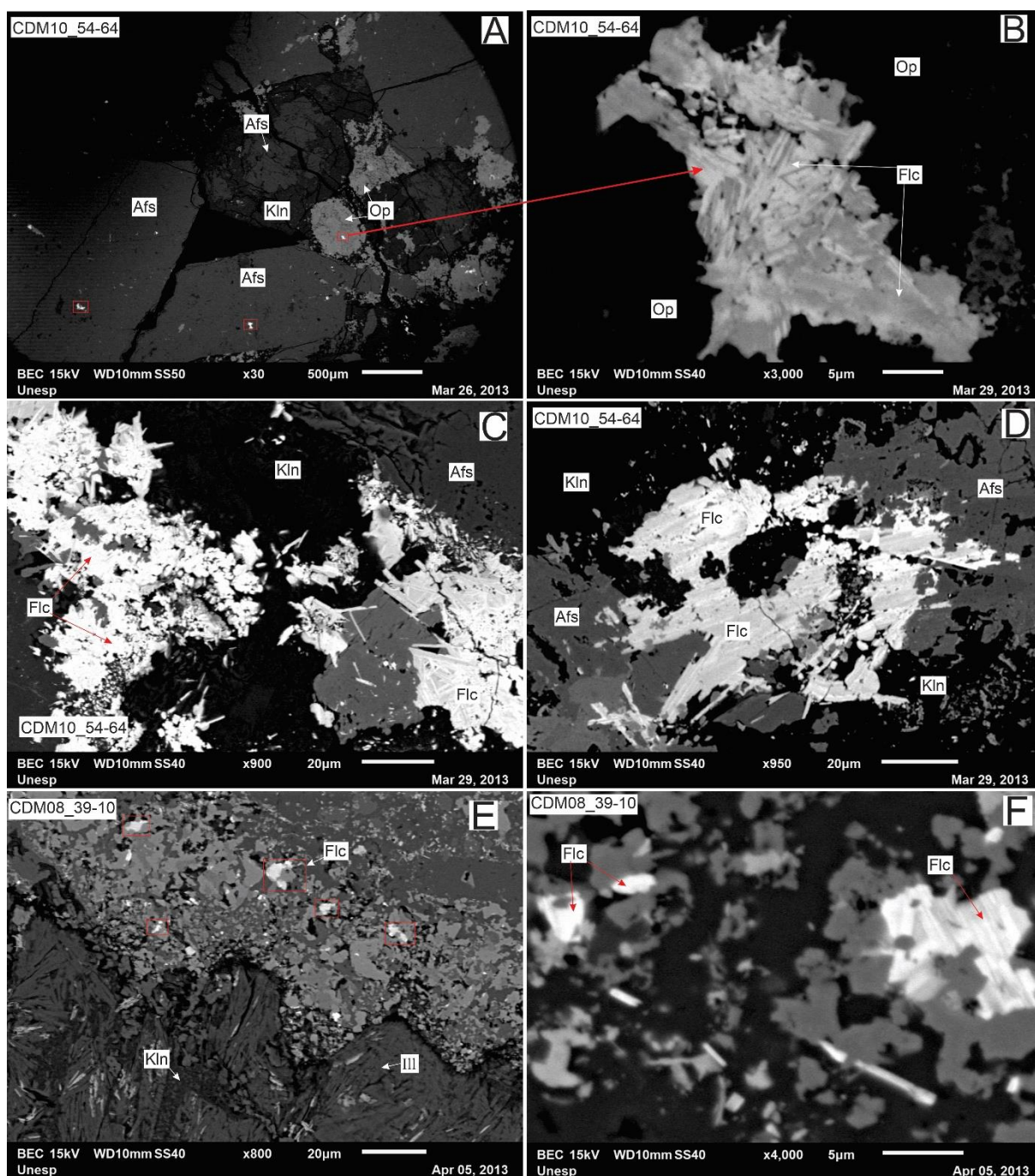
Figura 36 – Imagem de MEV representativa dos minerais portadores e de suas alterações.
 A) Minerais de titanita alterados e concentração ETR; B) Imagem petrográfica da mesma localidade a nicóis descruzados; C) Titanita totalmente alterada apresentando concentração de ETR; D) Imagem petrográfica da mesma localidade a nicóis descruzados; E) Apatita apresentando alteração incipiente; F) Detalhe da concentração de fosfatos com ETR devido a alteração. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Ab, *albite*; Afs, *alkali feldspar*; Ap, *apatite*; Ne, *nepheline*; Ttn, *titanite*.



Os minerais formados da alteração da titanita, e apatita são minerais secundários portadores dos ETR como a rinkita $((Ca_3Ce)Na(NaCa)Ti(Si_2O_7)_2(OF)F_2)$ e a röntgenita $(Ca_2(Ce,La)_3(CO_3)_5F_3)$, além de possivelmente britholita $(Ca_2(La,Ce,Ca)_3(SiO_4,PO_4)_3(OH,F))$, como produto de alteração da apatita, porém todas as ocorrências de alteração eram extremamente pequenas não sendo possível determinar com precisão a sua existência, devido a limitação de tamanho (Figura 37f). Para a determinação dos minerais e pontos de interesse nas lâminas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi necessário a busca de minerais que apresentavam brilho intenso, que caracterizava a presença de elementos mais densos.

Ao serem realizados as medidas de EDS foi identificada a alta concentração de cálcio e flúor como elementos maiores e como elementos menores cério e lantânio, ou seja, sendo esses minerais que carregam os ETR, podendo ser considerados como fluorcarbonatos de Ce e La (Figura 37). Em praticamente todos os artigos lidos e citados no presente trabalho os fluorcarbonatos são considerados como uma fase mineral secundária portadora, gerada pela alteração hidrotermal de minerais primários portadores de ETR, sendo facilmente destruídos pela ação intempérica (Borst et al., 2020; Guarino et al., 2021; Li et al., 2019; Lou & Ma, 2022; Melluso et al., 2017; Pan et al., 1993; Sanematsu & Watanabe, 2016a; Wang et al., 2024; Wu et al., 2023). A grande maioria desses minerais encontrados são de tamanhos muito pequenos, variando de 2 μm a 5 μm , os maiores e mais bem formados podem chegar a 70 μm , mas ainda muito pequenos (Figura 37b e c).

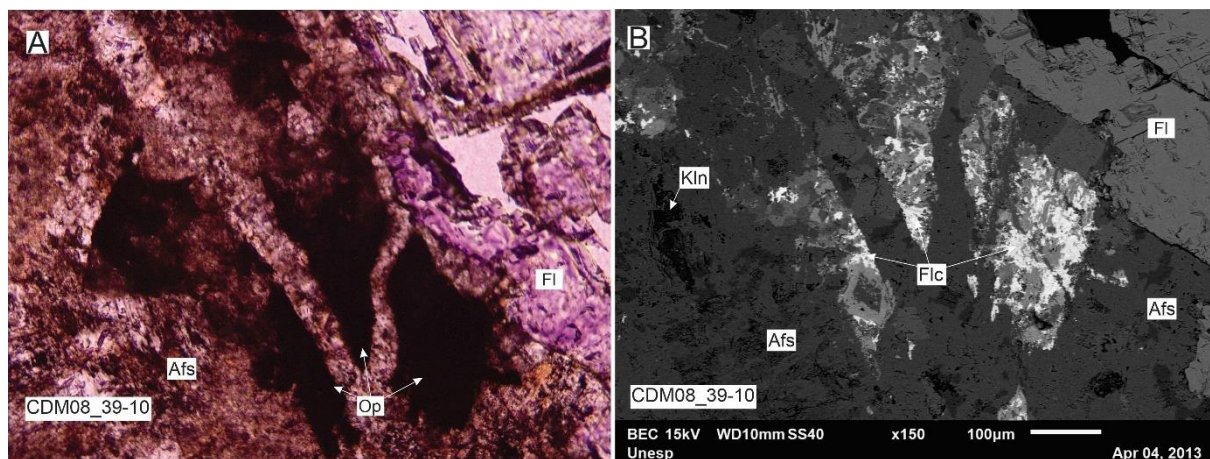
Figura 37 – Imagem de MEV representativa dos fluorcarbonatos que apresentam ETR em sua composição. A) Imagem demonstrativa do tamanho relativo dos fluorcarbonatos; B) Imagem em detalhe; C) Grande concentração de fluorcarbonatos; D) Mineral grande e bom formado; E) Relação dos fluorcarbonatos com a alteração; F) Detalhe dos fluorcarbonatos. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Flc, *fluorcarbonatos*; Ill; *illite*; Kln, *kaolinite*; Op, *opaque mineral*.



Alguns minerais foram completamente alterados, não sendo possível reconhecer nenhuma de suas características pretéritas, mas apresentam grande quantidade e concentração de fluorcarbonatos ricos em ETR. A figura 38 apresenta um caso

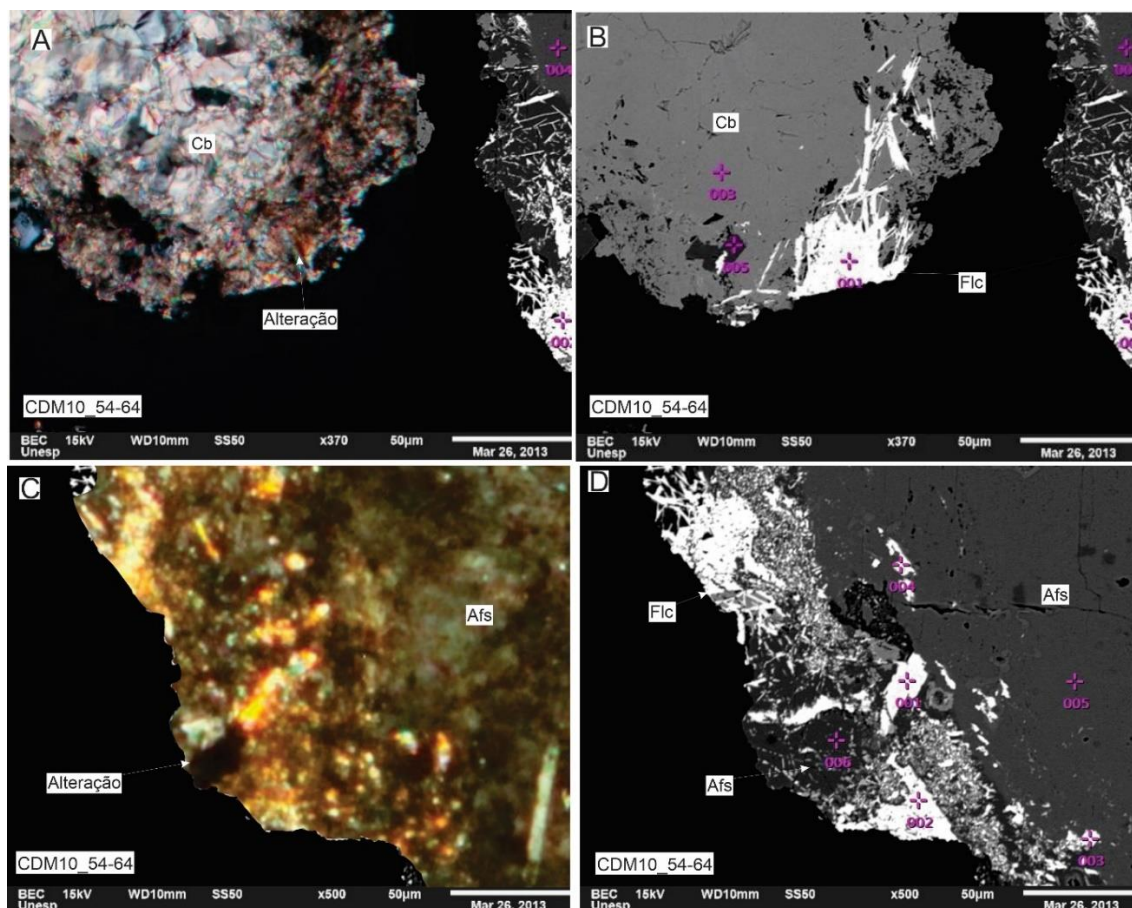
encontrado que chama bastante a atenção pela forma observada em lâmina petrográfica (Figura 38a) e o brilho intenso observado no MEV (Figura 38b).

Figura 38 – Fotomicrografia e imagem de MEV do mineral opaco que apresenta teores de ETR. A) Imagem petrográfica a nicóis descruzados do mineral opaco com forma diferenciada; B) Imagem do MEV do mesmo mineral apresentando flúor carbonetos com presença de ETR. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Flc, *fluorcarbonatos*; Fl, *fluorite*; Kln, *kaolinite*; Op, *opaque mineral*.



Evidências foram encontradas de que o transporte de ETR por fluidos hidrotermais que alteram e depositam em outros minerais, como feldspatos e carbonatos, o que pode indicar a correlação entre a alteração e deposição desses elementos. Na figura 39 são apresentados dois tipos encontrados, sendo na figura 39a o carbonato e na 39c o feldspato ortoclásio, é importante notar que na região onde se encontra os ETR (brilho intenso, Figura 39b) no carbonato são presentes minerais opacos e uma alteração de coloração amarelada.

Figura 39 – Imagem de MEV representativa da alteração e implementação de fluorcarbonatos em outros minerais. A) Carbonato apresentando aureola de alteração, nicóis cruzados; B) Imagem de MEV apresentando minerais que contém ETR; C) Feldspato apresentando aureola de alteração, nicóis cruzados; D) Imagem de MEV dos minerais de alteração que contém ETR. Abreviações: Afs, *alkali feldspar*; Cb, *carbonate mineral*; Flc, fluorcarbonatos.



A tabela 3 apresenta algumas das porcentagens de variação dos elementos contidos nesses fluorcarbonetos, presentes em algumas áreas das lâminas CDM08_39-10 e CDM10_54-64.

Tabela 3 – Porcentagem dos elementos nos fluorcarbonetos nas rochas do depósito Capão do Mel.

CDM10_54-64_AR5_det2								
Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line	
O								
F	13.30	53.84	0.37		3752	0.0195421	K	
CaO*	8.00	10.97	0.36		2581	0.0085947	K	
CeO2	78.71	35.18	1.61		10131	0.0760759	L	
Total	100.00	100.00	13.62					
Chemical formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line	
O								
F	9.70	36.88	0.52		1192	0.0119840	K	

CaO	29.05	37.42	10.11	0.68	5297	0.0340331	K
CeO2	61.25	25.70	6.94	1.89	4323	0.0626403	L
Total	100.00	100.00	17.06				

CDMDD10_54-64_AR4_det2

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	8.47	31.75	0.00	0.39	1637	0.0092573	K	
CaO	35.52	45.09	11.84	0.57	10969	0.0396532	K	
CeO2	56.01	23.16	6.08	1.39	6633	0.0540728	L	
Total	100.00	100.00	17.92					

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	7.42	30.23	0.00	0.33	1993	0.0092655	K	
CaO	30.26	41.75	10.25	0.48	12286	0.0365216	K	
CeO2	62.32	28.02	6.88	1.23	9788	0.0656114	L	
Total	100.00	100.00	17.12					

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	8.94	33.57	0.00	0.43	1511	0.0109781	K	
CaO	33.45	42.55	11.31	0.60	8822	0.0409748	K	
CeO2	57.61	23.87	6.35	1.47	5844	0.0612078	L	
Total	100.00	100.00	17.65					

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
CaO	38.96	66.21	11.88	0.79	6431	0.0390652	K	
CeO2	61.04	33.79	6.06	1.97	3859	0.0528661	L	
Total	100.00	100.00	17.94					

CDM10_54-64_AR4_det2.1

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	7.73	30.26	0.00	0.43	1298	0.0090817	K	
CaO	33.35	44.26	11.16	0.60	8762	0.0391872	K	
CeO2	58.92	25.47	6.42	1.52	5958	0.0600923	L	
Total	100.00	100.00	17.58					

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	9.11	39.46	0.00	0.51	1096	0.0125350	K	
CaO	17.30	25.37	6.36	0.63	2702	0.0197540	K	
CeO2	73.59	35.17	8.82	2.15	4531	0.0746928	L	
Total	100.00	100.00	15.18					

CDM10_54-64_AR3_det2

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K ratio	Line
O								
F	4.58	23.87	0.00	0.22	1794	0.0083414	K	
CaO	23.44	41.36	8.39	0.36	12758	0.0379253	K	
La2O3*	24.35	7.39	3.00	0.69	5976	0.0358265	L	

CeO2	47.62	27.38	5.55	0.90	10113	0.0677901	L		
Total	100.00	100.00	16.95						
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	7.33	46.18	0.00	0.20	4156	0.0193246	K		
La2O3*	32.32	11.87	4.77	0.74	8843	0.0530157	L		
CeO2	60.35	41.95	8.43	0.95	14266	0.0956319	L		
Total	100.00	100.00	13.19						
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	6.48	41.09	0.00	0.20	3214	0.0176318	K		
CaO*	3.11	6.67	1.30	0.19	1664	0.0058348	K		
La2O3*	33.48	12.38	4.81	0.77	8326	0.0588858	L		
CeO2	56.93	39.85	7.74	0.98	12232	0.0967326	L		
Total	100.00	100.00	13.85						
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
SiO2	25.40	45.50	5.87	0.50	9643	0.0138413	K		
CaO	11.08	21.26	2.74	0.29	5206	0.0154760	K		
La2O3*	21.93	7.24	1.87	0.73	4742	0.0284259	L		
CeO2*	41.59	26.01	3.36	0.91	7771	0.0520927	L		
Total	100.00	100.00	13.84						
CDMDD11_25-88_AR2_det1.1									
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	5.84	28.28	0.00	0.25	2114	0.0098302	K		
CaO	26.09	42.80	9.44	0.37	13460	0.0400137	K		
La2O3*	16.14	4.56	2.01	0.70	3754	0.0225071	L		
CeO2	38.96	20.82	4.60	0.89	7845	0.0525901	L		
Nd2O3*	12.97	3.55	1.56	0.83	2449	0.0187064	L		
Total	100.00	100.00	17.62						
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	4.38	22.30	0.00	0.28	1397	0.0064980	K		
CaO	25.22	43.48	8.85	0.41	11445	0.0340220	K		
La2O3*	20.14	5.98	2.43	0.83	4112	0.0246532	L		
CeO2	50.27	28.24	5.75	1.06	8885	0.0595568	L		
Total	100.00	100.00	17.03						
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	4.82	26.49	0.00	0.23	1965	0.0091388	K		
CaO	20.61	38.36	7.69	0.34	11244	0.0334252	K		
La2O3*	21.85	7.00	2.81	0.70	5421	0.0324987	L		
CeO2	39.82	24.15	4.84	0.89	8547	0.0572903	L		
Nd2O3*	12.90	4.00	1.61	0.84	2596	0.0198286	L		
Total	100.00	100.00	16.95						

Com a utilização desses dados e orientação das áreas de interesse foi realizada a Microsonda dos minerais portadores primários e secundários para melhor determinação das suas composições químicas. Foram realizadas análises em 160 pontos em minerais portadores de ETR, minerais formadores de rocha e de suas respectivas alterações, assim como em outros minerais que apresentavam alguma característica interessante a ser analisada.

As análises realizadas que apresentaram teores relevantes de ETR foram separadas e tratadas, sendo interpretado qual a distinção mineralógica para cada ponto analisado. Ao todo foram 65 pontos, a tabela 4 apresenta alguns dados coletados na Microsonda e caracterizados por diferentes minerais, sendo mostrados três dados representativos por mineral.

Tabela 4 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, *apatite*; Ttn, *titanite*.

No.	11	37	101	15	73	43	25	26	24	95	94	98
Comment	Rinkita	Rinkita	Rinkita	Röntgenita	Röntgenita	Röntgenita	Ap	Ap	Ap	Ttn	Ttn	Ttn
F	5.0262	2.1018	4.6048	3.7486	4.2248	4.2158	1.6154	1.8807	3.117	0.361	0.3951	0.6357
MgO	-	5.2015	0.031	-	0.0432	0.0006	-	0.0026	0.0055	0.0496	0.0335	0.0304
Na2O	-	0.0432	0.0324	-	-	-	0.497	0.4624	0.1511	0.0818	0.1205	0.2068
SiO2	17.1884	5.2327	4.0107	0.0406	0.6997	0.1241	0.2334	0.5564	0.2439	28.8762	28.924	29.4737
Al2O3	4.3903	0.1911	0.4128	0.0035	0.143	0.0321	0.0074	0.0048	0.0628	1.0755	1.1084	0.8724
La2O3	11.9944	2.641	16.3022	19.0498	16.3519	17.8288	1.8281	1.8698	7.4427	0.1946	0.4434	0.4254
Ce2O3	26.4643	4.9211	28.5369	31.403	28.1651	32.6208	1.4679	1.8653	6.4244	0.9239	1.3719	1.1764
Pr2O3	2.8995	0.3787	2.6488	2.9474	2.4678	3.193	0.1327	0.239	0.3292	0.1264	0.1769	0.1494
Nd2O3	10.6625	1.3921	9.6146	10.0335	7.643	11.2489	0.1568	0.2408	0.7857	0.8219	0.7266	0.537
Sm2O3	1.0169	0.1256	0.8153	0.9472	0.7201	1.1975	0.0604	-	0.0568	0.0891	0.1187	-
Gd2O3	0.636	-	0.3887	0.5391	0.567	1.1137	-	0.1444	0.018	0.1269	0.0758	0.0065
Er2O3	-	-	-	-	0.0557	-	0.0989	-	0.0749	-	-	-
Tb2O3	-	-	0.0762	0.1684	-	0.0177	-	-	0.0355	-	-	-
Dy2O3	0.1611	0.0124	0.2948	0.2713	0.1065	0.2585	0.1051	0.0434	0.0963	0.0362	0.0816	0.0897
Yb2O3	-	0.0336	0.0592	-	0.0198	-	-	0.0347	0.0105	-	0.016	-
UO2	0.2931	0.031	-	0.0225	-	-	-	-	0.01	-	-	0.0199
ThO2	1.7127	1.1948	0.7031	1.3154	0.7931	1.5951	0.0105	0.0059	0.6762	0.007	0.0084	0.0061
CaO	10.4055	26.9398	12.9463	15.604	18.6817	16.2358	47.5466	46.3635	52.5756	27.8398	27.4123	27.7571
PbO	0.0266	0.0086	0.0542	-	-	0.0041	0.0081	-	-	-	-	0.0163
SrO	0.7785	0.38	1.2578	1.0174	0.4077	0.3983	12.2113	13.0435	4.2078	0.2135	0.0284	-
SO3	-	0.0224	0.0343	0.0235	0.008	0.0191	-	0.0099	0.0516	0.0147	0.0115	0.0047
Y2O3	0.2893	0.2426	0.6934	0.9489	0.667	1.3147	-	-	0.5984	0.1457	0.1807	0.1117
P2O5	0.0118	0.0289	0.0449	-	0.0198	-	35.0569	33.2978	34.2672	0.2337	0.0639	0.0168
TiO2	3.1901	0.4321	4.5427	0.0783	-	-	-	-	0.032	38.2302	36.5052	35.6484
BaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2532	0.2418	0.2537
K2O	0.6766	0.0167	0.0429	0.0433	0.0116	0.0089	0.0104	0.0173	0.0511	0.0053	0.0021	0.0034
FeO	-	15.6411	1.7771	-	6.1128	-	0.079	0.0533	0.0905	1.0662	1.4684	2.2409
MnO	-	2.4259	-	-	-	-	0.0147	0.0225	-	0.0485	0.0749	0.0807
ZnO	0.0052	0.1578	-	-	0.0494	-	-	-	0.0004	-	-	-
CO2	64.9861	50.9804	47.4571	39.4604	42.7579	40.5997	-	-	-	-	-	-
Total	159.6068	119.768	135.1926	125.0156	128.4016	128.7637	100.306	99.0718	109.907	100.534	99.2837	99.2264

"-" = Abaixo do limite de detecção

Para o melhor entendimento da relação dos ETR com os diferentes minerais, diagramas binários e ternários foram feitos, utilizando a somatório dos ETRL e dos ETRP para o diagrama binário, já para o diagrama ternário foram utilizados os óxidos

de Neodímio (Nd_2O_3), Praseodímio (Pr_2O_3) e Disprósio (Dy_2O_3) para melhor visualização da variação em relação os diferentes minerais. As figuras 40 e 41 são representam os diagramas ternário e binários respectivamente.

Figura 40 –Diagrama ternário dos diferentes minerais portadores de ETR do depósito Capão do Mel.

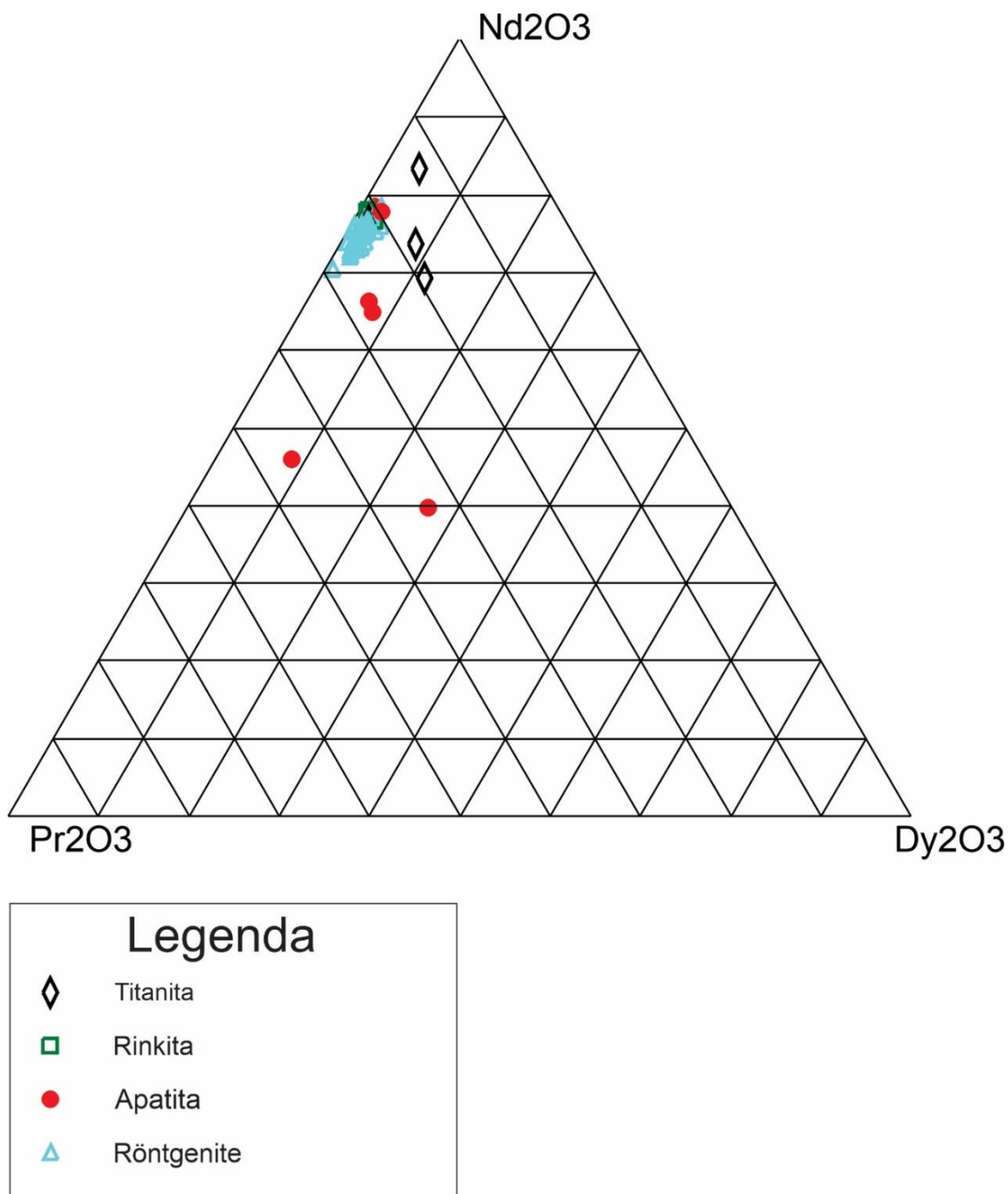
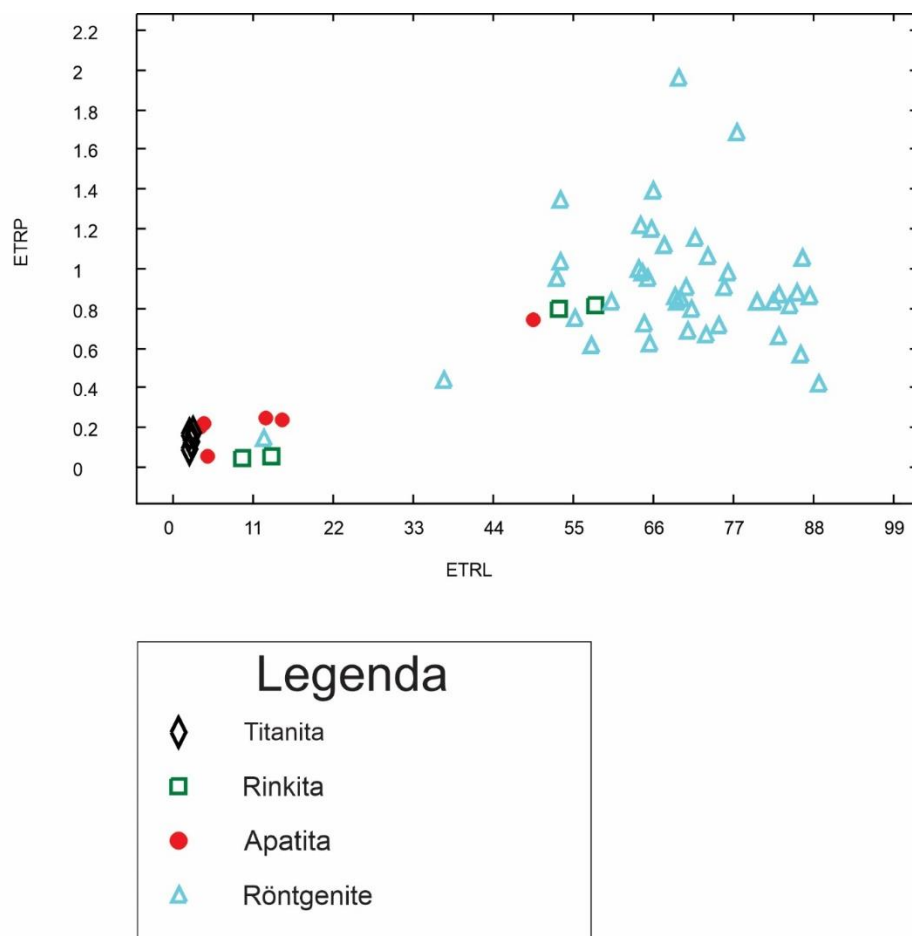


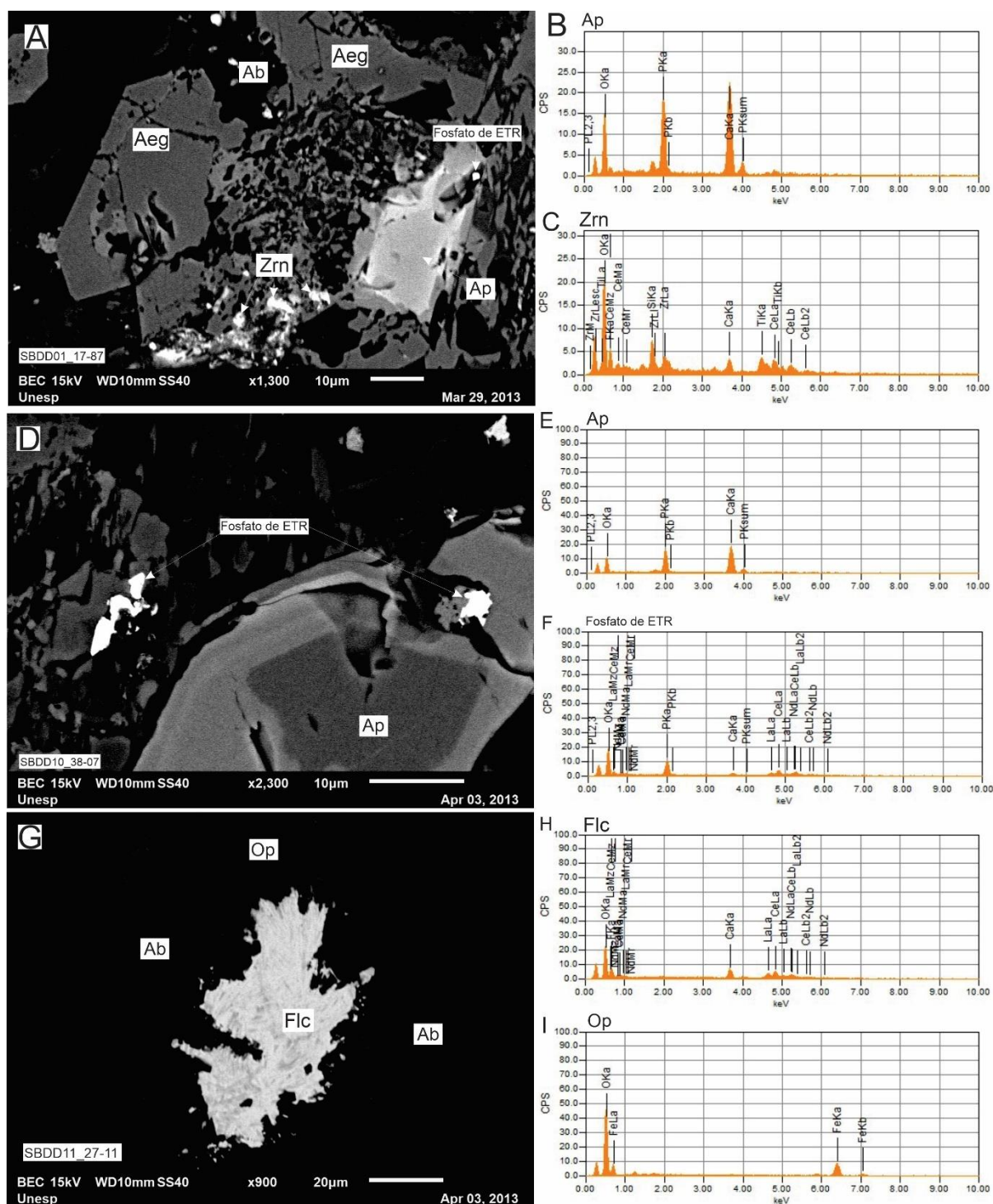
Figura 41 –Diagrama secundário dos diferentes minerais encontrados e das relações de ETRL e ETRP, do depósito Capão do Mel.



5.3.2 Soberbo

Para o depósito Soberbo os minerais identificados como portadores de ETR são: a apatita, o zircão e de forma minoritária a titanita. Nos minerais encontrados foi observada regiões de alteração dos minerais e consequente concentração dos elementos terras raras (Figura 42). Na petrografia foram observados apenas titanita, já que o zircão e a apatita não foram distinguidos dos minerais opacos devido a sua alteração, as suas existências só foram constatadas com o uso do MEV, em que nesses minerais apresentam em algumas porções brilho intenso e que indicou a presença de elementos mais densos. A intensidade do brilho se deu pelas altas concentrações de fluorcarbonatos com Ce, La e Nd, além de alguns silicatos contendo Ce e La.

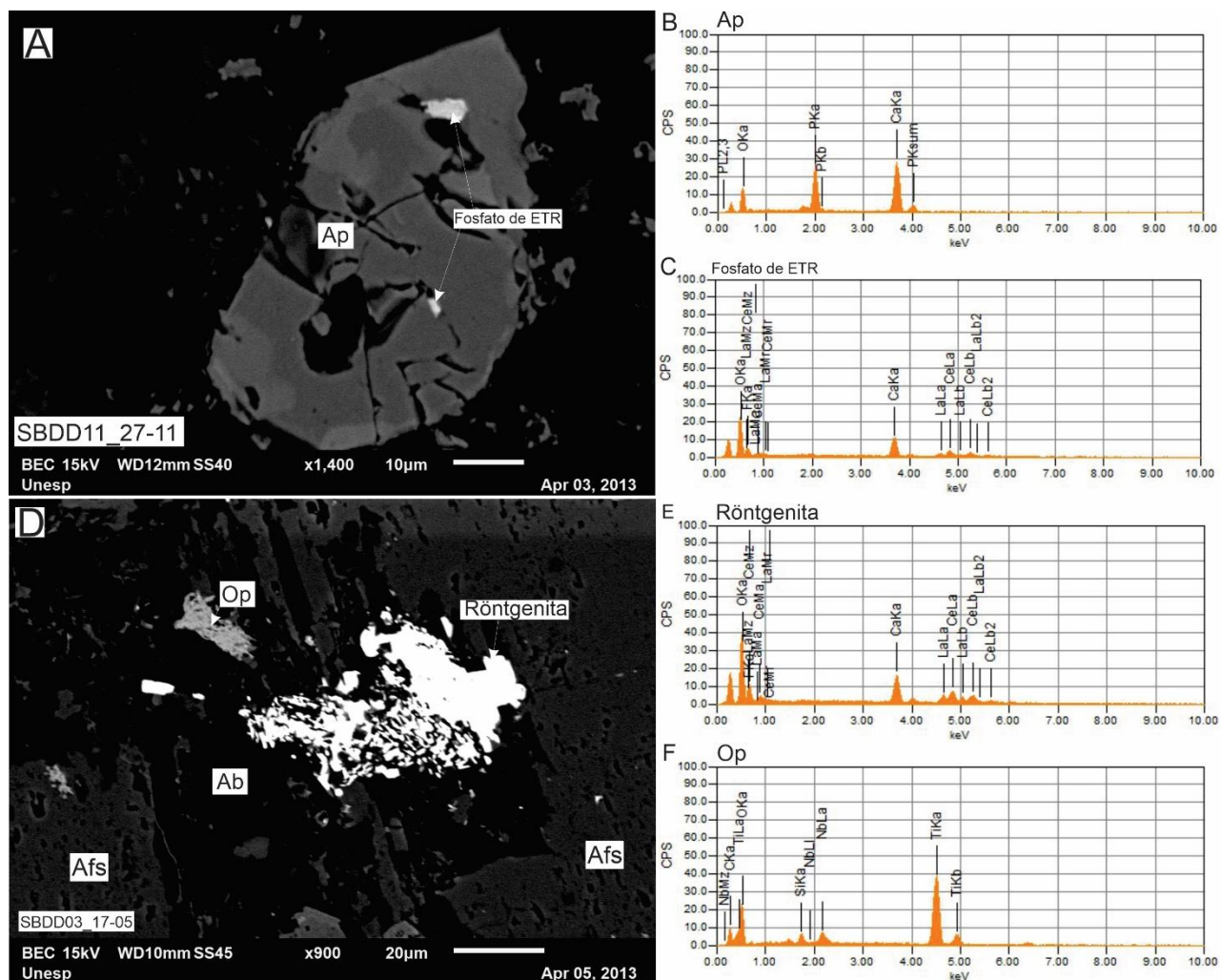
Figura 42 – Imagem de MEV representativa dos diferentes cristais de fosfato, zircão e fluorcarbonetos que apresentam ETR. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Ab, *albite*; Ap, *apatite*; Flc, fluorcarbonatos; Op, *opaque mineral*; Zrn, *zircon*.

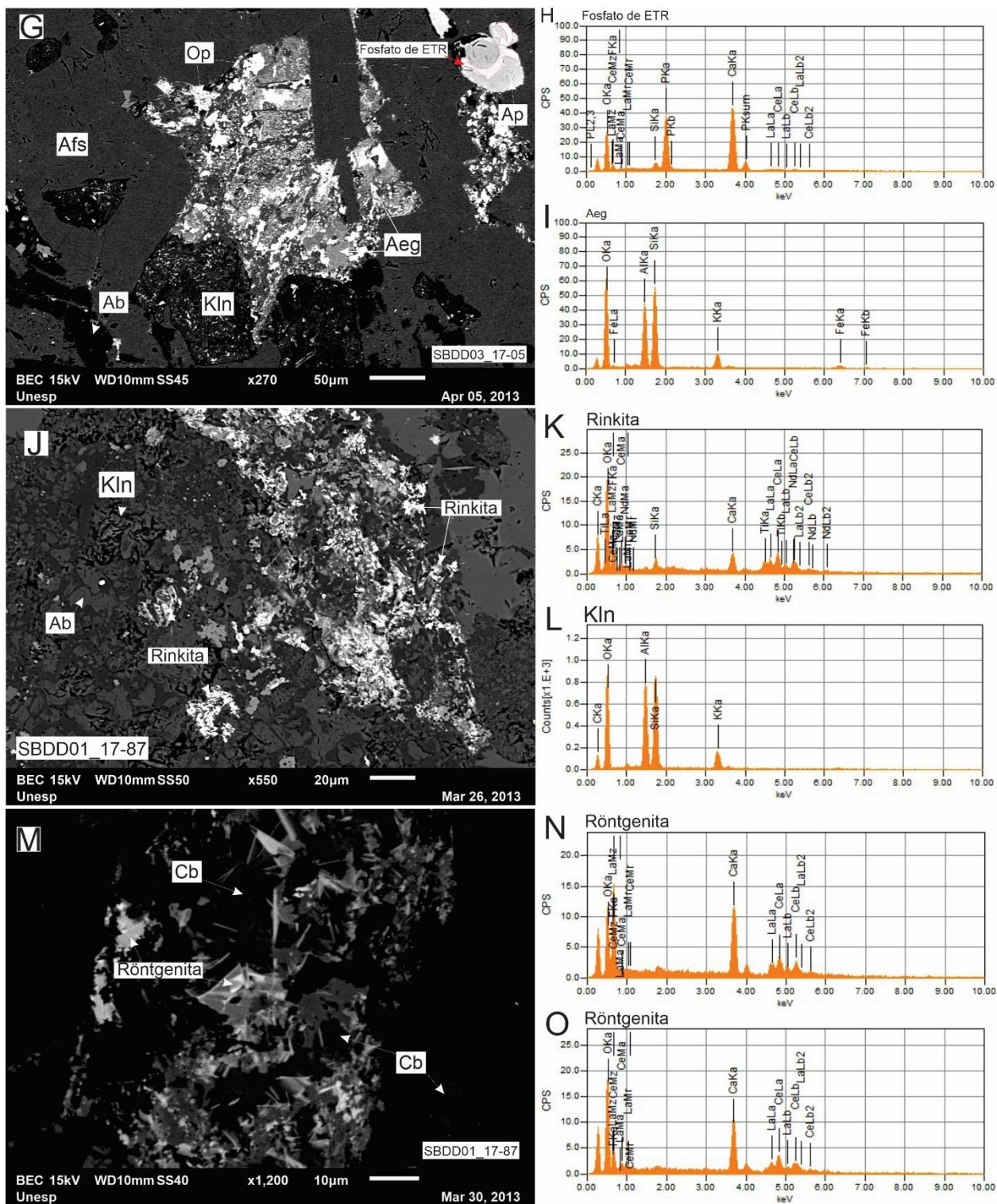


Os minerais encontrados são considerados como portadores primários de ETR nas rochas parentais. A maior diferença destes minerais para os encontrados no Capão do Mel é a granulação, já que muitos são extremamente pequenos, chegando a 2 µm e alguns maiores podendo chegar a 30 µm. Ao serem analisados com o EDS muitos dos minerais apresentaram Ce, La e Nd em suas composições, sendo esses

minerais fluorcarbonetos e fosfatos, ocorrendo possivelmente como minerais secundários devido a alteração de outros minerais primários. A figura 43 apresenta alguns desses minerais encontrados. Os fluorcarbonetos assim como já relatados anteriormente são encontrados em formas de ripas ou acículas (Figura 42g e 43m), já os fosfatos não apresentam uma forma bem definida (Figura 42d e 43a). Outra grande diferença das rochas do depósito Soberbo é a presença de zircônio em algumas análises, que estão ou não presentes com Ce e La, o que leva a crer a existência de cristais de zircão e que possivelmente esses cristais são portadores primários de ETR (Figura 42a). A figura 43 representa esses minerais, tendo como constituintes dos silicatos a rinkita $((Ca_3Ce)Na(NaCa)Ti(Si_2O_7)_2(OF)F_2)$ e dos carbonatos a röntgenita $(Ca_2(Ce,La)_3(CO_3)_5F_3)$, além de possivelmente britholita $(Ca_2(La,Ce,Ca)_3(SiO_4,PO_4)_3(OH,F))$, como produto de alteração da apatita, porém todas as ocorrências de alteração eram extremamente pequenas e com isso não foi possível determinar com precisão a sua ocorrência.

Figura 43 – Imagem de MEV representativa dos diferentes minerais portadores de ETR no deposito Soberbo. Abreviações: Aeg, *aegirine*; Ab, *albite*; Afs, *alkali feldspar*; Ap, *apatite*; Cb, *carbonate mineral*; Kln, *kaolinite*. Op, *opaque mineral*.

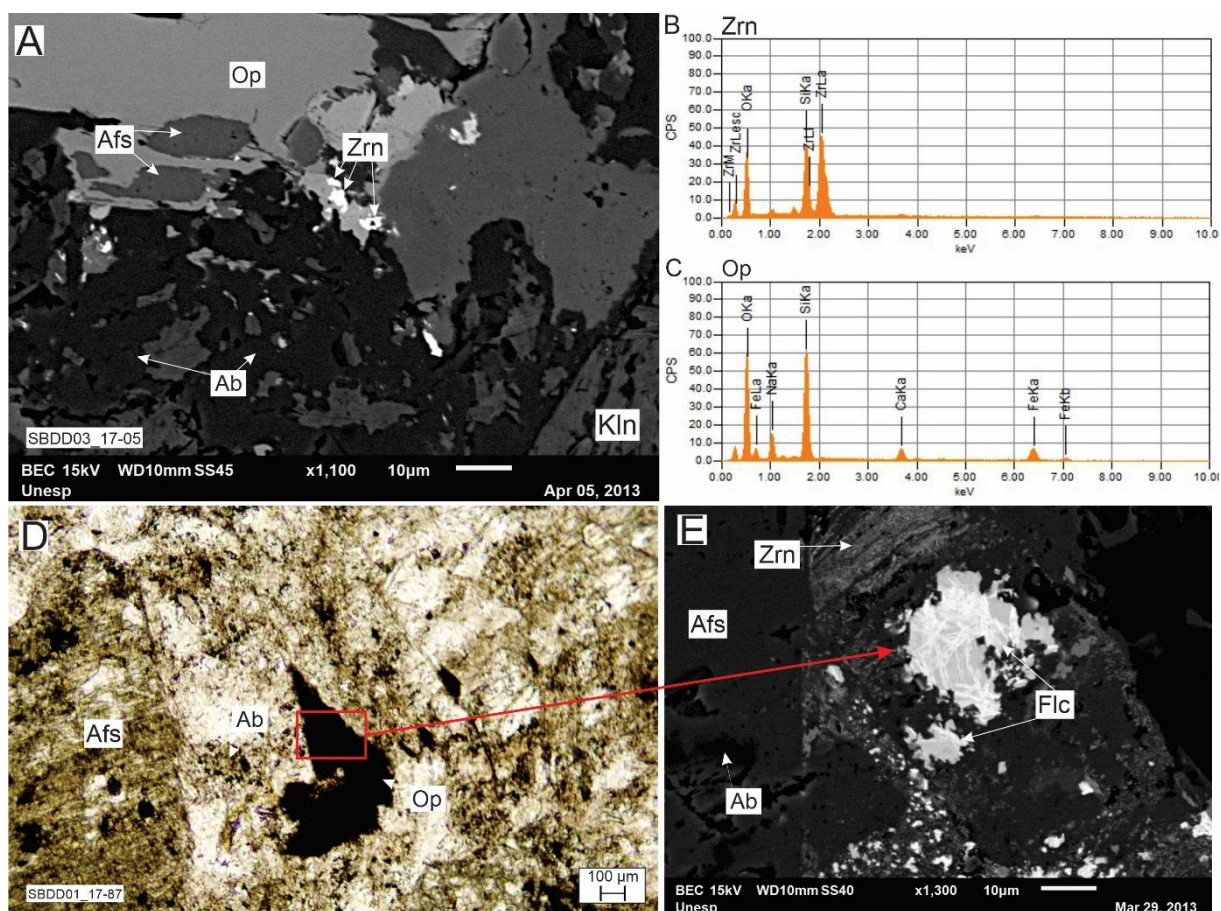




Os minerais apresentados acima são descritos na literatura como portadores de ETR, sempre sendo apresentado uma separação de elementos terras raras leves e pesados para certos minerais. Tipicamente a apatita é considerada como a portadora primária de ETRL e o zircão é considerado como o portador dos ETRP, sendo assim

os minerais portadores de ETRP mais economicamente importante. Foram encontrados mais alguns exemplares de zircão que apresentavam brilho intenso, mas que não apresentam ETR (Figura 44a), também foi encontrado um possível cristal de zircão totalmente alterado que em sua alteração apresenta formação de flúor carbonatos e resquícios de zircônio em algumas localidades (Figura 44b).

Figura 44 – Imagem de MEV representativa dos zircões encontrados nas rochas do depósito. Abreviações: Ab, *albite*; Afs, *alkali feldspar*; Flc, *fluorcarbonatos*; Kln, *kaolinite*. Op, *opaque mineral*; Zrn, *zircon*.



A tabela 5 apresenta algumas composições químicas coletadas por EDS no MEV, dos minerais portadores de ETR, para melhor compreensão sobre os diferentes tipos minerais encontrados nas rochas do depósito.

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
O	27.52	60.77	0.19	12486	0.0300000	K		
F	6.63	12.33	0.22	2752	0.0127971	K		
Si*	2.43	3.06	0.12	2742	0.0039362	K		
Ca	10.89	9.60	0.19	9715	0.0288791	K		
Zr*	7.50	2.91	0.31	4987	0.0109952	L		
La*	13.48	3.43	0.47	4637	0.0277991	L		
Ce	25.29	6.38	0.59	7880	0.0528247	L		
Nd*	6.27	1.54	0.57	1736	0.0132569	L		
Total	100.00	100.00						Röntgenita

SBDD1_17-87_AR7_det2

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
O	25.62	63.50	0.19	10392	0.0390728	K		
F	6.16	12.87	0.24	2037	0.0148223	K		
Na*	0.31	0.53	0.17	129	0.0003111	K		
Si*	1.45	2.05	0.14	969	0.0021768	K		
Ca*	3.22	3.19	0.16	1905	0.0088635	K		
Rb	nd	nd						
La*	19.51	5.57	0.64	4478	0.0420094	L		
Ce*	33.19	9.40	0.80	6892	0.0723032	L		
Nd*	10.54	2.90	0.78	1942	0.0232104	L		
Total	100.00	100.00						Rinkita

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
O	32.61	65.78	0.19	16349	0.0392809	K		
F	6.10	10.37	0.24	2393	0.0111257	K		
Na*	0.44	0.62	0.13	289	0.0004445	K		
Al*	1.43	1.71	0.10	1328	0.0017080	K		
Si	2.57	2.95	0.13	2647	0.0037999	K		
Ca	9.46	7.62	0.19	8075	0.0240059	K		
La	14.30	3.32	0.50	4656	0.0279123	L		
Ce	33.09	7.62	0.63	9743	0.0653100	L		
Total	100.00	100.00						Rinkita

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
C	16.37	37.21	0.05	5685	0.0041680	K		
O	24.37	41.58	0.16	13766	0.0330741	K		
F	3.91	5.62	0.16	2144	0.0099671	K		
Si*	1.14	1.10	0.08	1707	0.0024503	K		
Ca	4.58	3.12	0.12	5615	0.0166917	K		
Ti*	4.53	2.58	0.16	3544	0.0139578	K		
La*	15.66	3.08	0.48	7323	0.0438989	L		
Ce	24.24	4.72	0.48	10232	0.0685862	L		
Nd*	5.20	0.98	0.45	1925	0.0147026	L		
Total	100.00	100.00						Rinkita

SBDD01_17-87_AR7_det3

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
Al*	3.18	9.18	0.17	1907	0.0024531	K		

Si*	6.56	18.21	0.23	4328	0.0062128	K			
Ca	8.24	16.03	0.23	4822	0.0143341	K			
Ti*	10.17	16.55	0.33	3821	0.0150470	K			
La*	27.39	15.37	0.93	6200	0.0371684	L			
Ce*	38.99	21.69	0.89	8002	0.0536394	L			
Nd*	5.47	2.96	0.83	986	0.0075278	L			
Total	100.00	100.00							Rinkita

Chemical	formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K	ratio	Line
F*		7.89	32.10	0.19	4492	0.0208851	K	
Al*		1.97	5.65	0.15	1270	0.0016333	K	
Si*		3.55	9.76	0.18	2561	0.0036763	K	
Ca*		3.33	6.41	0.17	2219	0.0065978	K	
La*		33.66	18.72	0.76	8792	0.0527087	L	
Ce*		49.60	27.35	0.90	11741	0.0787062	L	
Total		100.00	100.00					Rinkita

SBDD3_17-05_AR2_det1.1

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
CaO		24.98	54.89	8.51	0.35	14734	0.0752591	K	
La2O3*		25.46	9.63	2.99	0.68	6768	0.0697177	L	
CeO2		49.55	35.48	5.50	0.88	11403	0.1313328	L	
Total		100.00	100.00	17.00					Röntgenita

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F		5.36	27.12	0.00	0.23	2215	0.0188897	K	
CaO		23.00	39.43	8.32	0.34	13121	0.0715263	K	
La2O3*		24.89	7.34	3.10	0.69	6405	0.0704067	L	
CeO2		46.75	26.11	5.51	0.90	10409	0.1279543	L	
Total		100.00	100.00	16.94					Röntgenita

SBDD3_17-05_AR2_det1

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F*		4.97	24.96	0.00	0.19	2953	0.0167173	K	
CaO		24.88	42.35	8.86	0.29	20878	0.0755649	K	
La2O3*		23.78	6.97	2.92	0.58	8981	0.0655508	L	
CeO2		46.37	25.72	5.38	0.74	15153	0.1236734	L	
Total		100.00	100.00	17.16					Röntgenita

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
P2O4		44.14	41.30	7.02	0.36	28799	0.0944002	K	
CaO		55.86	58.70	9.97	0.45	36154	0.2048429	K	
Total		100.00	100.00	16.98					Apatita

SBDD3_17-05_AR3_det2.1

Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F		2.87	8.63	0.00	0.15	1601	0.0074432	K	

SiO2	2.92	2.78	0.52	0.12	4312	0.0061891	K		
P2O4	37.12	33.71	6.25	0.23	48815	0.0839514	K		
CaO	52.25	53.27	9.88	0.29	70934	0.2108638	K		
CeO2	4.84	1.61	0.30	0.26	2458	0.0164769	L		
Total	100.00	100.00	16.94						Apatita
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	4.76	20.79	0.00	0.19	2652	0.0123328	K		
SiO2	13.76	19.01	3.65	0.29	9904	0.0142164	K		
K2O	4.21	3.71	1.43	0.13	4493	0.0117376	K		
CaO	22.90	33.90	6.51	0.28	19804	0.0588699	K		
La2O3*	15.91	4.05	1.56	0.52	6241	0.0374156	L		
CeO2	38.45	18.54	3.56	0.67	13044	0.0874393	L		
Total	100.00	100.00	16.72						Rinkita
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	7.62	33.45	0.00	0.18	5515	0.0256409	K		
CaO	26.47	39.34	9.53	0.27	27379	0.0813881	K		
La2O3*	20.57	5.26	2.55	0.51	9540	0.0571947	L		
CeO2	45.34	21.95	5.32	0.65	18199	0.1219931	L		
Total	100.00	100.00	17.40						Röntgenita
SBDD3_17-05_AR6_det1									
Chemical	formula	mass%	mol%	Cation	Sigma	Net	K	ratio	Line
O									
F	3.45	10.43	0.00	0.15	2009	0.0093431	K		
SiO2	2.27	2.17	0.41	0.12	3369	0.0048352	K		
P2O4	35.00	31.91	6.08	0.23	46665	0.0802550	K		
CaO	52.31	53.55	10.20	0.29	72795	0.2163954	K		
La2O3	2.39	0.42	0.16	0.22	1439	0.0086287	L		
CeO2	4.57	1.52	0.29	0.26	2380	0.0159521	L		
Total	100.00	100.00	17.14						Apatita

Com a obtenção dos dados e a compreensão dos minerais existentes foi realizada a Microsonda, dos minerais portadores primários e secundários para melhor determinação das suas composições químicas. Foram realizadas análises em 87 pontos de quatro lâminas no depósito, sendo coletados informações de minerais portadores de ETR, minerais formadores de rocha e das alterações observadas.

As análises que apresentaram teores significativos de ETR foram separadas e tratadas, com o intuito de caracterizar os diferentes tipos minerais que podem ser encontrados nas rochas do depósito. Ao todo foram 27 pontos, a tabela 6 apresenta alguns dados coletados na Microsonda e caracterizados por diferentes minerais, sendo mostrados três dados representativos por mineral.

Tabela 6 – Análise de Microsonda dos pontos que apresentaram ETR, caracterizados pelos diferentes minerais identificados. Abreviações: Ap, *apaptite*; Zrn, *zircon*.

No.	47	12	84	32	49	42	3	17	20	19	13	33
Comment	Ap	Ap	Ap	Röntgenita	Röntgenita	Röntgenita	Rinkita	Rinkita	Rinkita	Zrn	Zrn	Zrn
F	3.9674	5.8176	3.2575	5.6493	3.6311	5.5317	0.7504	6.268	0.1915	2.4652	-	0.8314
MgO	-	0.0104	0.0088	-	0.0089	-	0.2683	0.0066	0.0053	2.2492	0.737	0.1154
Na2O	0.1746	0.2862	0.194	-	-	-	1.5007	0.054	0.2939	0.1481	2.6157	0.4062
SiO2	3.2299	1.7215	8.3789	0.027	0.1565	0.7746	66.2862	31.2014	61.381	21.2538	55.2258	21.0967
Al2O3	0.0053	0.0738	2.7261	0.0111	0.0417	0.0879	23.7197	9.5865	16.8371	4.0422	15.7181	1.7469
La2O3	2.2017	1.0314	3.1825	17.0007	10.9786	15.0839	0.843	14.8669	0.711	3.5692	0	2.007
Ce2O3	4.4659	1.9202	3.7029	34.9383	27.7369	31.5526	1.9086	22.256	1.7978	6.7501	-	3.2774
Pr2O3	0.4225	0.184	0.3012	2.8647	3.2623	2.923	0.1285	1.9446	0.163	0.6651	0.005	0.2346
Nd2O3	1.513	0.8235	1.2256	9.0576	12.0879	9.9543	0.5209	6.2991	0.4148	1.7235	0.0073	0.8168
Sm2O3	0.0952	0.1049	0.0604	0.4531	0.9714	1.0992	-	0.4186	0.0364	0.1086	-	0.0651
Gd2O3	0.07	0.0563	0.022	0.4913	0.4195	0.7757	-	0.3091	0.0078	0.2319	0.0169	0.1913
Er2O3	-	-	-	0.0096	-	-	-	0.1053	0.0727	0.133	0	0.1202
Tb2O3	0.0872	0.0217	-	-	0.0451	-	-	0.0054	-	0.1495	-	0.043
Dy2O3	0.0885	0.0488	0.0059	0.2439	-	0.2286	0.0677	0.2313	0.0452	0.0963	0.0673	0.1322
Yb2O3	0.0152	0.0619	0.0158	0.0168	-	-	0.0226	-	0.0418	0.0832	-	0.0344
UO2	0.0066	0.0169	0.0053	0.0326	0.0489	0.0683	0.6634	0.3469	2.0637	0.1549	0.0218	0.335
ThO2	0.0837	-	0.0679	0.3364	2.4522	1.3906	0.0891	0.4113	0.0419	0.2802	0.0289	0.7348
CaO	53.3493	56.4282	48.8427	16.0677	19.6962	16.2251	0.6116	3.2282	0.315	1.7304	0.4572	1.1979
PbO	-	0.0038	0.0066	0.0203	0.0051	0.0035	-	0.0175	0.0204	0.0361	0.0242	0.0797
SrO	0.5205	0.3924	0.6084	0.3204	0.5393	0.6272	-	0.2106	-	0.1718	-	0.3764
SO3	0.0766	0.5842	0.0843	0.0069	0.0214	0.0107	0.0217	0.0154	0.005	0.0304	0.0108	0.0712
Y2O3	0.2525	0.0887	0.1743	0.4978	0.0406	0.5684	0.0214	0.3401	0.3232	1.0328	0.0028	1.0652
P2O5	29.9878	31.3285	35.716	0.0097	0.0107	0.0057	0.0033	-	-	0.0105	-	-
TiO2	-	-	0.412	-	2.218	0.2226	0.1126	1.3962	7.6144	20.1068	0.0786	19.0957
BaO	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0379	0.1073	-	0.1067
K2O	0.0571	0.2158	0.0093	0.0586	0.1186	0.3782	0.2769	0.4076	1.3363	0.2661	0.0897	0.0979
ZrO2	0.0959	0.0876	0.1345	-	-	-	0.0061	3.8602	4.7505	17.759	2.9699	36.9012
FeO	0.3302	0.2924	0.5486	-	0.1328	-	1.6721	0.5172	0.7268	9.7314	13.7169	2.1694
MnO	-	0.0197	0.0432	-	-	-	-	-	-	-	1.8169	0.219
ZnO	-	-	-	0.0174	-	-	0.0264	-	-	-	0.4865	0.0519
CO2	-	-	-	38.6021	41.1895	39.3943	-	-	-	-	-	-
Total	99.3101	99.0896	108.212	123.1162	123.4198	123.1179	99.0314	100.98	98.9863	94.0432	93.8579	92.7919

"-" = Abaixo do limite de detecção

O entendimento da correlação entre os elementos terras raras e os diferentes minerais pode ser melhor observada na forma de diagramas binários e ternários. Para os diagramas secundários foi utilizado a somatório dos ETRL e dos ETRP. O diagrama ternário foi utilizado da variação composicional dos óxidos de Neodímio (Nd₂O₃), Praseodímio (Pr₂O₃) e Disprósio (Dy₂O₃), em relação aos diferentes minerais. A figura 45 e 46 são referentes aos diagramas ternários e binários respectivamente.

Figura 45 – Diagrama ternário dos diferentes minerais portadores de ETR no depósito Soberbo.

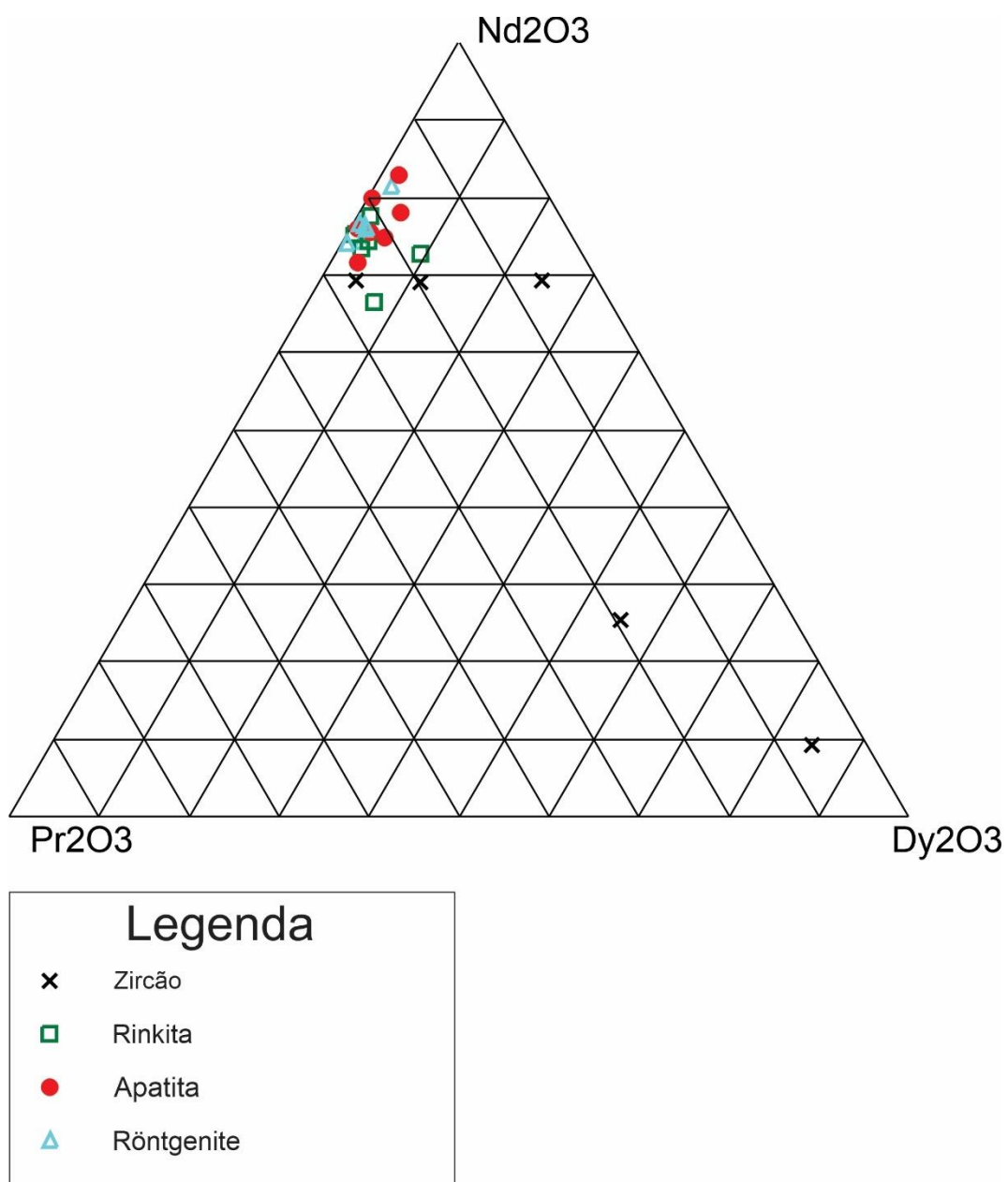
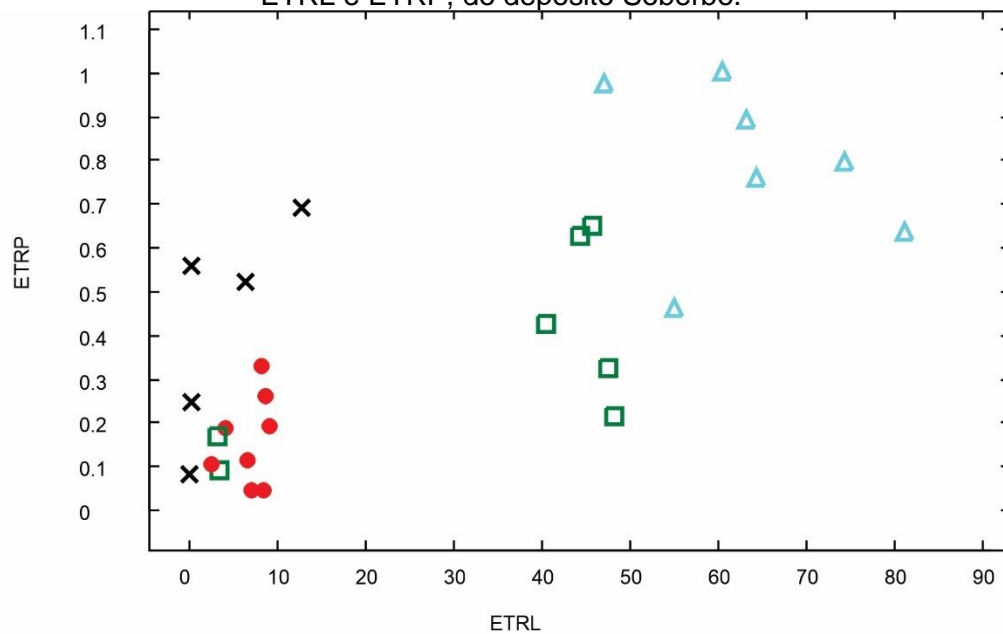


Figura 46 – Diagrama secundário dos diferentes minerais encontrados e das relações de ETRL e ETRP, do depósito Soberbo.



6 DISCUSSÕES

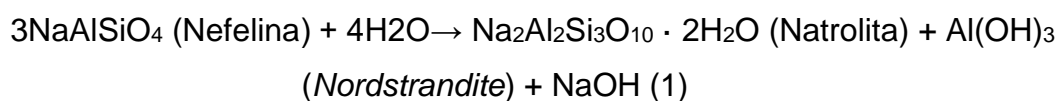
6.1 Papel da alteração hidrotermal

O Complexo Alcalino de Poços de Caldas apresenta peculiaridades únicas que o torna um dos grandes depósitos supergênicos de ETR do mundo. Um dos fatores principais para sua formação é a alteração hidrotermal observada em muitas das amostras estudadas. As análises petrográficas sugerem que a passagem de fluidos ricos em CO₂ e F₂, evidenciados pela presença de veios de carbonato e fluorita, destruiu minerais primários portadores de ETR e criou novos minerais secundários (fluorcarbonatos) enriquecidos em ETRP mais susceptíveis ao intemperismo favorecendo a atuação dos agentes intempéricos, que atuaram na concentração dos ETR no perfil regolítico.

As estruturas presentes no CAPC (falhas e fraturas) devem ter atuado como condutos para a passagem dos fluidos hidrotermais. As melhores evidências disso é a presença de estruturas circulares que são truncadas por grandes fraturas, nas regiões que abrangem o Morro do Ferro e a Mina de urânio Osamu Utsumi, na porção centro - SE do complexo (R. F. Almeida & Paradella, 1976; Alves, 2003; Barretto & Fujimori, 1986; Capovila, 2001; Gardar, 1990), onde há o enriquecimento em Th e ETR (Morro do Ferro), e o enriquecimento em U, Mo e ETR (Mina Osamu Utsumi). Especula-se, portanto, que estruturas são de grande importância e provavelmente devem ter algum controle nas mineralizações em muitos dos depósitos do complexo.

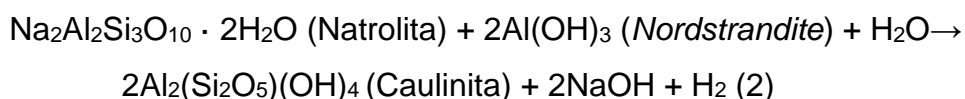
Além disso as análises petrográficas mostraram que o feldspato na maioria dos casos altera-se inicialmente para illita e com o avanço da alteração, a illita se transforma em caulinita e posteriormente em gibbsita.

No caso da nefelina, na maioria das amostras analisadas, os cristais estão alterados para minerais do grupo da zeólita. Esse tipo de transformação é encontrado também no nefelina sienito do complexo de Lovorezo na península de Kola, Rússia (Mikhailova, Kalashnikova, et al., 2023), onde a nefelina foi transformada em zeólita, principalmente natrolita/paranatrolita e fases Al-O-H (*nordstrandite*, *böhmite*), através da reação (1).



A possível evolução do processo da alteração se dá pela retirada de sódio da natrolita por um fluido lixiviante ácido, que normalmente não é associado a rochas alcalinas, mas pode ocorrer devido alterações dos fluidos ao longo do tempo (Inoue, 1995).

Barretto & Fujimori (1986) sugerem que os fluidos que percolaram e alteraram as rochas do Morro do ferro eram ácidos e lixiviaram grande parte dos elementos presentes nas rochas encaixantes. Portanto é possível que a natrolita tenha sido transformada em caulinita, causando alteração argílica, diferente da equação (1) onde a fase Al-O-H gera *nordstrandite* no complexo de Lovorezo, no CAPC possivelmente a alteração hidrotermal gera a caulinita (2).



A egirina é outro mineral intensamente afetado pelo hidrotermalismo, sendo muitas vezes totalmente ou parcialmente destruída, e transformada em minerais opacos (óxidos e hidróxidos de ferro) restando apenas o pseudomorfo do mineral.

6.2 Estoques de ETR na rocha parental

Com relação aos minerais portadores de ETR, como já citado anteriormente os minerais primários portadores de ETR nas rochas dos dois depósitos são a titanita, a apatita e o zircão. Esses minerais são resistentes aos agentes intempéricos, porém defeitos naturais em suas estruturas cristalinas somados a passagem de fluidos hidrotermais resultam na completa alteração desses minerais, fazendo com que os ETR sejam liberados e armazenados em minerais secundários.

Os minerais secundários mais importantes são a rinkita e a röntgenita, amplamente encontrados nas rochas dos dois depósitos, mas a presença de outros minerais secundários não é descartada. Minerais extremamente pequenos portadores de Ce e La não foram identificados pelos métodos utilizados devido ao limite de detecção dos equipamentos, entretanto especula-se que sejam fosfatos de ETR, possivelmente sendo britholita.

Os diagramas ternários e binários mostram de maneira qualitativa a distribuição dos ETR nos minerais portadores a partir de dados de análises de microsonda eletrônica. No diagrama ternário é possível observar maiores concentrações em Dy

em titanita e zircão. A rinkita e a röntgenita possuem alta concentração em Nd e Tb e baixa concentração em Dy. No diagrama binário é possível observar que a röntgenita apresenta maiores concentrações de ETR quando comparado aos outros minerais portadores desses elementos. Nota-se que a concentração de ETR nos minerais primários é menor que a concentração nos minerais secundários gerados devido a alteração hidrotermal.

7 CONCLUSÃO

A grande complexidade das litologias e dos minerais encontrados no CAPC, além dos inúmeros processos intempéricos e hidrotermais resultaram na concentração anormal dos ETR, nos depósitos Capão do Mel e Soberbo. As rochas alcalinas insaturadas do complexo apresentaram grande potencial para minerais primários enriquecidos em ETR, a história evolutiva do complexo gerou estruturas que facilitaram a circulação e percolação dos fluidos hidrotermais, destruindo os minerais primários ricos em ETR e gerando novos minerais secundários ainda mais enriquecidos nesses elementos, esses minerais apresentam maior fragilidade aos agentes intempéricos. A intensa atuação do intemperismo é um dos fatores mais importantes, pois destrói as rochas e minerais, gerando maior quantidade de argilominerais e conseqüentemente concentrando os ETR nas argilas formadas.

Portanto é possível concluir que a existência dos depósitos do tipo argila iônica no Sistema Caldeira são resultado da somatória dos inúmeros fatores que possibilitaram a sua ocorrência, sendo eles a diferenciação magmática enriquecida em elementos de baixa concentração na crosta; a geração de minerais magmáticos primários que consigam armazenar os ETR em suas estruturas; a atuação de fluidos hidrotermais capazes de alterar os minerais primários e gerar minerais secundários mais enriquecidos em ETR, além de serem facilmente destruídos pelo intemperismo; o clima e umidade ideais para que ocorresse as ações intempéricas que destruíssem as rochas e minerais, ocasionando a geração de argilominerais capazes de adsorver os íons de ETR liberados pela destruição dos minerais, dessa forma concentrando os elementos em regiões de maior teores.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. (1983). Relações Tectônicas das Rochas Alcalinas Mesozóicas da Região Meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*.
- Almeida, R. F., & Paradella, W. R. (1976). *Estudo maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens LANDSAT com ênfase em mineralizações radioativas*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Alves, A. D. (2003). *ROCHAS VULCANOCLÁSTICAS DO COMPLEXO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS - MG/SP*. Universidade de São Paulo.
- Artur, A. C., Wernick, E., Kawashita, K., & Claro, U.-R. (1988). *GEOCRONOLOGIA DE UNIDADES LITO-ESTRATIGRÁFICAS DO EMBASAMENTO CRISTALINO DA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS E ÁREAS ADJACENTES DO ESTADO DE SÃO PAULO*.
- Barretto, P. M. C., & Fujimori, K. (1986). NATURAL ANALOGUE STUDIES: GEOLOGY AND MINERALOGY OF MORRO DO FERRO, BRAZIL. In *Chemical Geology* (Vol. 55).
- Borst, A. M., Smith, M. P., Finch, A. A., Estrade, G., Villanova-de-Benavent, C., Nason, P., Marquis, E., Horsburgh, N. J., Goodenough, K. M., Xu, C., Kynický, J., & Geraki, K. (2020). Adsorption of rare earth elements in regolith-hosted clay deposits. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17801-5>
- Campos Neto, M. D. C., & Caby, R. (1999). Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the Sao Francisco Craton, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 97(1–2), 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(99\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00010-8)
- Capovila, M. M. G. M. (2001). *URÂNIO NOS HIDROTERMALITOS POTÁSSICOS (“ROCHA POTÁSSICA”) DA MINA OSAMU UTSUMI, COMPLEXO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS, MG*.
- Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Zalán, P. V., & Teixeira, J. B. G. (2012). Estágios Evolutivos do Brasil no Fanerózoico. *ResearchGate*.

- Chakhmouradian, A. R., & Zaitsev, A. N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks: Sources and processes. *Elements*, 8(5), 347–353. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.347>
- Ellert, R. (1959). *Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas*.
- Fernandes, L. A. (1998). *Estratigrafia e Evolução Geológica da parte Oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*.
- Ferroni, F. R., Mello, C. L., & Destro, N. (2018). Tectonic control on the Cabo Frio anorogenic magmatic lineament, Southeastern Brazil. In *Journal of South American Earth Sciences* (Vol. 83, pp. 37–54). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.001>
- Gardar, G. M. (1990). A ALTERAÇÃO HIDROTERMAL NO CONTEXTO EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO MACIÇO ALCALINO POÇOS DE CALDAS, MG-SP.
- Gomes, C. B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., & Azzone, R. G. (2011). Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(2), 152–168. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.05.003>
- Gomes, C. de B., Azzi, A. de A., & Atencio, D. (2023). A review of mineral assemblages of agpaitic rocks from the Poços de Caldas alkaline massif, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 53(2). <https://doi.org/10.1590/2317-4889202320220076>
- Gomes, C. de B., Azzone, R. G., Rojas, G. E. E., Guarino, V., & Ruberti, E. (2021). Agpaitic alkaline rocks in southern Brazilian platform: A review. In *Minerals* (Vol. 11, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min11090934>
- Guarino, V., De' Gennaro, R., Melluso, L., Ruberti, E., & Azzone, R. G. (2019). The transition from miaskitic to agpaitic rocks, as highlighted by the accessory phase assemblages in the Passa quatro alkaline complex (Southeastern Brazil). *Canadian Mineralogist*, 57(3), 339–361. <https://doi.org/10.3749/canmin.1800073>
- Guarino, V., Lustrino, M., Zanetti, A., Tassinari, C. C. G., Ruberti, E., de' Gennaro, R., & Melluso, L. (2021). Mineralogy and geochemistry of a giant agpaitic magma reservoir: The Late Cretaceous Poços de Caldas potassic alkaline complex (SE Brazil). *Lithos*, 398–399.
- Haddad, R. C. (1995). *O batólito granitóide Pinhal- Ipuiúna (SP-MG): um exemplo de magmatismo cálcio-alcalino potássico neoproterozóico no sudeste brasileiro*.

- Hamza, V. M. (1982). *TERRESTRIAL HEAT FLOW IN THE ALKALINE INTRUSIVE COMPLEX OF POCOS DE CALDAS, BRAZIL*.
- Huang, J., He, H., Tan, W., Liang, X., Ma, L., Wang, Y., Qin, X., & Zhu, J. (2021). Groundwater controls REE mineralisation in the regolith of South China. *Chemical Geology*, 577, 120295. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120295>
- Inoue, A. (1995). *Origin and Mineralogy of Clays: Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments*.
- Li, M. Y. H., Zhou, M. F., & Williams-Jones, A. E. (2019). The genesis of regolith-hosted heavy rare earth element deposits: Insights from the world-class Zudong deposit in Jiangxi province, South China. *Economic Geology*, 114(3), 541–568. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4642>
- Linnen, R. L., Samson, I. M., Williams-Jones, A. E., & Chakhmouradian, A. R. (2013). Geochemistry of the Rare-Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits. In Heinrich D. Holland & Karl K. Turekian (Eds.), *TREATISE ON GEOCHEMISTRY: SECOND EDITION* (Second, Vol. 13, pp. 543–568). Elsevier Ltd.
- Lou, K., & Ma, J. (2022). Recent Advances in Migration and Enrichment of Rare Earth Elements During Chemical Weathering of Granite. *Advances in Earth Science*, 37(7), 692–708.
- Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C. B., Morbidelli, L., Muzio, R., Ruberti, E., & Tassinari, C. C. G. (2005). Petrogenesis of the early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): Relationships with Paraná-Etendeka magmatism. *Lithos*, 82(3-4 SPEC. ISS.), 407–434. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.07.004>
- Marks, M. A. W., & Markl, G. (2017). A global review on agpaitic rocks. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 173, pp. 229–258). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.002>
- Marks, M., Vennemann, T., Siebel, W., & Markl, G. (2003). Quantification of Magmatic and Hydrothermal Processes in a Peralkaline Syenite±Alkali Granite Complex Based on Textures, Phase Equilibria, and Stable and Radiogenic Isotopes. In *JOURNAL OF PETROLOGY* (Vol. 44, Issue 7).
- Melluso, L., Guarino, V., Lustrino, M., Morra, V., & de' Gennaro, R. (2017). The REE- and HFSE-bearing phases in the Itatiaia alkaline complex (Brazil) and geochemical evolution of feldspar-rich felsic melts . *Mineralogical Magazine*, 81(2), 217–250. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.122>
- Meteoritic Resources. (2023). *ASX ANNOUNCEMENT METEORIC RESOURCES*.

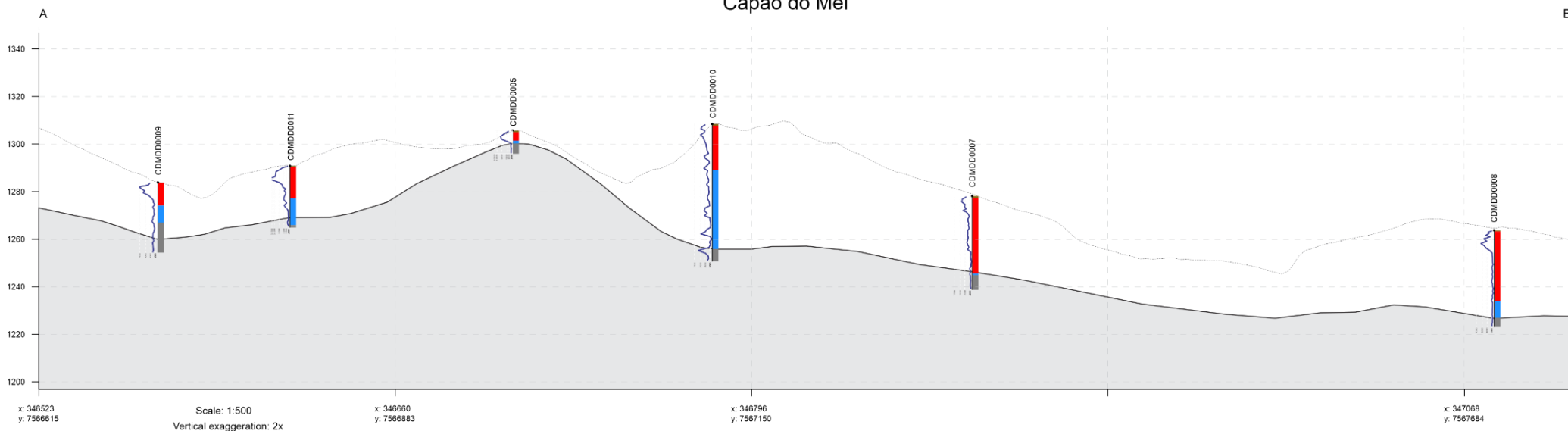
- Mikhailova, J. A., Kalashnikova, G. O., Pakhomovsky, Y. A., Selivanova, E. A., & Kompanchenko, A. A. (2023). Experimental Modeling of Natural Processes of Nepheline Alteration. *Minerals*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/min13091138>
- Mikhailova, J. A., Pakhomovsky, Y. A., Lyalina, L. M., & Selivanova, E. A. (2023). Alteration of Feldspathoids Changes pH of Late-Magmatic Fluids: A Case Study from the Lovozero Peralkaline Massif, Russia. *Minerals*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/min13010039>
- Morbidelli Al, L., Gomes, C. B., Beccaluva', L., Brotzu, P., Conte, A. M., Ruberti, E., & Traversa, G. (1995). Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. In *Morbidelli et al. / Earth-Science Reviews* (Vol. 39).
- Pan, Y., Fleet, M. E., & Macrae, N. D. (1993). Late alteration in titanite (CaTiSiO₅): Redistribution and remobilization of rare earth elements and implications for U / Pb and Th / Pb geochronology and nuclear waste disposal. In *Geochimica a Cosmochimica Acta* (Vol. 51).
- Salazar Mora, C. A., Campos Neto, M. da C., & Basei, M. A. S. (2014a). Syn-collisional lower continental crust anatexis in the Neoproterozoic Socorro-Guaxupé Nappe System, southern Brasília Orogen, Brazil: Constraints from zircon U-Pb dating, Sr-Nd-Hf signatures and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 255(P3), 847–864. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.017>
- Salazar Mora, C. A., Campos Neto, M. da C., & Basei, M. A. S. (2014b). Syn-collisional lower continental crust anatexis in the Neoproterozoic Socorro-Guaxupé Nappe System, southern Brasília Orogen, Brazil: Constraints from zircon U-Pb dating, Sr-Nd-Hf signatures and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 255(P3), 847–864. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.017>
- Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016a). Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits. In *Reviews in Economic Geology* (Vol. 18).
- Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016b). Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits. *Economic Geology*, 18, 55–79.
- Sardinha, D. D. S., Godoy, L. H., Conceição, F. T. da, Spatti Júnior, E. P., Fernandes, A. M., Victal, F. A. D. C. A., & Costa, D. A. T. (2018). Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. *Geologia USP*.

- Série Científica*, 18(1), 259–272. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-127313>
- Schorscher, H. D., & Shea, M. E. (1992). The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. In *Journal of Geochemical Exploration* (Vol. 45).
- Shi, A., Xu, C., Fan, C., Chakhmouradian, A. R., Brenna, M., & Wei, C. (2024). Structural Defects of Heavy Rare Earth Element Minerals in Granite Accelerate Their Decomposition and Facilitate Mineralization During Weathering. *Economic Geology*, 119(4), 871–883. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5057>
- Smith, M., Kynicky, J., Xu, C., Song, W., Spratt, J., Jeffries, T., Brtnicky, M., Kopriva, A., & Cangelosi, D. (2018). The origin of secondary heavy rare earth element enrichment in carbonatites: Constraints from the evolution of the Huanglongpu district, China. *Lithos*, 308–309, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.027>
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 12, Issue 1).
- Thompson, R. N., Gibson, S. A., Mitchell, J. G., Dickin, A. P., Leonardos, O. H., Brod, J. A., & Greenwood, J. C. (1998). Migrating Cretaceous-Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume? In *JOURNAL OF PETROLOGY* (Vol. 39).
- Ulbrich, H. H. G. J. (1984). *A Petrografia, a Estrutura e o Quimismo de Nefelina Sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*.
- Ulbrich, H. H., Vlach, S. R. F., Demaiffe, D., & Ulbrich, M. N. C. (2005). *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*.
- Vlach, S. R. F., Ulbrich, H. H. G. J., Ulbrich, M. N. C., & Vasconcelos, P. M. (2018). Melanite-bearing nepheline syenite fragments and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of phlogopite megacrysts in conduit breccia from the Poços de Caldas Alkaline Massif (MG/SP), and implications. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2), 391–402. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820170095>
- Wang, M., Li, M. Y. H., Zhou, M. F., Zhou, J. X., Sun, G., Zhou, Y., & Li, Y. (2024). Enrichment of Rare Earth Elements During the Weathering of Alkaline Igneous Systems: Insights from the Puxiong Regolith-Hosted Rare Earth Element Deposit, SW China. *Economic Geology*, 119(1), 161–187. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5024>

Wu, Z., Chen, Y., Wang, Y., Xu, Y., Lin, Z., Liang, X., & Cheng, H. (2023). Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals: Application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits. *Ore Geology Reviews*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105446>

8 ANEXO I

Capão do Mel



x: 346523
y: 7566815

Scale: 1:500
Vertical exaggeration: 2x

x: 346660
y: 7566883

x: 346796
y: 7567150

x: 347068
y: 7567684

0m 400m

Legend

■ Fresh Rock	■ Breccia	■ Clay_Zone	■ Lamprophiro
■ Sub_Volcanic	■ SOIL	■ Transition_Zone	

TREE grades

■ ≤ 1000	■ ≤ 4000	■ > 6000
■ ≤ 2000	■ ≤ 5000	
■ ≤ 3000	■ ≤ 6000	

SOBERBO NNE-SSW

