

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Caracterização geoquímica e mineralógica de rochas da Província Alcalina  
de Goiás (PAGO) para entendimento dos mecanismos de liberação de  
potássio**

**BRUNO BORGES VIEIRA**

Trabalho de formatura apresentado à  
comissão de trabalhos de formatura  
(CTF) para obtenção do título de  
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade (USP)

Coorientador: Prof. Dra. Elisa Soares Rocha Barbosa (UFG)

São Paulo

2024

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho à minha família, e em especial, ao meu falecido pai  
Anderson Moura Vieira.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores Prof. Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade e Prof. Dra. Elisa Soares Rocha Barbosa pelos ensinamentos ao longo deste ano. Ao CNPQ que financiou este projeto de pesquisa.

Aos meus amigos da geologia que fiz durante a graduação, que conheci na USP e pelo Brasil.

Aos meus amigos desde o ensino fundamental pelo apoio e parceria que duram mais de 10 anos, Igor, Buoso, Lira e Dias.

A minha família que me apoiou e incentivou durante momentos difíceis. E a minha companheira Dryelly por todo amor, incentivo e amizade que me proporcionou.

**RESUMO:** Remineralizadores são produtos passíveis de cadastro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), definidos como rochas fragmentadas que alteram o índice de fertilidade do solo. Este estudo teve como objetivo caracterizar três rochas da província alcalina de Goiás (PAGO), e de uma quarta amostra amplamente utilizada como remineralizador no estado de Goiás, denominada “KMC”, com o intuito de realizar avaliações comparativas sobre suas propriedades químicas e mineralógicas e os mecanismos facilitadores de liberação de potássio. Os métodos de caracterização química foram realizados por meio de fluorescência de raios X (FRX) enquanto a caracterização mineralógica e textural foi conduzida utilizando-se microscópio ótico, difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS). Adicionalmente, foi realizado um experimento de dissolução em ambiente controlado para avaliar o potencial de liberação de cátions em meio ácido. A solução foi preparada com água ultrapura (MILIQ) e ácido acético com pH estabilizado em 5, utilizando metodologia amplamente reconhecida na literatura. A nefelina foi identificada como o mineral com maior potencial de liberação de potássio para o meio.

Palavras-chave: província alcalina de goiás, feldspatoïdes, liberação de potássio, remineralizadores, pó de rocha.

---

**ABSTRACT:** Remineralizers are products eligible for registration with Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), defined as fragmented rocks that alter soil fertility levels. This study aimed to characterize three rocks from the alkaline province of Goiás (PAGO) and a fourth sample, widely used as a remineralizer in the state of Goiás, referred to as “KMC,” with the purpose of conducting comparative assessments of their chemical and mineralogical properties, as well as the mechanisms facilitating potassium release. Chemical characterization methods were conducted using X-ray fluorescence (XRF), while mineralogical and textural characterization was performed using optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM-EDS). Additionally, a dissolution experiment was conducted in a controlled environment to evaluate the potential for cation release in an acidic medium. The solution was prepared with ultrapure water (MILIQ) and acetic acid with a pH stabilized at 5, using a methodology widely recognized in the literature. Nepheline was identified as the mineral with the greatest potential for potassium release into the medium.

Keywords: alkaline province of Goiás, feldspatoids, potassium extraction, remineralizers, rock powder.

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                          | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                           | <b>3</b>  |
| <b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>                        | <b>4</b>  |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                  | <b>5</b>  |
| <b>4.1. Métodos.....</b>                            | <b>5</b>  |
| <b>5. CONTEXTO GEOLÓGICO.....</b>                   | <b>12</b> |
| <b>5.1. Geologia Regional.....</b>                  | <b>13</b> |
| <b>5.2. Localização das Amostras .....</b>          | <b>15</b> |
| <b>6. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                   | <b>17</b> |
| <b>6.1. Caracterização petrográfica .....</b>       | <b>17</b> |
| <b>6.2. Composição Química.....</b>                 | <b>28</b> |
| <b>6.3 Difratometria de raios X.....</b>            | <b>33</b> |
| <b>6.4 Microscopia eletrônica de varredura.....</b> | <b>43</b> |
| <b>6.5 Experimento de dissolução.....</b>           | <b>53</b> |
| <b>7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>     | <b>55</b> |
| <b>8. CONCLUSÃO.....</b>                            | <b>62</b> |
| <b>9. REFERÊNCIAS .....</b>                         | <b>63</b> |

# Apêndices

**Apêndice A – Difratogramas refinados**

**Apêndice B – Mapas compositionais**

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil é o maior importador global de potássio do mundo, sendo que os fertilizantes somam 80% das importações da demanda nacional. No Brasil, cerca de 40% do potássio usado no país foi importado da Rússia e Bielorrússia (Embrapa, 2024).

No ano de 2022, o preço dos fertilizantes chegou a preços recordes em consequência do início da guerra na Ucrânia. Segundo Seixas (2024), o conflito entre Israel e o Hamas no Oriente Médio pode influenciar substancialmente a produção e exportação de cloreto de potássio. A apenas 100 km do epicentro militar na Faixa de Gaza, se encontra a produção e extração destes insumos no deserto de Negev em Israel, em que há preocupações sobre a capacidade das empresas locais não continuarem a operar com navios para exportação. (Embrapa, 2024).

Boa parte das áreas plantáveis no Brasil estão sobre latossolos e argissolos, e apesar de serem característicos por serem empobrecidos em macronutrientes, o setor de agricultura é responsável por 21% do PIB (Produto Interno Bruto) produzido pelo país, e responsável por 43,2% das exportações brasileiras, chegando a US\$ 96,7 bilhões gerados em 2019 (Embrapa, 2020). Entretanto, essa produtividade é custeada por toneladas de cloreto de potássio (KCl) importadas anualmente.

O potássio (K+) é um dos macronutrientes essenciais para todas as plantas. E atualmente, grandes e pequenas empresas produtoras, utilizam o cloreto de potássio como fonte de potássio. O cloreto de potássio (KCl) apesar da alta solubilidade, também tem sérias desvantagens. O KCl apresenta alto índice salino e em aplicações com doses elevadas pode causar danos às plantas, como cloroses, queimas e perda de produção em períodos de secas. Além disso, o KCl liberado no solo “afeta o crescimento e distribuição das raízes como a absorção de água e nutrientes, porque diminui o potencial osmótico próximo à rizosfera, dificultando o caminho de íons até as raízes” (SILVA et al. 2008). Uma alternativa para reduzir a quantidade de KCl importado pelo Brasil e ainda manter os níveis elevados de produção sem impactar a microbiota do solo e a fertilidade agrícola está no uso de remineralizadores, que vêm se tornando uma solução viável para esta problemática.

Swoboda et al. (2022) reuniram trabalhos feitos por diversos autores com pós de rochas. Dentre os trabalhos, são relatados efeitos positivos ao ser aplicado pós de rocha de diferentes composições, algumas com potencial de aumentar o processo de sequestro de carbono pelo processo de carbonatação de minerais. Outros trabalhos apresentaram redução de óxido nitroso ( $N_2O$ ) e amônia ( $NH_3$ ) dos solos. Os estudos feitos com rochas de composição

máfica/ultramáfica, e com minerais feldspatoides obtiveram os melhores resultados na liberação de macronutrientes.

Atualmente no Brasil, conforme a Lei 12.890, 10 de dezembro de 2013 (Brasil – Instrução Normativa núm. 5, 10 de março de 2016), os remineralizadores são produtos que devem ser registrados no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), e são classificados como:

*“e) remineralizador, o material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo;*

*Art. 4º As pessoas físicas ou jurídicas que produzam ou comercializem fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas são obrigadas a promover o seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, conforme dispuser o regulamento.”*

Visto a dependência do Brasil em importar adubos e fertilizantes e a situação política dos principais fornecedores de potássio no mundo, faz-se necessário o estudo de caracterização de rochas potássicas no Brasil como potenciais fontes alternativas de fertilizantes e insumos agrícolas.

Para isto, este trabalho focou seus estudos nas rochas da Província Alcalina de Goiás, dos complexos Fazenda Buriti e Montes Claros em comparativo com outra amostra caracterizada como um remineralizador pelo MAPA no estado de Goiás. As rochas foram moídas e identificadas as fases minerais em difratometria de raios X, análise das lâminas em microscopia eletrônica de varredura e microscópio ótico e experimento de bancada para avaliação do potencial de liberação de cátions em meio ácido, utilizando ácido acético.

## **2. OBJETIVOS**

O presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de amostras selecionadas da Província Alcalina de Goiás para uso na remineralização de solos, através de análises químicas, mineralógicas, texturais e de ensaios de solubilidade e liberação de cátions em ambiente controlado, com foco nos mecanismos de liberação do potássio.

A partir dos estudos de caracterização geoquímica e avaliação do potencial de dissolução e liberação de potássio ( $K^+$ ) das rochas da Província Alcalina de Goiás, espera-se contribuir com o conhecimento sobre os processos de liberação de nutrientes.

### **3. JUSTIFICATIVA**

O projeto busca desenvolver estratégias para a identificação de minerais que possam fornecer nutrientes, especialmente potássio, utilizando petrografia, difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Com relação à difratometria de raios X, este estudo apresenta análises quantitativas das fases por meio do método de Rietveld, o qual poderá ser aplicado em larga escala em análises rotineiras de rochas com características semelhantes que tenham potencial remineralizador. No que tange à microscopia eletrônica de varredura, foram utilizados mapas compostionais e análises texturais para investigar os minerais que podem fornecer potássio e sua relação com a formação de minerais secundários. Este trabalho também inclui experimentos sobre solubilidade, focando na liberação de potássio, sendo esses métodos ainda sem normatização no Brasil.

Mais importante que reduzir os gastos com a importação de KCl é garantir um desenvolvimento sustentável sem agredir os solos e o meio ambiente. O uso de remineralizadores é uma das melhores soluções para a problemática discutida, além de ser uma atividade que está de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda de 2030 da ONU, da qual o Brasil faz parte. (Disponível: <https://www.globalgoals.org/>, acesso em 26/03/2024). Caracterizar as amostras da Província Alcalina de Goiás e avaliar seu potencial de dissolução irá subsidiar a compreensão dos fenômenos no solo e nas plantas, decorrente da aplicação de remineralizadores.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do presente trabalho 3 amostras de rochas previamente selecionadas da província alcalina de Goiás foi enviada pela Universidade de Goiás, e uma última amostra de rocha denominada KMC, que já é amplamente usada como remineralizador na região, totalizando 4 amostras de rochas. Espera-se comparar a amostra KMC, caracterizada e cadastrada como remineralizador, com as outras três amostras cujo potencial se pretende testar.

### 4.1. Métodos

Como primeira atividade foi realizada revisão bibliográfica da literatura especializada sobre agrominerais silicáticos e da Província Alcalina de Goiás, esta etapa se estendeu ao longo do ano inteiro.

Com as amostras disponibilizadas, foi feita a análise por petrografia óptica, com microscópio de luz polarizada refletida e transmitida de lâminas de seções polidas das 4 amostras.

Para a realização do experimento de dissolução, as rochas foram fragmentadas em frações menores, próximas de britas, e por fim uma moagem em disco. Ao fim da moagem, os fragmentos foram colocados em peneirador mecânico e as frações armazenadas em zips-locks. A figura 01 apresenta as rochas após fragmentação em britador primário. A figura 02 apresenta o agitador mecânico junto com as panelas utilizadas para separar as frações.



Figura 01 - Amostras após serem britadas.



Figura 02- Esquerda: 1) moinho de disco e 2) agitador mecânico. Direita: Esquema de panelas com as frações passantes.

Para a caracterização das amostras por difração de raios X, as amostras foram previamente moídas em prensa hidráulica e depois em moinho de panelas de ágatas (figura 03), no laboratório de tratamento de amostras (LTA) do IGc-USP.



Figura 03 – Moinho vibratório Pulverisette 9 – marca FRITSCH

Após a moagem, as amostras foram levadas para o laboratório de raios X (LDRX) do IGc-USP. O equipamento do laboratório é uma D8 Advance, da empresa Bruker (figura 04). Para a caracterização das amostras foi utilizado radiação de CuK $\alpha$ , com varredura entre 2° e 65°, passos de 0,020° e detector LynxEye de abertura de 2,947°. Para a avaliação quantitativa e qualitativa das amostras, foi utilizado o programa “Profex” (Doebelin. N, Kleeber. R, 2015).

O Profex é um software gratuito, disponível no site ([www.profex-xrd.org/](http://www.profex-xrd.org/), acessado em out/2024), programado em C++ e possibilita o refinamento Rietveld por difração de raios X pelo método de pó. Além disso, também é possível importar arquivos de estruturas cristalinas em formato (.CIF) e realizar alterações estruturais e ajustar a convergência do modelo calculado para o observado.

As estruturas cristalinas importadas, algumas, foram baixadas do site ([www.crystallography.net/cod/index.php](http://www.crystallography.net/cod/index.php), acessado em out/2024) – banco de dados globais para fichas de estruturas cristalina de materiais orgânicos, inorgânicos e minerais – e outras fichas foram utilizadas do próprio banco de dados do programa. Como finalidade, o Profex permite

que quantifiquemos as fases observadas e exportamos os resultados químicos das amostras em base de óxidos. O Apêndice A apresenta os difratogramas refinados, com as curvas dos picos ajustados após o refinamento e os parâmetros estatísticos calculados.



Figura 04 – Difratômetro D8 Advance Bruker

A composição química total dos elementos maiores e traços pelo método de Fluorescência de raios X, realizada no laboratório de análises químicas do Instituto de Geociências da USP.

Obtenção de imagens de elétrons secundários e elétrons retroespalhados por microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS) no laboratório de caracterização tecnológica da USP (LCT Poli – USP) a partir das lâminas de seções polidas das rochas sem lamínula.

Para a avaliação da liberação de cátions, a fração utilizada foi 100% passante em 0,075mm. Swoboda et, al. (2022) apresentou estudo positivo para rochas que foram testadas em frações mais finas. O experimento de dissolução foi inspirado no trabalho de (Dias;

Azevedo, 2013) – Solubilização de Basaltos por ácidos orgânicos. O trabalho foi apresentado no “II Congresso Brasileiro de Rochagem” em poços de caldas.

Cada amostra foi separada em alíquotas de 15g para reagir com a solução (figura 05). A preparação da solução ácida foi feita com uma mistura de água ultrapura (MILIQ) (1L) com uma fração mínima de ácido acético glacial (figura 06), com estabilização da solução em pH 5.

As alíquotas de 15g de cada rocha foram colocadas em beckers de vidro de 250ml. Cada becker foi preenchido com 150ml da solução ácida, gerando uma proporção de peso/liquido (1g:10ml ácido). Os beckers foram posicionados sobre um agitador magnético, e imãs (peixinhos) foram colocadas dentro dos beckers com o objetivo de acelerar o processo de dissolução aumentando o atrito e consequentemente a dissolução do pó de rocha na solução (figura 07). Os pós de rocha ficaram em reação durante 16hrs e foram tampados com vidro de “relógio”. O experimento se iniciou no dia 08/out às 17hrs, e as amostras foram retiradas da solução às 9hrs do dia 09/out. Após a coleta do líquido, ainda foi filtrada a solução (figura 08), a fim de se retirar micropartículas que poderiam afetar o equipamento de leitura ICP-OES, do LCT.



Figura 05 – Aliquota de 15g da amostra MY-06.

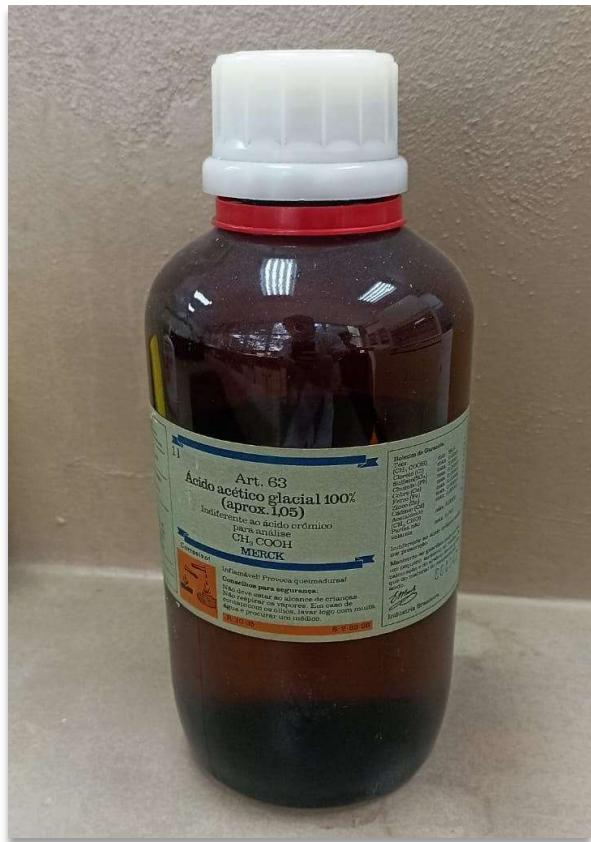


Figura 06 – Ácido acético glacial utilizado no preparo da solução ácida.

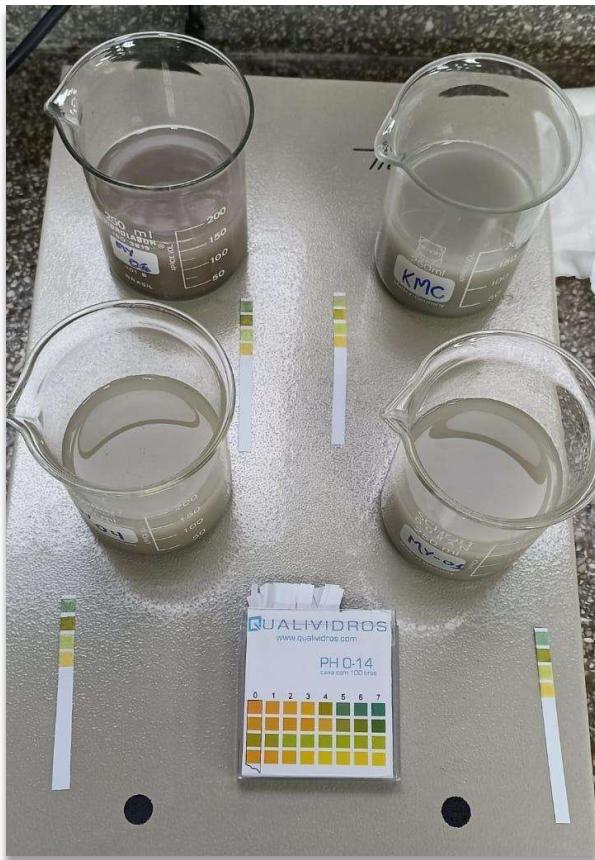


Figura 07 – Disposição dos beckers sobre o agitador magnético. Notar pH próximo de 5.

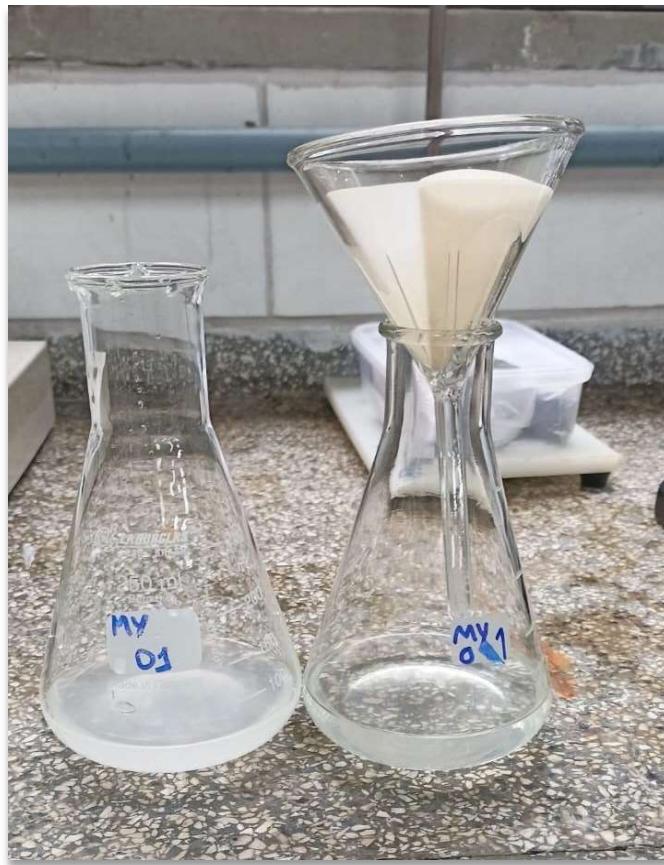


Figura 08 – Filtragem da solução para retirar micropartículas que podem comprometer o equipamento de leitura.

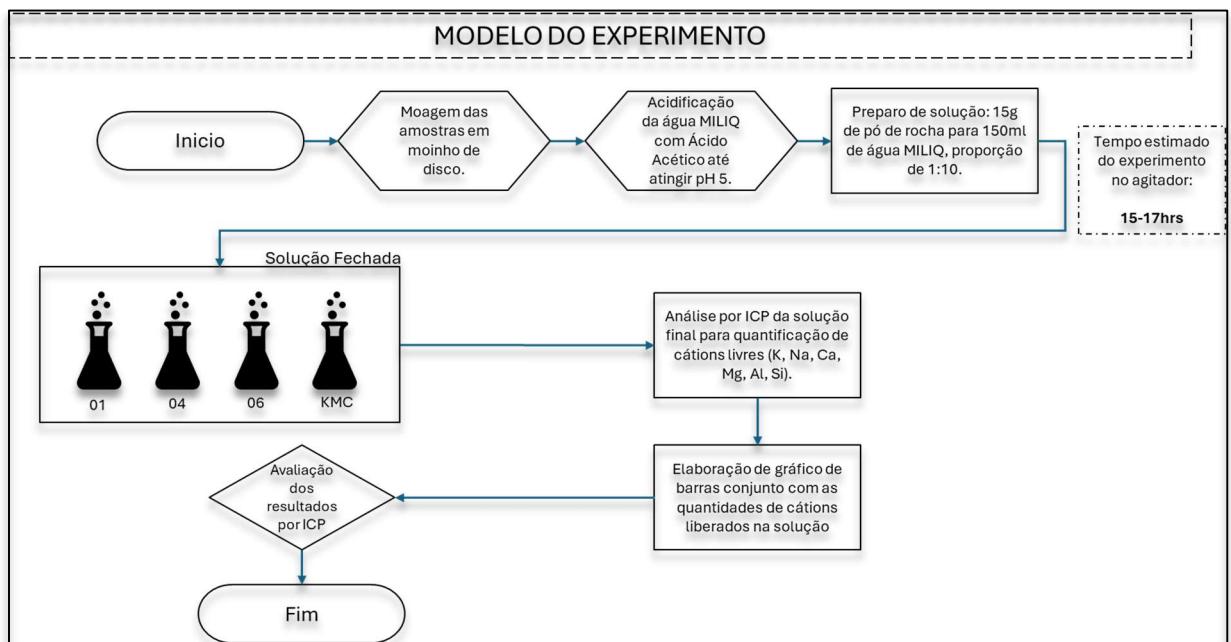


Figura 09 – Modelo conceitual do experimento de dissolução.

Após a obtenção dos resultados foi feita análise e interpretação dos dados, com caracterização das fases cristalinas e as fases amorfas presentes nas amostras estudadas, considerando a textura mineral, sanidade mineral, a composição química de cada fase mineral, além da comparação entre os resultados obtidos e os dados na literatura.

## 5. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Alcalina de Goiás (PAGO), figura 10, localizada na borda NNE da Bacia do Paraná no estado de Goiás, engloba uma diversidade de rochas alcalinas resultantes de eventos magmáticos que afetaram a Plataforma Continental Brasileira durante o Mesozóico (Almeida et al. 1977). Almeida (1986) associa o magmatismo com dois eventos, um primeiro evento tectônico extensional no Cretáceo Inferior associado ao magmatismo Serra Geral, e um segundo evento no Cretáceo Superior com reativação de zonas de falhas durante a abertura do Oceano Atlântico e por sequência a ascensão do magma alcalino.

Na literatura, autores se referem à mesma área com diferentes nomes. Almeida (1983) agrupa as rochas da borda da Bacia do Paraná em diferentes províncias, sendo as de Goiás de “Província Rio Verde – Iporá”. Lacerda Filho et al. (2000) se referem às rochas da “Província Alcalina do Sul de Goiás”. Sgarbi & Gaspar et al. (2003) agruparam a Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) com a nomenclatura de Almeida (1983) e denominaram de “Província Alcalina Minas – Goiás”. Gaspar et al. (2000), a partir de dados isotópicos, distinguem a Província Ígnea do Alto Paranaíba e das rochas de Rio Verde – Iporá, sendo a última denominada como Província Alcalina de Goiás (PAGO). Brod et al. (2005) mantiveram a nomenclatura de Gaspar et al. (2000), e trabalhos posteriores utilizaram da mesma denominação da região, assim como o presente trabalho.

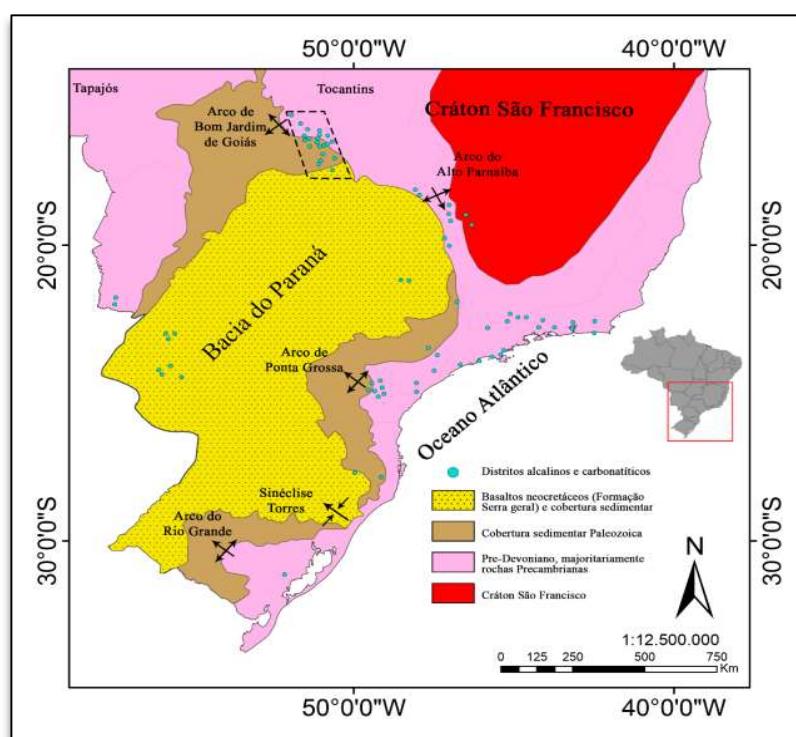


Figura 10 – Mapa esquemático da distribuição das Províncias Alcalinas Cretáceas em torno da Bacia do Paraná. Em destaque a localização da Província Alcalina de Goiás. Extraído de (VIEIRA, M. M.; BRITO, Y. L.; E, BARBOSA.,2024)

## **5.1. Geologia Regional**

As rochas da Província Alcalina de Goiás (PAGO), datadas cerca de 88-90 M.a (Gaspar, 2000), ocorrem no sudoeste de Goiás, na borda norte da Bacia do Paraná em formas de sills, plugs e diques, além de derrames e depósitos piroclásticos.

Brod et al. (2005) separaram a PAGO em três grandes complexos. O complexo plutônico norte é composto por rochas de granulometria grossa a média, essencialmente gabros alcalinos e sienitos. Fazem parte do complexo, Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros, Córrego dos Bois, Morro do Macaco, Fazenda Buriti e Arenópolis. As rochas deste complexo, ocorrem como diques e dunitos associados a intrusões que podem chegar até 5km de diâmetro como no Morro do Engenho, ou possuir cerca de 50 km<sup>2</sup> de extensão, como no caso do complexo Montes Claros.

A parte central da PAGO é formada por corpos subvulcânicos. Um exemplo, está a cerca de 10 km sul da cidade de Amorinópolis, na fazenda Bebedouro, onde ocorre um corpo de 1,2 km de diâmetro, parte de um magmatismo ultrabásico alcalino e de composição basanítica. Outro exemplo importante é em Águas Emendadas, onde diques e plugs ocorrem com depósitos piroclásticos. Brod et al. (2005), associam essas rochas a uma extensão do complexo de Santo Antônio da Barra.

A porção sul é formada por depósitos piroclásticos e derrames de lava (Lacerda Filho et al. 2000) da série kamafugítica do Complexo Santo Antônio da Barra. De norte a sul foi indicado por Brod et al. (2005), um aumento acentuado no nível de subsaturação em sílica. Com predominância de rochas menos subsaturadas de sílica no norte da PAGO, e de rochas da série kamafugitos da parte centro-sul da PAGO fortemente subsaturadas em sílica.

Dos municípios de Santa Fé e Araguiana, ao norte, até Rio Verde ao sul, as rochas alcalinas são alinhadas preferencialmente N30W, com aproximadamente 250 km de comprimento e 70 km de largura, o que coincide com a tendência de falhas (Brod et al. 2005). As maiores estruturas pré-cambrianas relacionadas com a ascensão dos magmas alcalinos do Cretáceo são: em primeiro, Arco Bom Jardim de Goiás, anticlinal com eixo S80W (Pena, 1974), pelo método de K-Ar o evento ocorreu entre 75 e 81 M.a. (Danni, 1974), e em segundo, o Lineamento Transbrasiliana orientada preferencialmente NE-SW, o evento tem idade aproximada de 60 M.a. (Danni, 1974). A figura 11, contém a localização dos complexos da província alcalina de Goiás, que somam 11 unidades alcalinas.

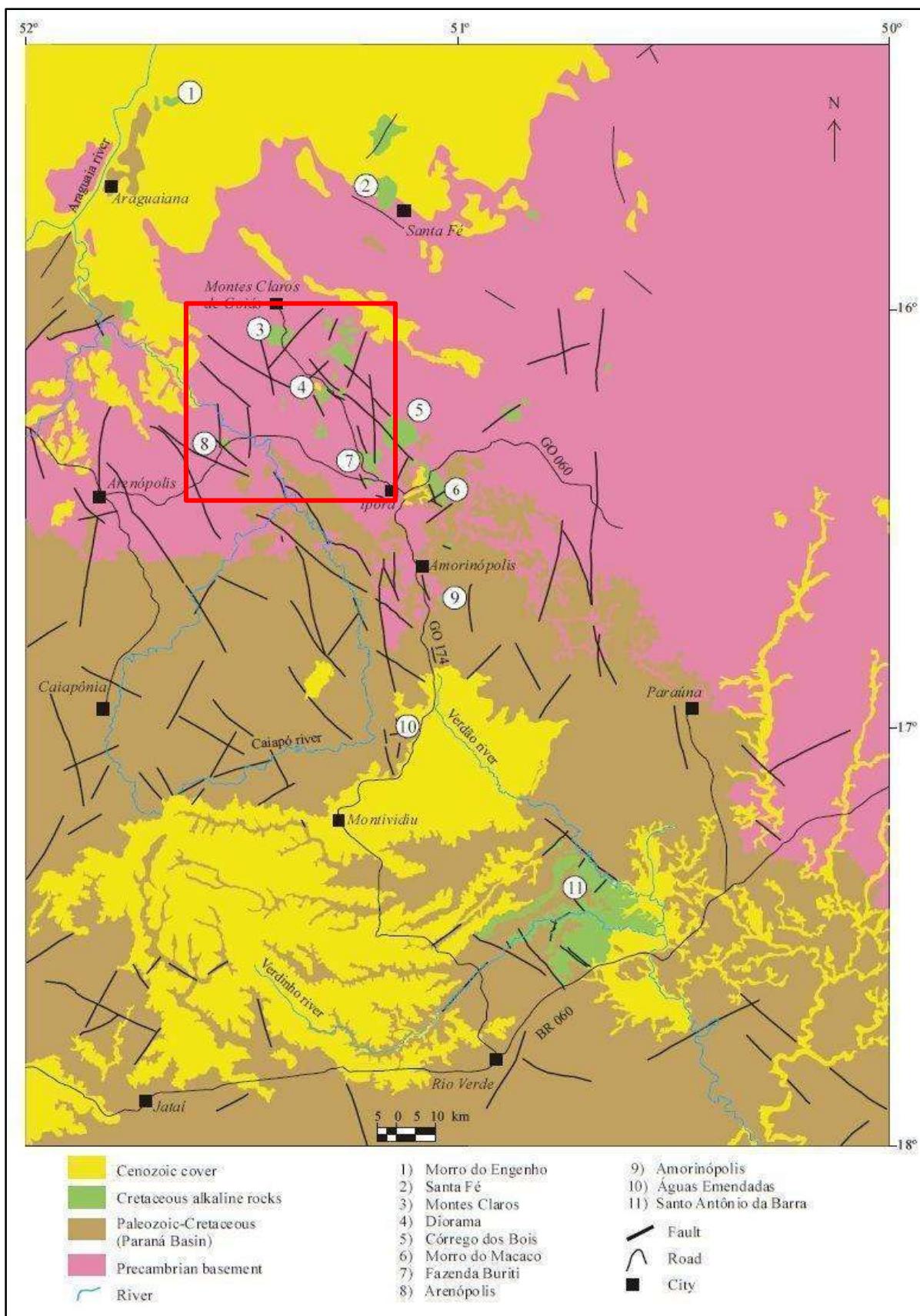


Figura 11 – Localização dos Complexos Alcalinos de Goiás. Em vermelho, destaque para o Mapa de Localização das amostras. Adaptado de Brod et al. (2005)

## 5.2. Localização das Amostras

Foi elaborado o mapa de *Localização das amostras*, as unidades geológicas foram separadas com base nas idades máximas das rochas, através dos dados vetoriais SIG do Mapa Geológico de Goiás da CPRM (Disponível: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10512>, acesso em 06/07/2024). A numeração dos complexos alcalinos foi mantida iguais aos da figura anterior a fim de se manter a rotulação prévia e facilitar a identificação das unidades alcalinas provêm as quatro (04) amostras estudadas. Uma (01) amostra localizada no Complexo da Fazenda Buriti (MY-06 – Lat: -16.354, Long: -51.186); duas (02) amostras do Complexo Montes Claros (MY-01 – Lat: -16.078, Long: -51.398 e MY-04 – Lat: -16.052, Long: -51.392); e por último, uma (01) amostra que provém de outro corpo alcalino que não está mapeada no mapa geológico, coletado na mineradora LGV MINERAÇÃO (figura 12), amostra nomeada como (KMC – Lat: -15.844, Long: -51.662). Estas amostras provêm do trabalho de conclusão de curso Monique e Yuri (2024), intitulado de “Mapeamento Geológico em escala 1:30000 do Complexo Montes Claros de Goiás, Província Alcalina de Goiás” pela universidade federal de Goiás (UFG). Todas as amostras fazem parte do grande complexo plutônico norte.

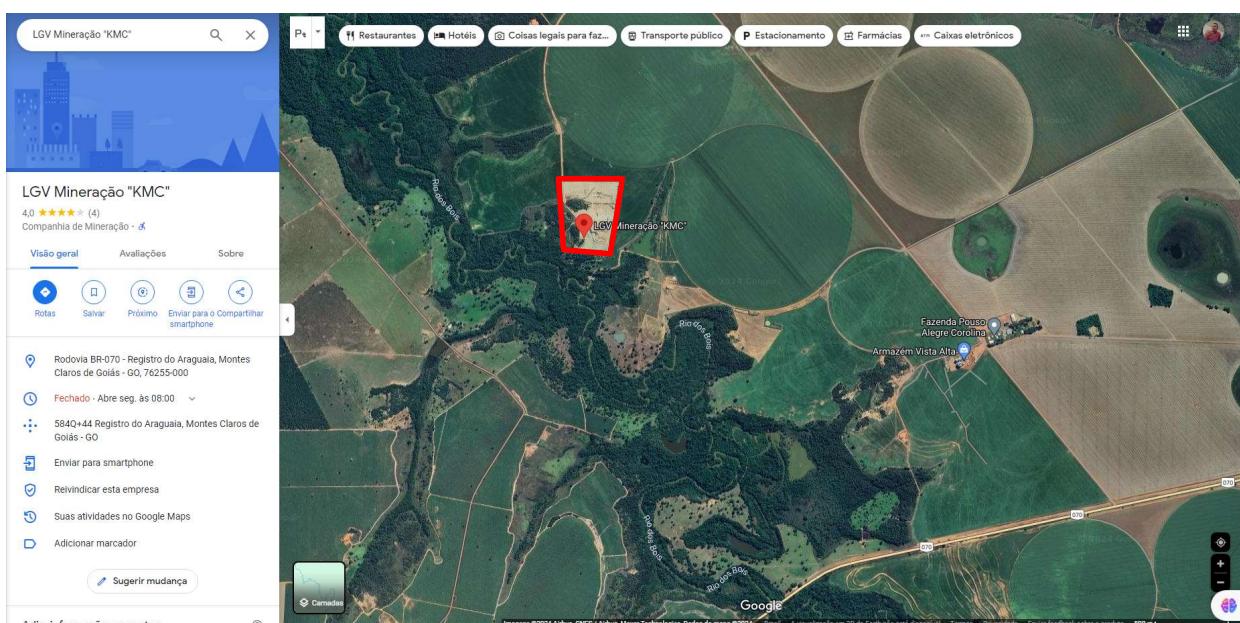
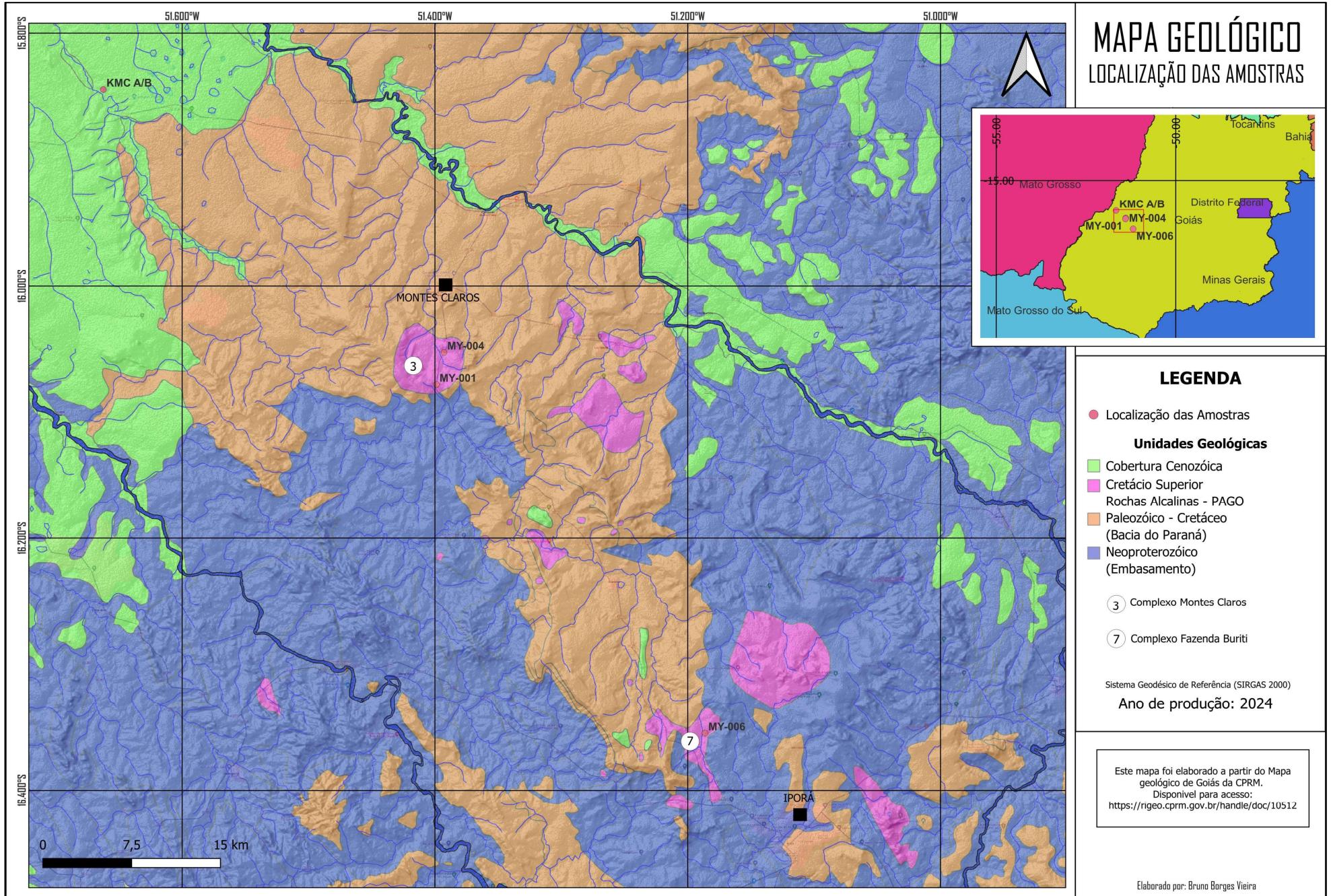


Figura 12 – Localização da amostra KMC, em vermelho área da Mineradora (Imagen de Satélite, print do Google Maps – 06/07/2024)



## 6. RESULTADOS OBTIDOS

### 6.1. Caracterização petrográfica

A amostra MY-01 foi caracterizada como Fonolito. A rocha possui coloração cinza escura com manchas rosadas de feldspatos que se destacam da matriz afanítica (figura 13). Em faces alteradas a coloração é bege com tons mais claros na alteração dos feldspatos. A rocha tem estrutura maciça e de granulometria fina a muito fina, com exceção dos feldspatos que aparecem eventualmente como fenocristais.

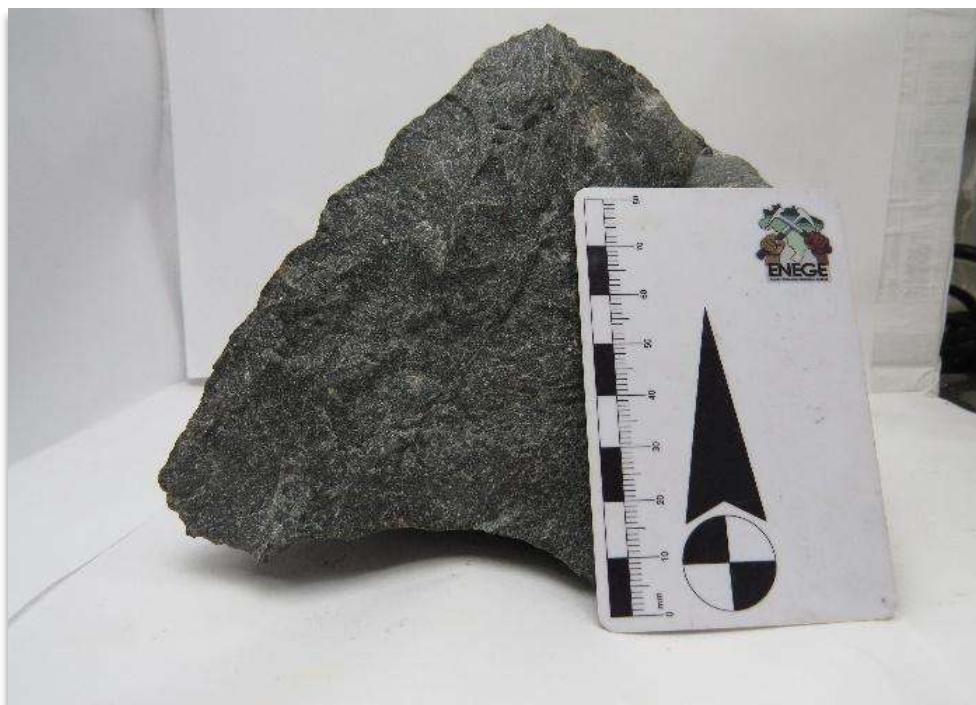


Figura 13 – Amostra de mão MY-01 - Fonolito

Em vista geral na (figuras 14, A e B) nota-se que os grãos se cristalizam em estrutura textural de fluxo e os grãos de aegirina (figura 14D) mostram os alongamentos, sendo que não apresentam uma orientação preferencial. Em destaque na lâmina, ocorrem fenocristais de nefelina (Figura 14, A e B) e ortoclásio (14C) dispersos na matriz. Também nota-se uma textura poiquilitica definida pelos feldspatos com intercrescimento na figura 14C. Nas bordas dos fenocristais de ortoclásio e nefelina, nota-se alteração para argilominerais além de se notar uma estreita alteração preferencial nos cristais de nefelina. Na figura 14F, nota-se um mineral isotrópico, de cerca de 0,5mm que se distingue dos outros minerais. Em MEV, foi determinado como silicato de ferro e cálcio, possivelmente tratando-se de um fragmento de andradita, granada rara que ocorre como mineral acessório em corpos alcalinos Silva, et al. (2018).

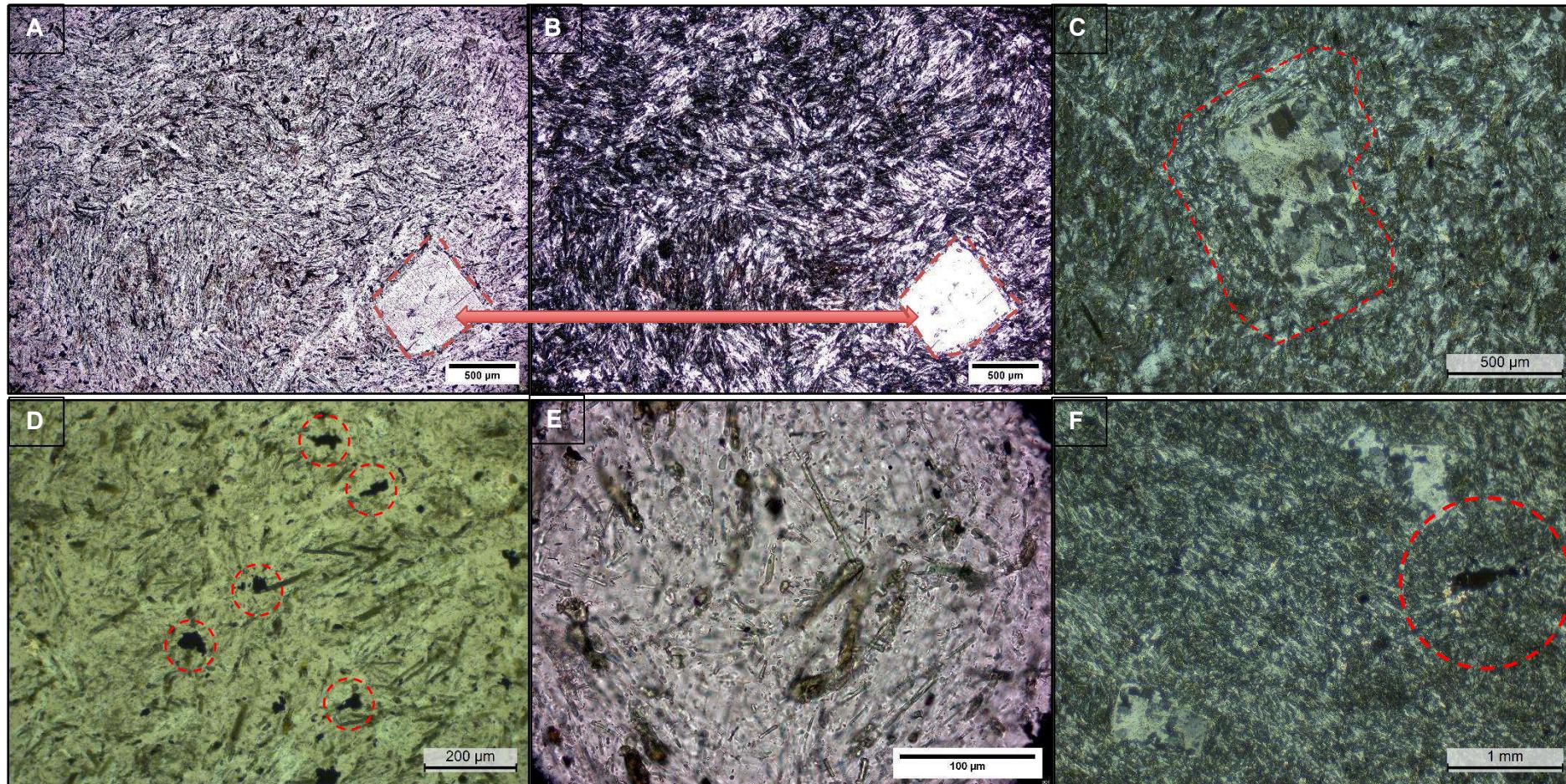


Figura 14 - A) Fenocristal de nefelina em matriz fanerítica fina de ortoclásio, plagioclásio e feldspatoïdes, nicois descruzados (ND). B) Imagem com nicois cruzados (NC) da imagem A. C) Imagem com NC de fenocristal de ortoclásio com intercrescimento de outros feldspatos, ver textura poiquilitica. D) Destaque para magnetita em formato anédrico acicular e aegirina em primas alongados, ND. E) Micro cristais de apatita em tons azulados em formato de agulhas, ND. Devido seu tamanho, não foi quantificada. F) Vista geral da lâmina, com fenocristais de nefelina e ortoclásio, e destaque para mineral isotrópico em NC, posteriormente definido como andradita.

A amostra MY-04 foi identificada como Nefelina Sienito. A rocha leucocrática maciça com textura fanerítica inequigranular fina a média (figura 15). Em faces alteradas, possui uma coloração bege acastanhada.

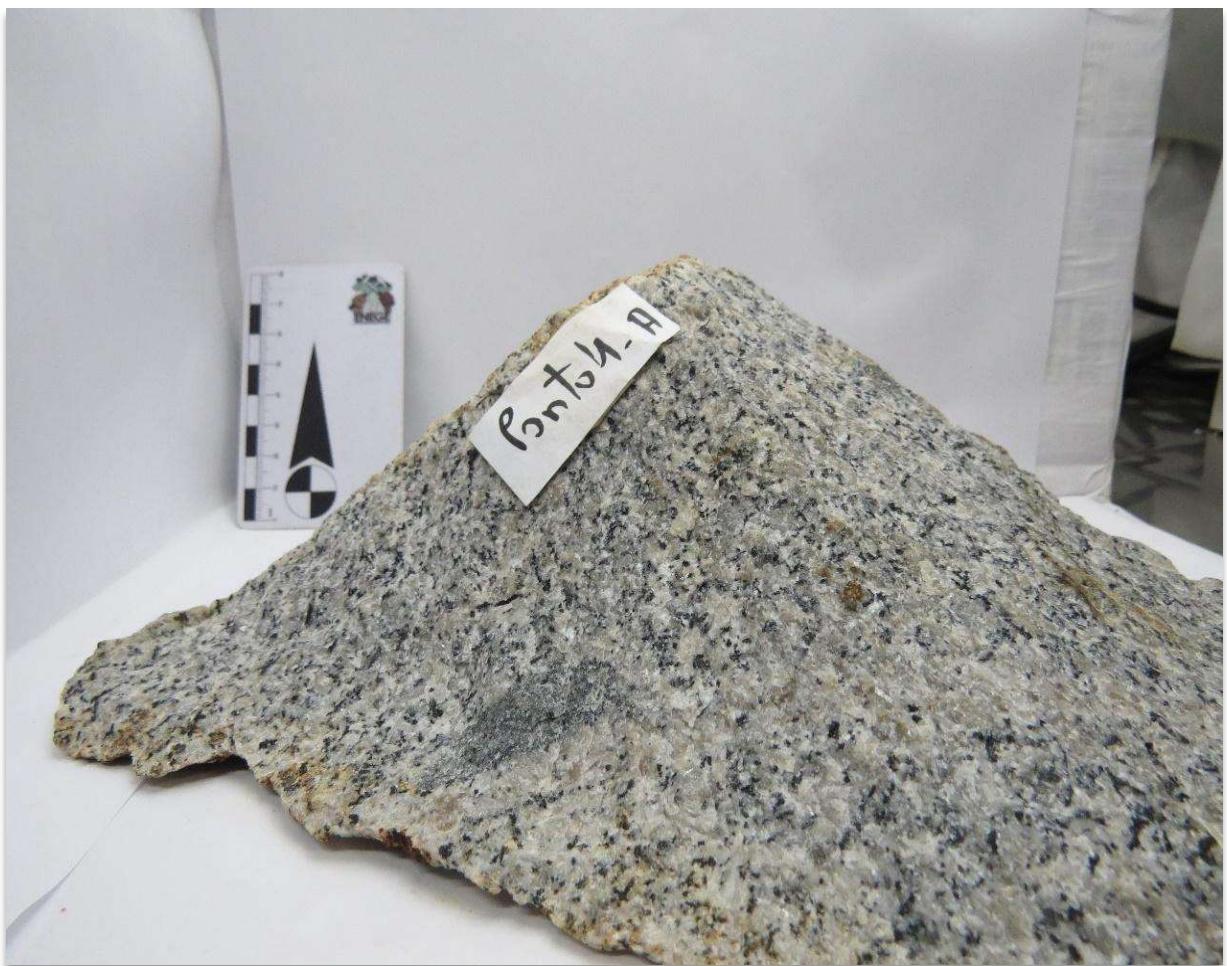


Figura 15 – Amostra de mão MY-04 – Nefelina Sienito

A rocha apresenta grãos inequigranulares médios a grossos de ortoclásio e nefelina, aegirina e hornblenda com textura poiquilítica, alguns grãos apresentam intercrescimento. Os minerais opacos observados em lâmina petrográfica são de magnetita e ilmenita, conforme observado em MEV. Como acessórios, ocorrem ainda titanita de tamanho médio a fino.

Os minerais aegirina e hornblenda ocorrem associados, geralmente com sobrecrecimento de hornblenda em torno do clinopiroxênio, mas também ocorrem grãos de hornblenda e aegirina isolados. A hornblenda frequentemente está alterada para outros minerais (figura 16, A, B e F), esses minerais possuem formato hexagonal e não foram determinados em lâmina, em MEV essas inclusões possuem enxofre e cloro na sua composição.

Na figura 16C, nota-se que a possuir alterações minerais com predomínios nas fraturas (ou clivagem), em DRX foi identificada os picos de sodalita, e muito sugere que este mineral

isotrópico seja este feldspatoides, outra provável associação seja a apatita no eixo C, e muito lembram ter formato hexagonal. Essas substituições não foram definidas. Os grãos de nefelina frequentemente ocorrem com alteração nas bordas ou clivagem mineral, com formação de cancrinita e analcima (figura 16, D e E), sendo que este segundo mineral foi identificado apenas no difratogramas de raios X e MEV.

Vale destacar que a analcima e a cancrinita são feldspatoides secundários, com ausência de potássio (K+), ja a nefelina (Na, K)(AlSiO<sub>4</sub>) possui, provavelmente existe a perda de sítios catiônicos de K na estrutura da nefelina, facilitando a formação de minerais secundários nessas posições, e essas alterações no mineral ajudam a distinguir dos demais minerais que possuem características óticas muito semelhantes (feldspatos). O ortoclásio não possui esse controle estrutural na alteração para fases secundárias, sendo que em lâmina, é o mineral menos alterado dos demais.

Os feldspatos da série do plagioclásio são raros, em geral com geminação pouco desenvolvida. Na lâmina os plagioclásios são muito semelhantes aos feldspatos alcalinos e quando ocorrem estão associados, sendo difícil uma estimativa razoável dessas fases importantes para a classificação.

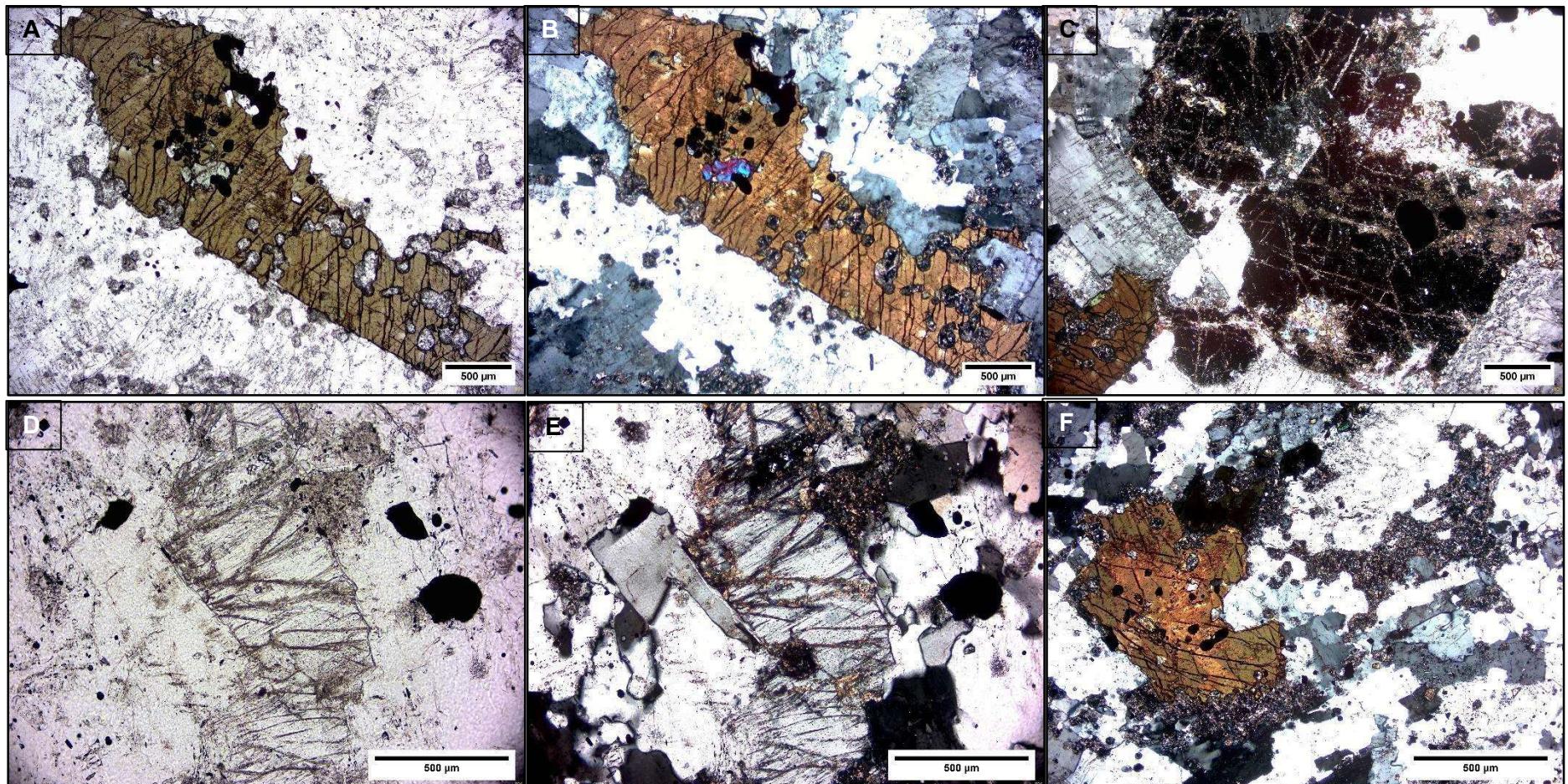


Figura 16 - A) Cristal de hornblenda, com sua clivagem característica, e com inclusões de minerais em formato hexagonal. Ao redor feldspatos e feldspatoides, (ND). B) Imagem com nicois cruzados (NC) da imagem A. C) Imagem com NC de mineral isotrópico com preenchimento de minerais nas fraturas, provavelmente seja sodalita. D) Destaque para nefelina com alterações mineral para cancrinita e analcima. E) Imagem em NC da imagem D. F) Vista geral da lâmina. Cristal de hornblenda a esquerda, com inclusões anédricas no mineral. A direita, feldspatoides com alteração e ortoclásio. Abaixo da hornblenda, ocorre sodalita com alteração para outros minerais.

A amostra MY-06 foi caracterizada como Nefelina Gabbro. A amostra de mão possui coloração cinza escuro com feldspatos de plagioclásios de cor branca, estrutura maciça e textura fanerítica média a grossa, holocrystalina e melanocrática (figura 17).



Figura 17 – Amostra de mão MY-06 – Nefelina Gabbro

Os minerais possuem granulometria média a grossa, sendo os máficos essencialmente de augita e biotita avermelhada (figura 19, A e B) e, em menor quantidade, hornblenda. A magnetita ocorre associada com a biotita, formando coroas de biotitas em torno das magnetitas (figura 19, A e C)

A nefelina apresenta alteração para analcima na superfície do mineral, visível em polarizadores cruzados, onde as áreas mais cinzas escuras ressaltam a alteração (figura 19, E e F). Logo abaixo da nefelina, ocorre um mineral isotrópico com alteração nas direções ortogonais ao seu crescimento, provavelmente trata-se de sodalita, por possuir as mesmas alterações que a amostra MY-04. As figuras 19C e 19D dão destaque para um grão de olivina isolado, o único em lâmina.

Utilizando o diagrama de rochas básicas (figura 18) que utiliza a proporção de plagioclásio, clinopiroxênio e ortopiroxênios, a amostra MY-06 é um gabbro, mais próxima da borda do clinopiroxênio, devido à maior proporção de augita que de plagioclásio.

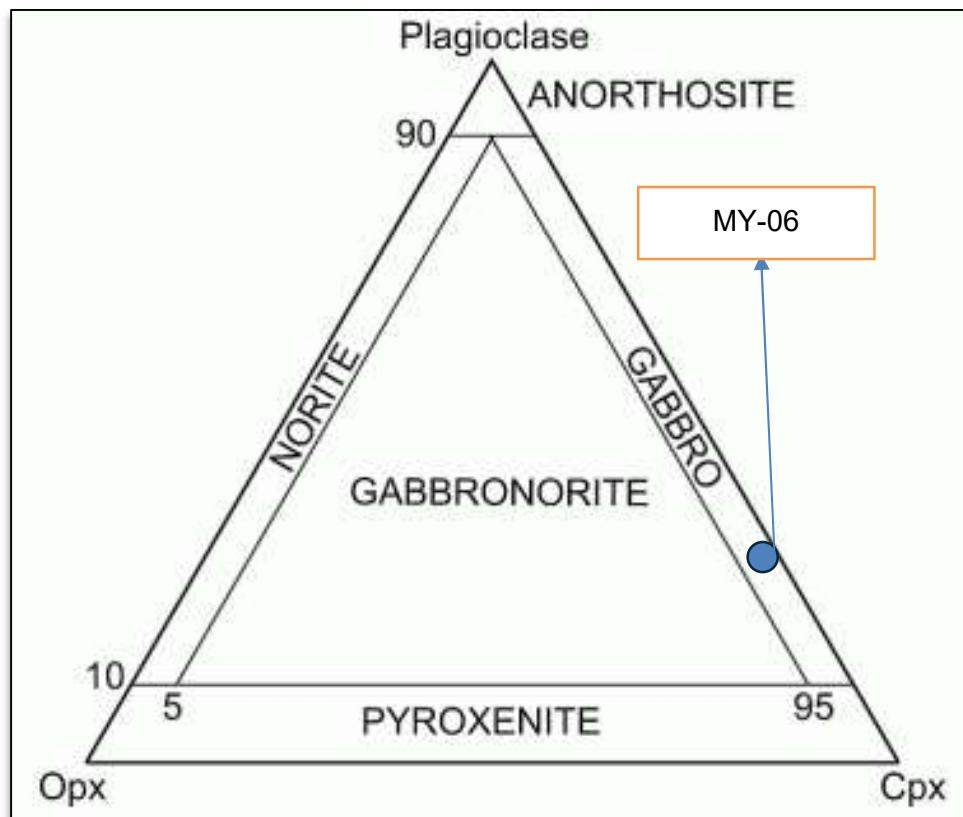


Figura 18 – Diagrama Plg, Opx, Cpx.

No diagrama químico de álcalis total x sílica (TAS) para rochas plutônicas, a amostra se encaixa no campo de Foid-Gabbro. Como a rocha é constituída por feldspatoides nefelina, podemos classificá-la como um Nefelina Gabbro (ver capítulo 6.2).

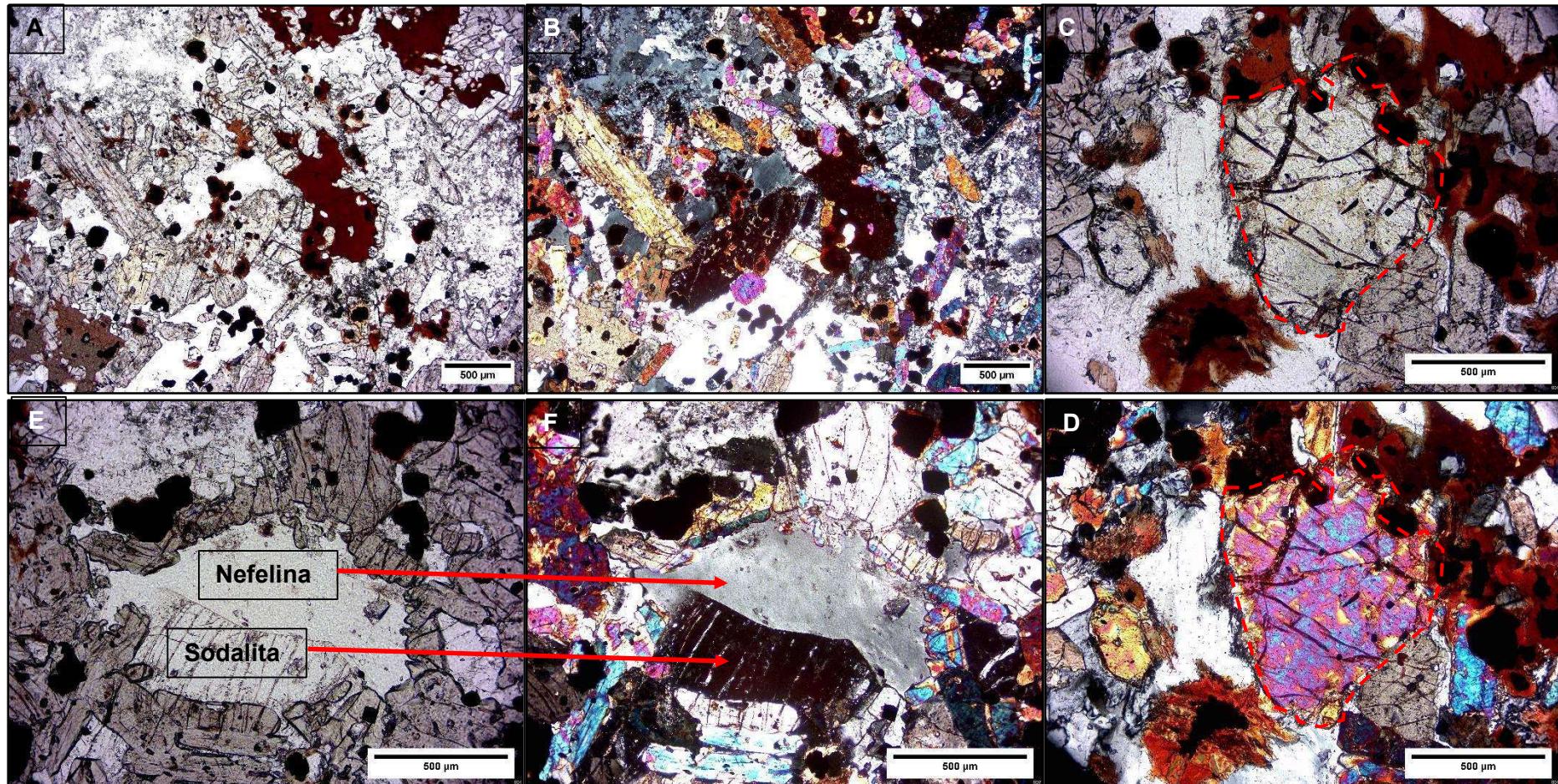


Figura 19 - A) Vista geral para os minerais essenciais da rocha: augita, biotita, magnetita, ortoclásio, plagioclásio e nefelina, em nicois descruzados (ND). B) Imagem com nicois cruzados (NC) da imagem A. C) Imagem com ND, ao centro cristal de olivina. D) Imagem em NC da imagem C. E) Imagem em ND com destaque para os feldspatoides nefelina e sodalita. F) Imagem E em NC.

A amostra KMC identificada como nefelina sienito, em amostra de mão possui cor cinza clara com capa de alteração bege a castanho, leucocrática, estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular média a grossa por feldspatos e fina de clinopiroxênios, magnetita e biotita (figura 20).



Figura 20 – Amostra de mão KMC – Nefelina Sienito

Os minerais possuem tamanho médios a grossos, sendo a composição mineralógica dominada por ortoclásio e nefelina. Nesta rocha, fica evidente que há baixa concentração de plagioclásios tanto em lâmina, quanto no difratograma observado (ver capítulo 6.3) que também não possui os picos identificados de plagioclásio. Imagens por MEV revelam que nas bordas dos grãos de ortoclásio ocorre a cristalização de albite, discutido no capítulo de microscopia eletrônica de varredura (ver capítulo 6.4).

A biotita, magnetita e aegirina ocorrem em menor proporção, associando-se localmente (figura 22, A e B), com biotita ao centro da imagem em cor alaranjada, e nas bordas ocorre os clinopiroxênios. Ao cruzar os polarizadores, vemos que os cristais de clinopiroxênio quase são extintos devido à sua alteração e a biotita tem o núcleo mais esverdeado.

Em destaque para os feldspatos alcalinos, e, comparativamente com as outras amostras que não são remineralizadores, notamos que os ortoclásio possuem muito mais geminações que

os outros feldspatos das amostras MY-04 e MY-06, por exemplo (figura 21). Essas geminações são do tipo Carlsbad e Albita (figura 22, B e F) simples e normais.

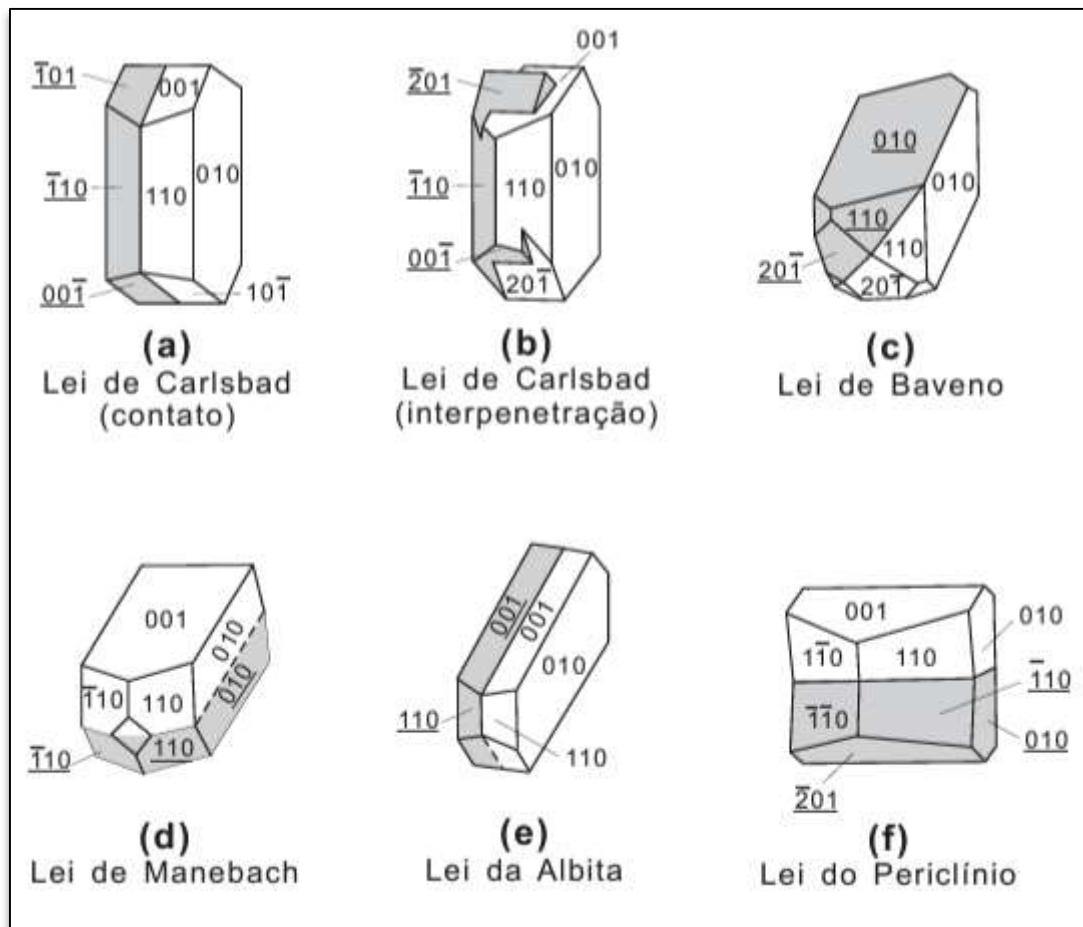


Figura 21 – Ilustração das geminações comuns em minerais dos grupos dos feldspatos. Extraído do livro de série didáticas Geologia USP.

Outro destaque para os feldspatos da amostra KMC é seu maior grau de alteração para filossilicatos (figura 22, E e F). Do grupo dos feldspatoides, se destaca a nefelina, e assim como as outras amostras, possui essa característica entremeada de alteração para analcima e cancrinita. Na figura 22C, em polarizadores descruzados, notamos ao centro uma biotita, e ao lado esquerdo, um grão de nefelina de tamanho médio que se distingue do ortoclásio pela sua alteração possuir uma orientação preferencial. Em polarizadores cruzados na figura 22D, vemos que a área mais cinza escura é preenchida por minerais secundários.

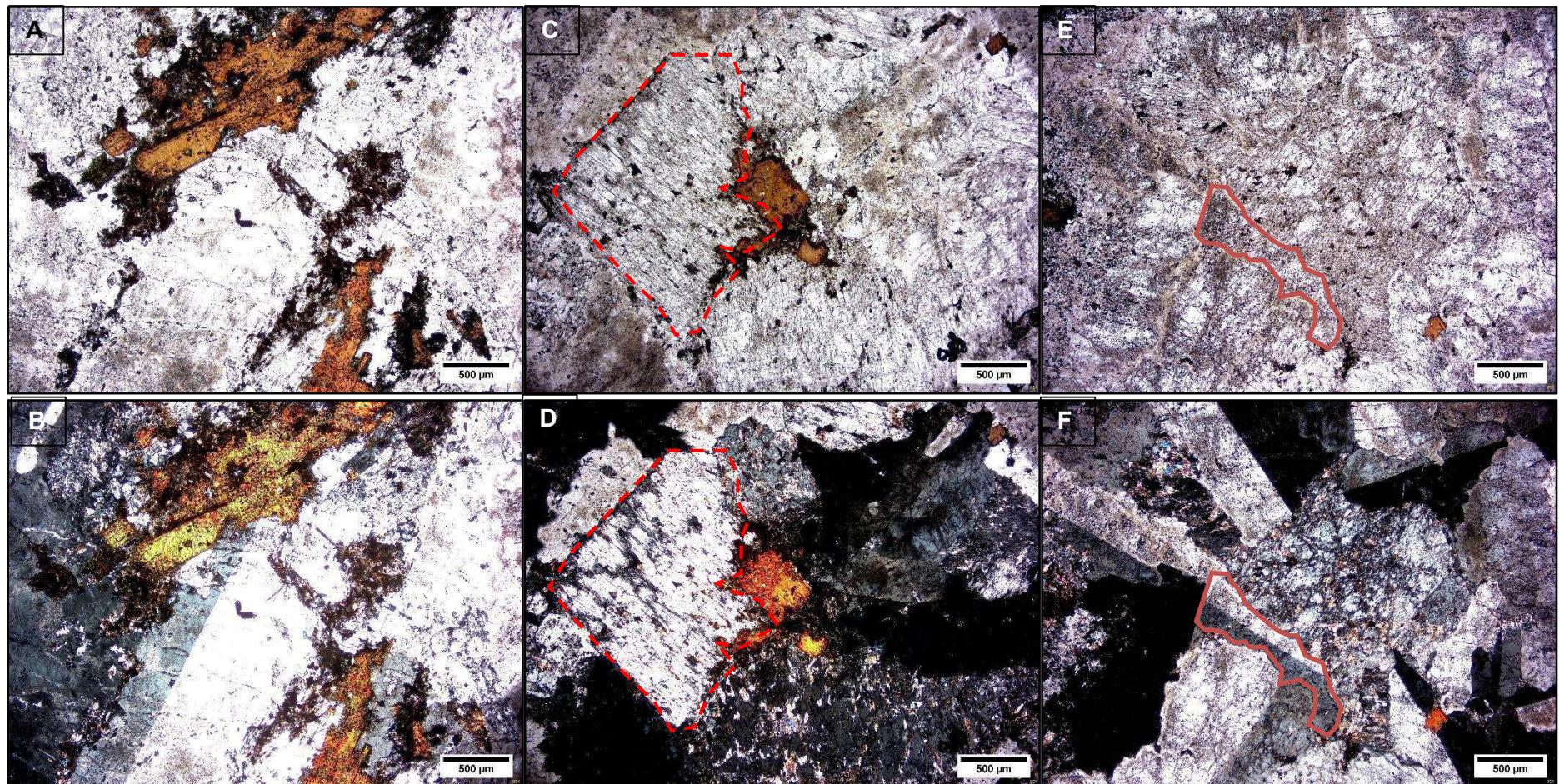


Figura 22 - A)Vista geral da lâmina, com mineral de biotita rodeado de aegirina quase extintos completamente devido a alteração, e grãos de ortoclásio e nefelina com pleocroismo mais baixo em cinza claro.(ND). B) Imagem com nicois cruzados (NC) da imagem A. C)Imagem com ND, ao centro biotita, bordeado de grãos de nefelina (destacada em vermelho) e ortoclásios. D)Destaque para nefelina com alterações mineral para cancrinita e analcima, NC da foto C; E)Imagem em ND com destaque para as alterações nos minerais primários e formação dos minerais secundários. D. F) Vista em nicois cruzados da imagem E, destacando as geminações dos feldspatos e a alteração de nefelina para analcima e cancrinita.

## 6.2. Composição Química

A amostra do complexo Fazenda Buriti tem o menor teor de SiO<sub>2</sub> dentre as amostras analisadas (43,9% em peso), enquanto as outras amostras do complexo Montes Claros junto com a amostra KMC, possuem uma média de 56,11% de SiO<sub>2</sub>. Este empobrecimento em SiO<sub>2</sub> também é notado por Brod et al. (2015). Segundo os autores, de norte a sul, os complexos alcalinos que fazem parte da PAGO se tornam subsaturadas em sílica, e mesmo estas amostras que fazem parte do complexo norte da província, há um empobrecimento considerável de mais de 10% de SiO<sub>2</sub> entre o complexo Montes Claros que está mais ao norte que Fazenda Buriti mais ao sul.

A amostra KMC possui um teor de K<sub>2</sub>O de 11,06%, enquanto as amostras do complexo Montes Claros, MY-01 e MY-04 tiveram teores de 7,75% e 7,12% respectivamente, e a amostra MY-06 apresentou o menor teor de óxido de potássio de todas, com 3,46%. Esta diferença de teores é confirmada na análise petrográfica. A amostra KMC possui maior concentração de ortoclásio que as outras amostras, principal mineral de potássio. Outra característica da amostra KMC, é a ausência de plagioclásio, e isto também é um efeito da própria composição química do magma que gerou esta rocha, que não chega a nem 1% de CaO, e o plagioclásio albita vem da albitização na borda do ortoclásio, visível apenas em MEV (ver capítulo 6.4).

A amostra MY-06 tem o maior teor de CaO, comparado com as outras amostras, e em contrapartida, é a amostra que menos tem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Isto também é refletido na própria mineralogia da rocha, e onde a proporção de piroxênio é maior que a de feldspatos. Essa relativa deficiência de 10% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, faz com que se cristalize menos grãos de feldspatos nas amostras da Fazenda Buriti do que os outros complexos. Não há teores de alumínio, sódio e potássio suficientes para gerar feldspatos. O que explica também essa amostra ser rica em minerais ferromagnesianos, como biotita, magnetita e titanita e piroxênio rico em cálcio, no caso, a augita. Os resultados das análises químicas de rocha total são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição químicas em base de óxidos para elementos maiores, e elementos traços em ppm (parte por milhão)

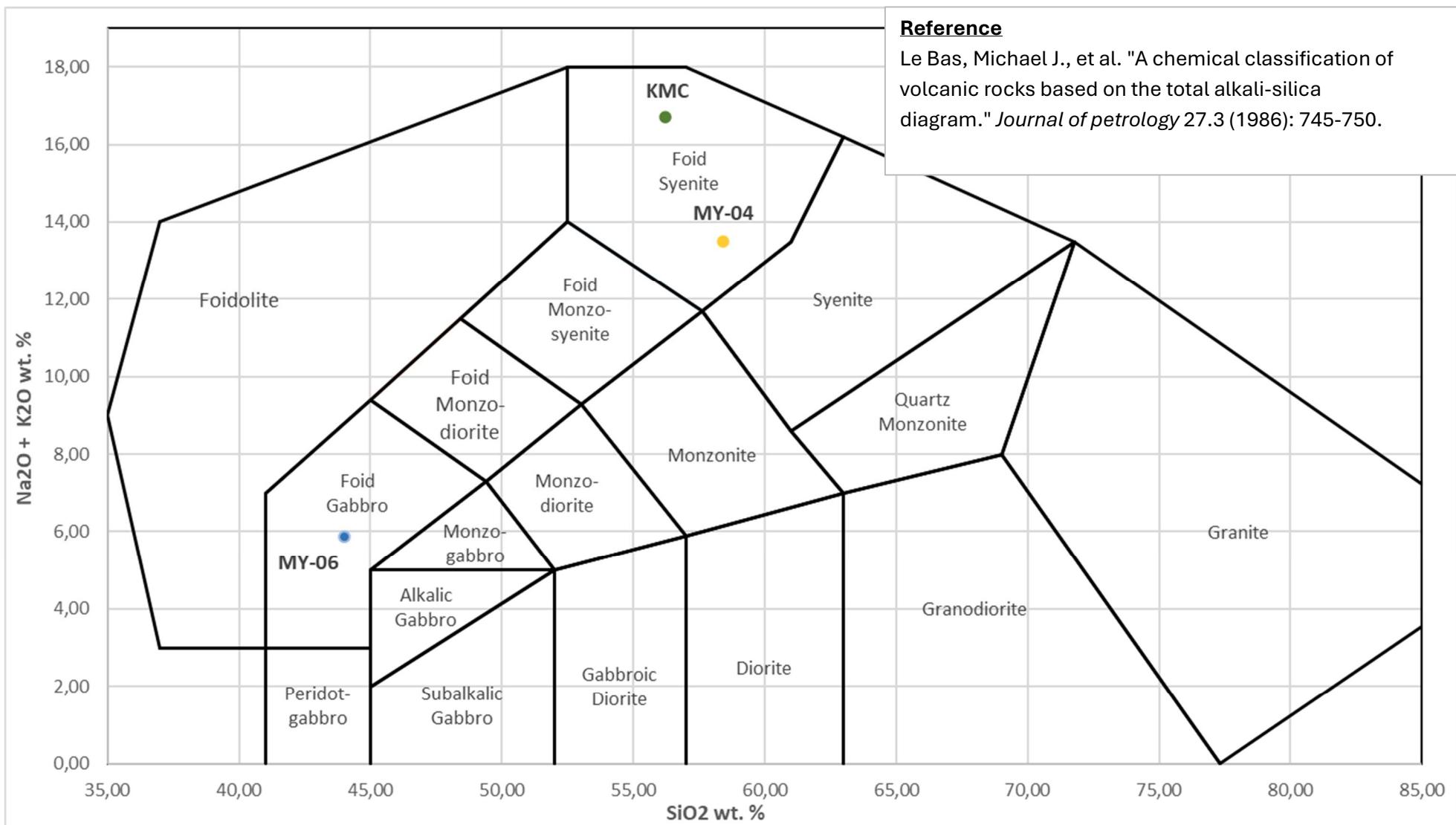
| Elementos maiores (%)              |               |               |                |              |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|--------------|
| Amostra                            | MY-01         | MY-04         | MY-06          | KMC          |
| <b>Complexo Alcalino</b>           | Montes Claros | Montes Claros | Fazenda Buriti | Não definido |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 56,94         | 56,98         | 43,92          | 54,41        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,341         | 0,570         | 3,935          | 0,523        |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 21,96         | 19,61         | 11,12          | 21,80        |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2,34          | 3,99          | 13,62          | 2,46         |
| <b>MnO</b>                         | 0,179         | 0,164         | 0,204          | 0,178        |
| <b>MgO</b>                         | 0,14          | 0,53          | 8,22           | 0,27         |
| <b>CaO</b>                         | 1,63          | 2,40          | 12,25          | 0,92         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7,78          | 6,04          | 2,38           | 5,11         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 7,75          | 7,12          | 3,46           | 11,06        |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,032         | 0,118         | 0,677          | 0,044        |
| <b>LoI</b>                         | 0,30          | 1,34          | 0,32           | 2,44         |
| <b>Total</b>                       | 99,39         | 98,86         | 100,11         | 99,22        |
| Elementos traços (ppm)             |               |               |                |              |
| <b>Ba</b>                          | 545           | 752           | 1004           | 47           |
| <b>Ce</b>                          | 153           | 152           | 155            | 249          |
| <b>Co</b>                          | < 2           | < 6           | 42             | < 6          |
| <b>Cr</b>                          | 30            | < 13          | 259            | < 13         |
| <b>Cu</b>                          | < 1           | < 5           | 56             | < 5          |
| <b>Ga</b>                          | 23            | 17            | 20             | 23           |
| <b>La</b>                          | 119           | 75            | 70             | 149          |
| <b>Nb</b>                          | 134           | 96            | 57             | 228          |
| <b>Nd</b>                          | < 35          | 46            | 59             | 65           |
| <b>Ni</b>                          | < 1           | < 5           | 109            | < 5          |
| <b>Pb</b>                          | < 2           | < 4           | < 4            | < 4          |
| <b>Rb</b>                          | 213           | 144           | 102            | 822          |
| <b>Sc</b>                          | < 3           | < 14          | 39             | < 14         |
| <b>Sr</b>                          | 407           | 723           | 904            | 34           |
| <b>Th</b>                          | 18            | < 7           | < 7            | < 7          |
| <b>U</b>                           | 4             | < 3           | < 3            | < 3          |
| <b>V</b>                           | 30            | 19            | 378            | < 9          |
| <b>Y</b>                           | 18            | 21            | 34             | 40           |
| <b>Zn</b>                          | 69            | 54            | 97             | 76           |
| <b>Zr</b>                          | 558           | 315           | 318            | 751          |
| <b>F</b>                           | 1366          | 411           | 976            | 838          |
| <b>Cl</b>                          | 465           | 664           | < 500          | < 500        |
| <b>S</b>                           | 178           | 3226          | < 550          | < 550        |

As amostras MY-01(fonolito) e MY-04(nefelina sienito), ambas do complexo Montes Claros, possuem uma química semelhante entre si. E faz sentido, quando pensamos na mineralogia. Apesar da primeira amostra ser uma rocha vulcânica, a amostra MY-04 seria a correlacionada plutônica. Nos elementos traços, vemos que o fonolito possui o maior teor de flúor que as outras amostras, e em sessão de MEV, nota-se que são formados microcristais de fluorita na clivagem dos fenocristais de nefelina (ver capítulo 6.4).

A partir dos resultados disponibilizados pelo laboratório, foram corrigidos os elementos maiores com a perda ao fogo. A Tabela 2 apresenta os resultados corrigidos. E com os pesos corrigidos, foi plotado as amostras nos diagrama TAS de rochas vulcânicas e plutônicas (Le Bas et al. 1986). A classificação das rochas apresentadas no capítulo 6.1 foi baseada no campo em que as amostras foram plotadas.

Tabela 2 - Elementos Maiores na base de Óxidos

| Recálculo com perda ao fogo        |               |               |                |              |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|--------------|
|                                    | MY-01         | MY-04         | MY-06          | KMC          |
| Complexo Alcalino                  | Montes Claros | Montes Claros | Fazenda Buriti | Não definido |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | <b>57,46</b>  | <b>58,43</b>  | <b>44,01</b>   | <b>56,22</b> |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,34          | 0,58          | 3,94           | 0,54         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 22,16         | 20,11         | 11,14          | 22,53        |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2,36          | 4,09          | 13,65          | 2,54         |
| <b>MnO</b>                         | 0,18          | 0,17          | 0,20           | 0,18         |
| <b>MgO</b>                         | 0,14          | 0,54          | 8,24           | 0,28         |
| <b>CaO</b>                         | 1,64          | 2,46          | 12,28          | 0,95         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7,85          | 6,19          | 2,39           | 5,28         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 7,82          | 7,30          | 3,47           | 11,43        |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,03          | 0,12          | 0,68           | 0,05         |
| <b>LoI</b>                         | -             | -             | -              | -            |
| <b>Álcalis Total</b>               | <b>15,67</b>  | <b>13,49</b>  | <b>5,85</b>    | <b>16,71</b> |
| <b>Total</b>                       | 100           | 100           | 100            | 100          |



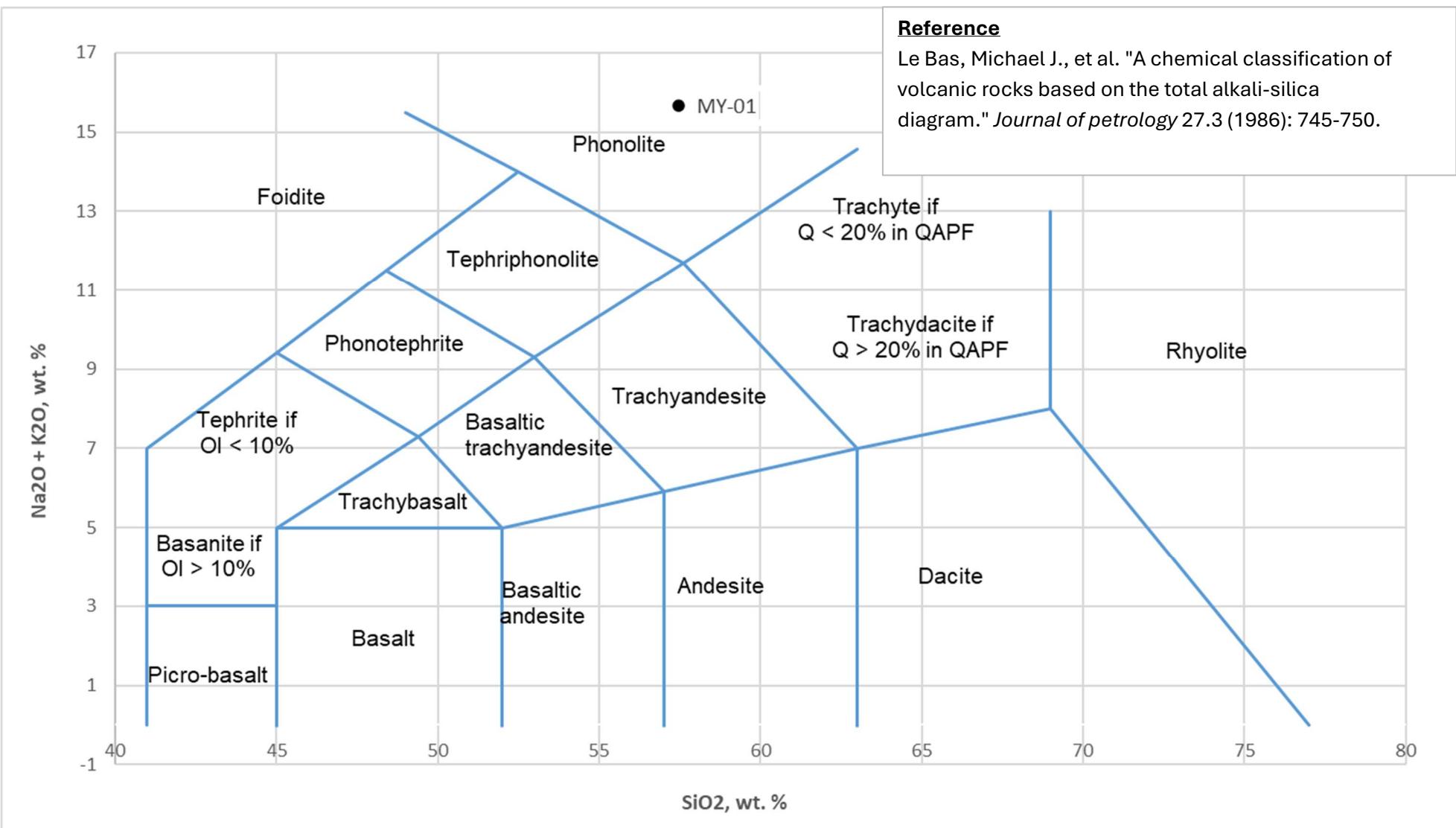


Diagrama TAS para rochas vulcânicas

### 6.3 Difratometria de raios X

Na amostra MY-01, foram identificadas as fases, em ordem de proporção da maior fase quantificada para a menor, ortoclásio, nefelina, plagioclásio albita, hornblenda, aegirina, analcima, magnetita, leucita e fluorita. Normalizando os minerais ortoclásio, albita, nefelina, analcima e leucita, a plotagem da amostra cai no campo de fonolito tefítico, o que diferencia do campo composicional de Le Bas utilizado no capítulo da química (ver capítulo 6.1), classificado anteriormente como fonolito.

Tabela 3 – Quantificação de fases da amostra MY-01 pelo método de Rietveld utilizando Profex.

| Amostra                  | MY-01             |               |
|--------------------------|-------------------|---------------|
|                          | Complexo Alkalino | Montes Claros |
| Minerais                 | %                 |               |
| Ortoclásio (primário)    | 45,30             |               |
| Nefelina (primário)      | 28,40             |               |
| Albita (primário)        | 20,20             |               |
| Hornblenda-Fe (primário) | 1,97              |               |
| Aegirina (primário)      | 1,90              |               |
| Analcima (secundário)    | 1,29              |               |
| Magnetica (primário)     | 0,75              |               |
| Leucita (primário)       | 0,16              |               |
| Fluorita (secundário)    | 0,07              |               |

% mineral definida através do Refinamento Rietveld no software Profex.

Os principais picos do ortoclásio ocorrem no ângulo de difração ( $2\theta$ ) 23,5° dos planos de refração (1 3 0) e 27,5° dos planos (0 0 2) (figura 23). A albita, por ser semelhante estruturalmente com o ortoclásio, também possui picos de difração nas mesmas posições, como nos ângulos de difração de 23,5°, mas este pico é definido pelo plano (1 1 1) da albita, o que ajuda a distinguir a albita é o pico de maior contagem no ângulo de 27,94°, e o pico identificado em 22° (figura 23). A hornblenda é definida pelo pico principal em 10,35°, o segundo pico que ajuda a identificar a fase está sobreposto pela fase da albita em 28,2° (figura 24).

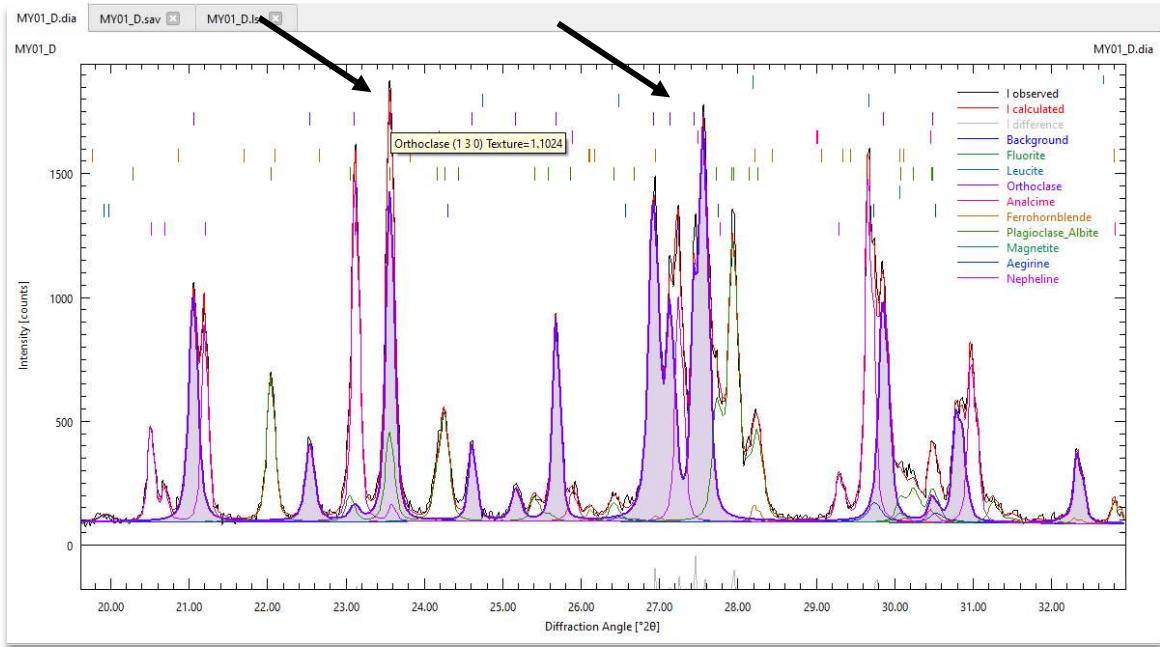


Figura 23 – Print da tela do Profex – Destaque para a curva de ajuste do ortoclásio (roxo) e o pico de difração com maior contagem.

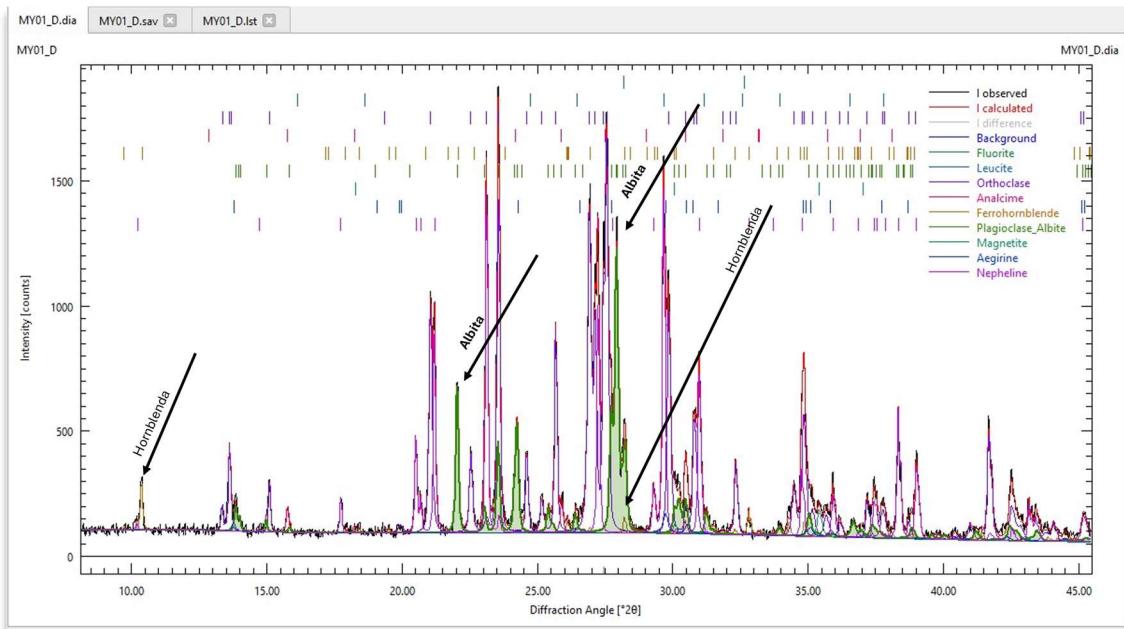


Figura 24 – Print da tela do Profex – Destaque para a curva de ajuste de albita (verde) e o pico de difração da hornblenda em 10,3 e o segundo em 28,2º sobreposto pela albita.

A nefelina, por ser do grupo espacial hexagonal, é a fase que mais possui picos identificados, ao menos 11 picos são identificados entre os ângulos de 20° e 40° (figura 25), sendo que o pico de maior contagem se encontra no ângulo de difração 23,1° definido pelos planos (2 -2 1) e (-2 2 1). A analcima, possui 3 picos identificados nos ângulos de difração de 15,7°; outro em 25,8° e um último em 30,4° que está sobreposto com as fases de albite e ortoclásio (figura 26).

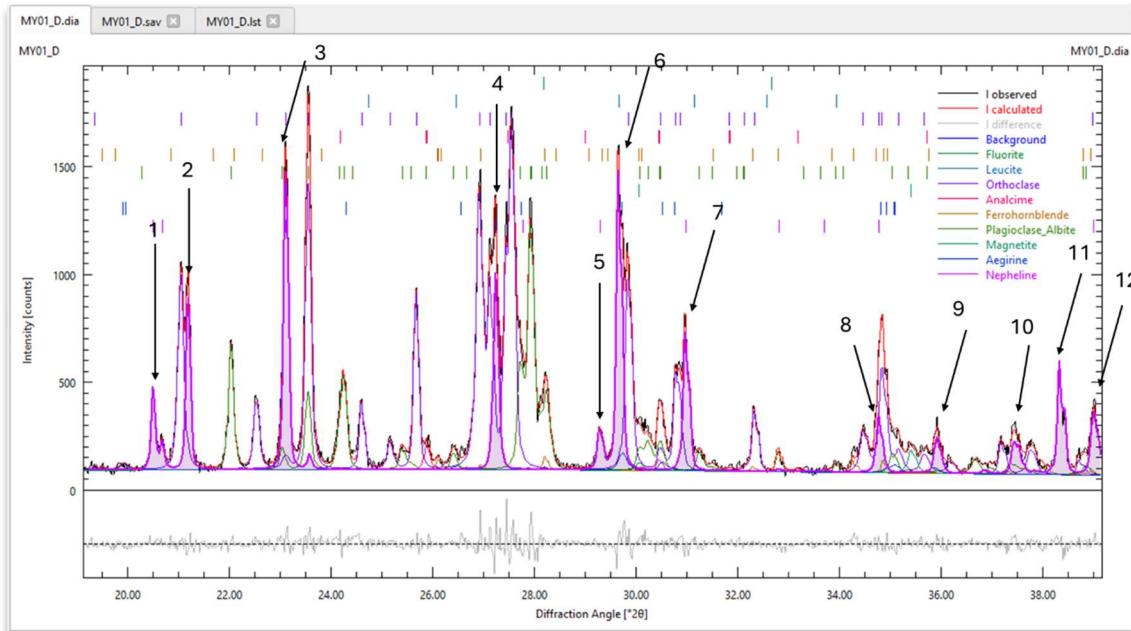


Figura 25 – Print da tela do Profex – Destaque para os picos da nefelina (rosa) entre os ângulos de 20° e 40°.

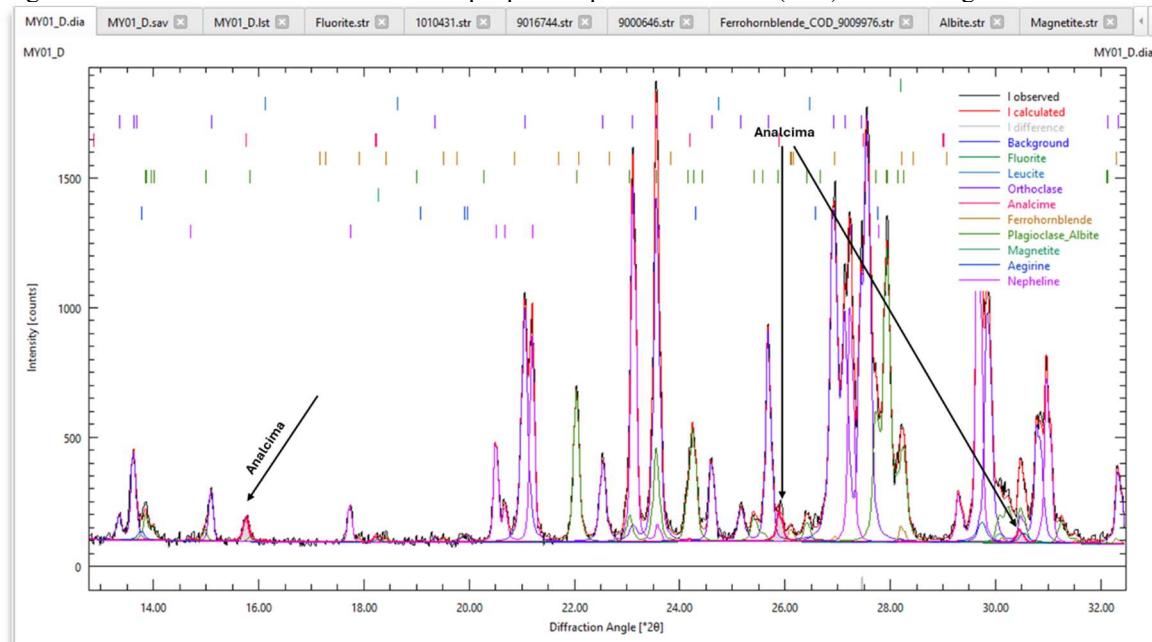


Figura 26 - Print da tela do Profex – Destaque para os picos da Analcima (vermelho).

O difratograma observado para amostra MY-04, foram identificadas as fases, em ordem de proporção da maior para a menor, ortoclásio, bytownita, albita, nefelina, hornblenda, sodalita, cancrinita, analcima, aegirina, biotita, magnetita e gibbsita. A tabela 4 apresenta a quantificação de fases calculado pelo Profex, e normalizando os feldspatos e feldspatoides, o campo de plotagem da rocha está em nefelina monzosienito no diagrama QAPF. As posições dos picos de ângulo de difração da magnetita, que são conhecidos em 35,5°, foram mascarados pelos picos dos feldspatos.

A intensidade do pico do ortoclásio em 27,5° obteve mais de 5000 contagens de pontos, e a bytownita 2584 contagens no ângulo de difração de 27,7°, e são os 2 principais picos do difratograma que se distinguem das outras fases observadas no difratograma, que tiveram menos de 2000 contagens. De modo geral, as outras fases quantificadas não tiveram picos bem definidos como os feldspatos, causam uma sobreposição de picos que somam intensidades e dão a falsa impressão de que o pico observado seja uma fase, mas na verdade trata-se de uma soma de intensidades, o que causa também um alargamento de picos (figura 27).

Tabela 4 – Quantificação de fases da amostra MY-04 pelo método de Rietveld utilizando Profex.

| Amostra                  | MY-04             |               |
|--------------------------|-------------------|---------------|
|                          | Complexo Alcalino | Montes Claros |
| Minerais                 | %                 |               |
| Ortoclásio (primário)    | <b>47,59</b>      |               |
| Bytownita (primário)     | <b>24,51</b>      |               |
| Albita (primário)        | <b>13,44</b>      |               |
| Nefelina (primário)      | <b>4,03</b>       |               |
| Hornblenda-Fe (primário) | <b>3,52</b>       |               |
| Sodalita (primário)      | <b>1,65</b>       |               |
| Cancrinita (secundário)  | <b>1,54</b>       |               |
| Analcima (secundário)    | <b>1,08</b>       |               |
| Aegirina (primário)      | <b>1,02</b>       |               |
| Biotita (primário)       | <b>0,01</b>       |               |
| Magnetita (primário)     | <b>0,004</b>      |               |
| Gibbsita (secundário)    | <b>0,004</b>      |               |

% minerais definida através do Refinamento Rietveld no software Profex.

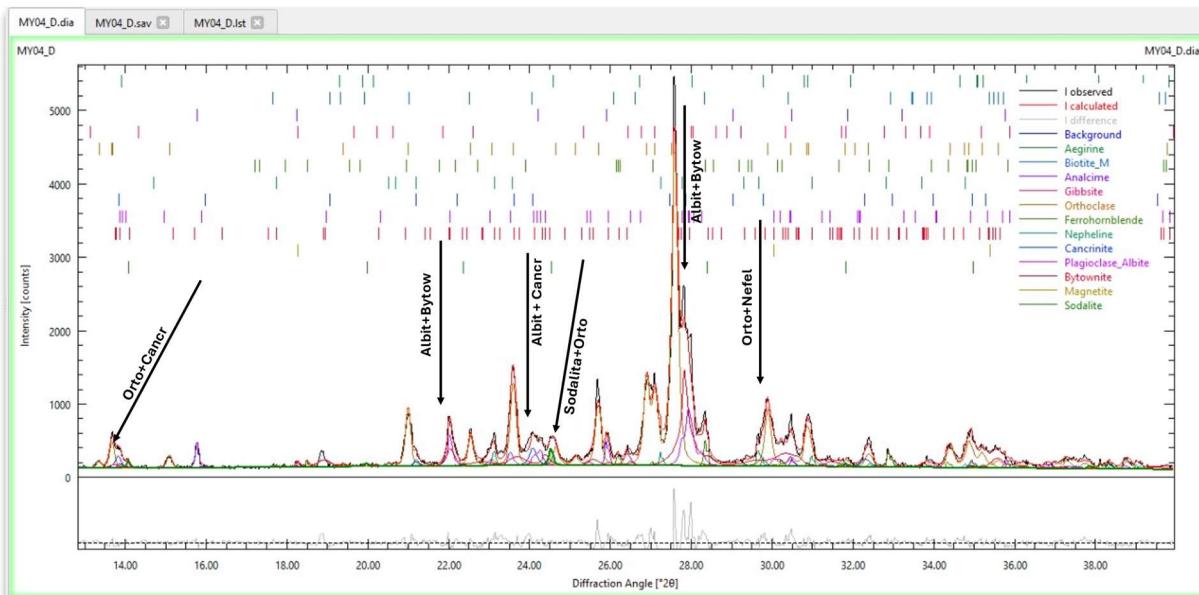


Figura 27 – Print da tela do Profex – destaque para as posições de ângulo de difração que tiveram sobreposição de picos e alargamento de curva.

Este efeito de sobreposição de picos era esperado para a albita e a bytownita, que são plagioclásios. Entretanto, notamos que a cancrinita compartilha com os feldspatos posições de difração muito semelhantes em 13,8° e 24,08°. A analcima, assim como na amostra MY-01, possui 3 picos identificados nos ângulos de difração de 15,7°; outro em 25,8° e um último em 30,4° que está sobreposto pela bytownita. A hornblenda também possui seu pico de difração identificado em 10,3° definido pelo plano (1 1 0), repetindo a mesma característica de orientação que na amostra MY-01, e desta vez, é identificada a biotita, caracterizada no ângulo de difração em 8,79° do plano (0 0 1) (figura 28).

Os parâmetros estatísticos para “ $\chi^2$ ” e “Gof” – (goodness of fitness) foram relativamente baixos (figura 28), mas comparativamente com a amostra MY-01, não obteve um bom difratograma calculado. As principais fases que tiveram dificuldade de ajuste de picos foram os plagioclásios nas posições de difração em 27,7° e outro pico da bytownita que não foi ajustada com o observado em 18,8°. Vale lembrar que plagioclásios são do grupo espacial triclinico, e podem possuir substituições catiônicas nos sítios de ocupação de Ca e Na. Diversas fichas de albita e bytownita foram testadas para se obter a melhor convergência, e este último difratograma calculado da amostra MY-04 foi o que obteve o menor valor de Gof em 1,82 (ver apêndice A) com as fichas baixadas do site *Crystallography Open Database*.

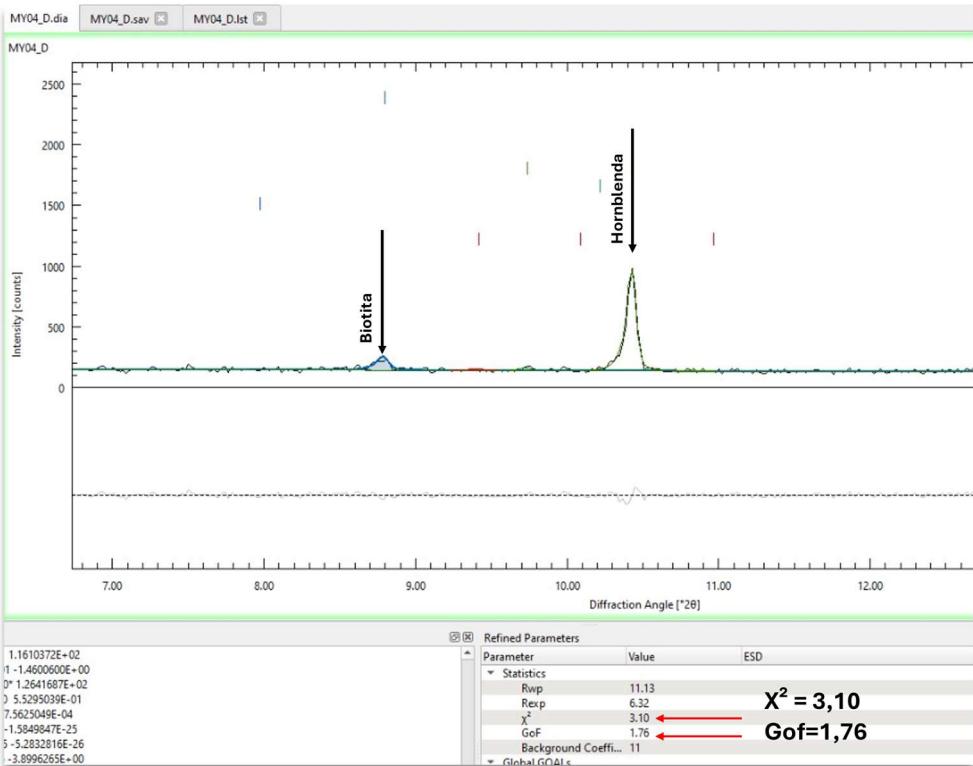


Figura 28 – Print da tela do Profex – Parâmetros estatísticos (setas em vermelho); Picos de difração da hornblenda (verde) e biotita (azul).

As fases identificadas no difratograma da amostra MY-06, em ordem de proporção de fases quantificadas maior para a menor, augita, ortoclásio, biotita, nefelina, bytownita, hornblenda, analcima, magnetita e cancrinita, a tabela 5 apresenta a quantificação calculada pelo Profex.

Tabela 5 – Quantificação de fases da amostra MY-06 pelo método de Rietveld utilizando Profex.

| Amostra                  | MY-06          |  |
|--------------------------|----------------|--|
| Complexo Alcalino        | Fazenda Buriti |  |
| Minerais                 | %              |  |
| Augita (primário)        | <b>31,06</b>   |  |
| Ortoclásio (primário)    | <b>23,38</b>   |  |
| Biotita (primário)       | <b>14,11</b>   |  |
| Nefelina (primário)      | <b>11,93</b>   |  |
| Bytownita (primário)     | <b>10,77</b>   |  |
| Hornblenda-Fe (primário) | <b>4,60</b>    |  |
| Analcima (secundário)    | <b>1,78</b>    |  |
| Magnetita (primário)     | <b>1,48</b>    |  |
| Cancrinita (secundário)  | <b>0,01</b>    |  |

% minerais definida através do Refinamento Rietveld no software Profex.

O difratograma observado para a amostra MY-06 possui o pico com maior intensidade no ângulo de difração  $8,79^\circ$  do plano  $(0\ 0\ 1)$  da biotita, e foi utilizada a mesma ficha estrutural que a amostra MY-04 (figura 29). Apesar de ser a fase que teve intensidade mais alta, não é a

fase mineral em maior proporção observada em lâmina, e mesmo assim, a augita foi o mineral em maior proporção. A estimativa calculada pelo Profex é razoável, comparado ao observado em lâmina.

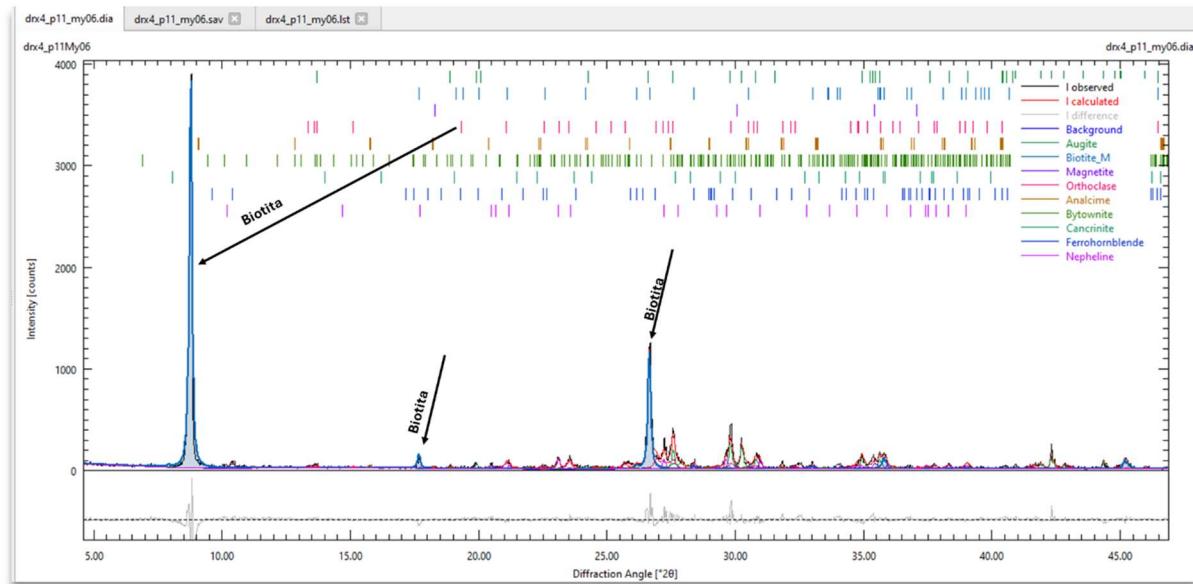


Figura 29 – Print da tela do Profex –Picos de difração da biotita (azul).

Provavelmente, durante alguma etapa de moagem ou transporte de amostra, ocorreu segregação de minerais dentro do saco que ficou embalada a amostra, concentrando os minerais micáceos, no caso a biotita, dentro da porta amostra. Outra razão para este efeito de alta intensidade seja causado pela própria natureza mineral. Micas são placoides, e se, por alguma razão a distribuição do pó de rocha não for completamente homogeneizada, os minerais com hábitos placoides e fibrosos podem ter alguma orientação preferencial e sobrepor outras fases minerais que estão na plaqueta (figura 30).

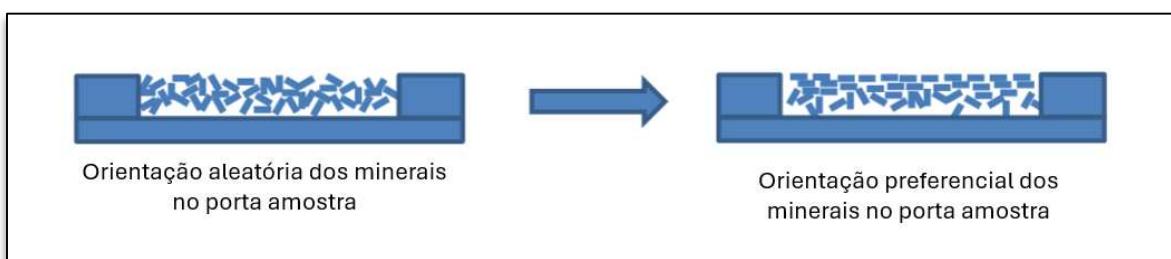


Figura 30 – Exemplo de como minerais podem se orientar preferencialmente em algum plano no porta amostra.

Apesar do ajuste do difratograma possuir parâmetros estatísticos baixos, como “GoF”=1,76, o ajuste da química composicional (tabela 09) foi o mais exagerado do que as outras 3 amostras.

As fases minerais identificadas e quantificadas na amostra KMC, na ordem de proporção quantificada maior para menor, ortoclásio, nefelina, biotita, analcima, cancrinita, aegirina, titanita e magnetita.

Tabela 8 – Quantificação de fases da amostra MY-06 pelo método de Rietveld utilizando Profex.

| Amostra                 | KMC          |
|-------------------------|--------------|
| Complexo Alkalino       | Não definido |
| Minerais                | %            |
| Ortoclásio (primário)   | <b>66,61</b> |
| Nefelina (primário)     | <b>11,95</b> |
| Biotita (primário)      | <b>7,81</b>  |
| Analcima (secundário)   | <b>5,77</b>  |
| Cancrinita (secundário) | <b>5,01</b>  |
| Aegirina (primário)     | <b>1,75</b>  |
| Titanita (primário)     | <b>0,01</b>  |
| Magnetite (primário)    | <b>0,003</b> |

% minerais definida através do Refinamento Rietvel no software Profex.

O difratograma possui um pico principal no ângulo de difração de 27,5°, definida pela fase do ortoclásio e o plano (0 0 2), sendo que o pico para esta curva no difratograma não conseguiu convergir para o pico máximo de intensidade observado, a intensidade máxima calculada foi de 4500 contagens, enquanto a observada chegou a mais de 5000 contagens (figura 31). Os demais picos das fases observadas, não ultrapassaram a intensidade de 1000 contagens, com exceção da biotita que atingiu 2000 contagens no ângulo de difração de 8,7° do plano (0 0 1).

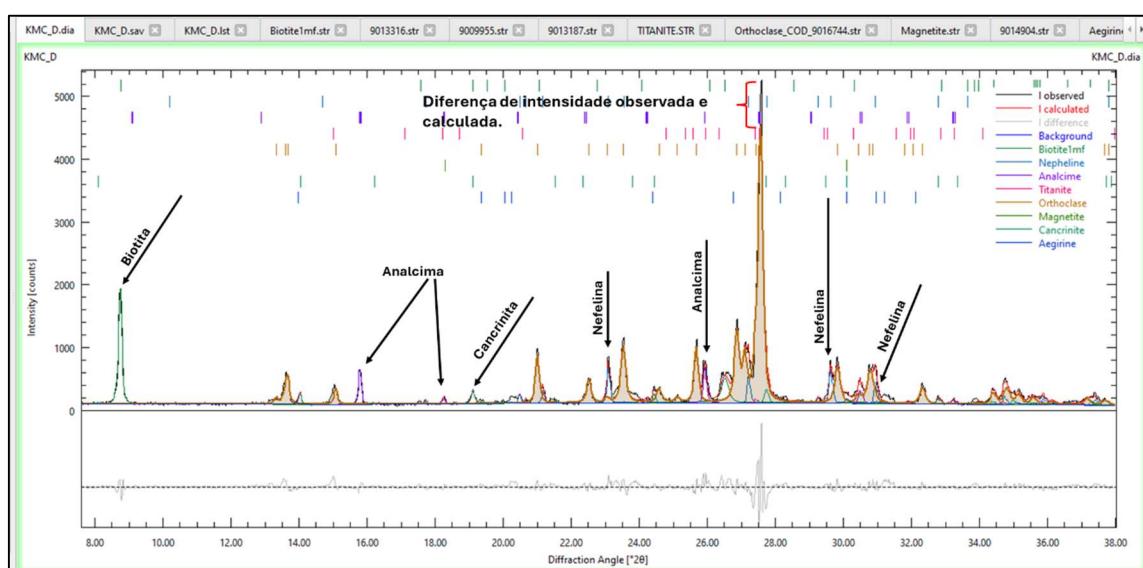


Figura 31 – Print da tela do Profex – Destaque em amarelo para a curva do ortoclásio e indicações dos picos de outras fases minerais.

Nas 4 amostras, a analcima é identificada principalmente no plano (1 1 0) no pico de menor ângulo  $2\theta$ . A caracterização das fases de analcima e cancrinita, são fortes evidências de formação de minerais feldspatoides secundários através da liberação do K<sup>+</sup> da estrutura da nefelina. E isso é reforçado quando olhamos em microscopia eletrônica de varredura, a perda de K na nefelina (ver capítulo 6.4).

Vale olhar com mais detalhe no difratograma que algumas posições angulares não foram preenchidas por nenhuma fase que fizessem sentido serem adicionadas ao modelo. Existem ainda minerais que poderiam ser selecionados como possíveis indicadores do pico, nos ângulos de difração 20,2°; 23,8° e 31,28°, mas devido à incompatibilidade de fichas de minerais testados que poderiam ser adicionados ao difratograma, não foram adicionadas fases que não tiveram uma boa convergência com o modelo (figura 32).

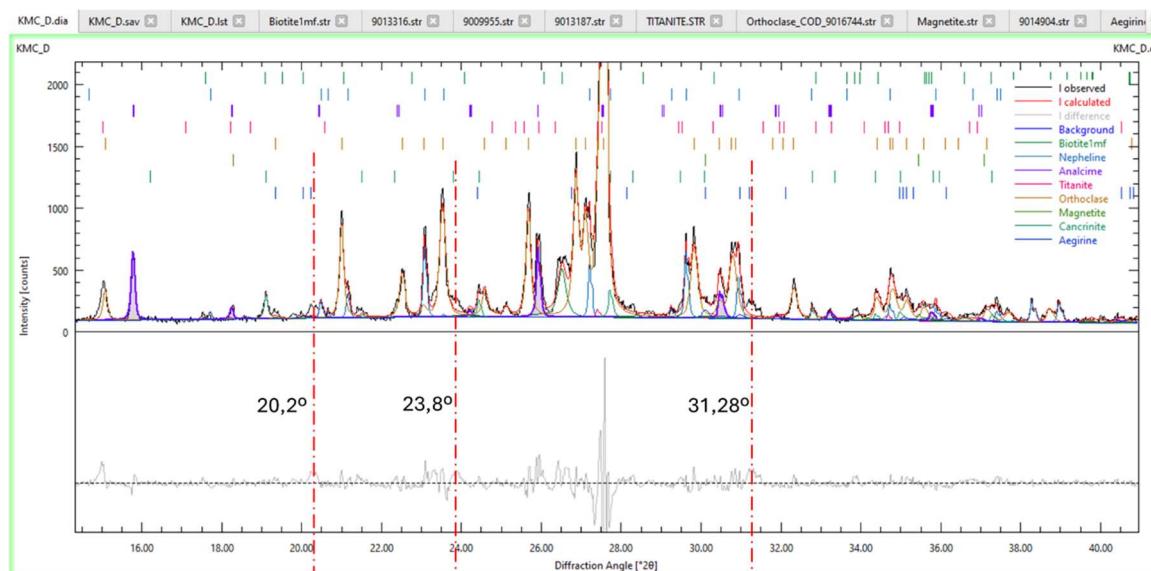


Figura 32 – Print da tela do Profex – Posição dos picos angulares que não corresponderam a nenhuma fase observada.

A tabela 09 apresenta a quantificação de elementos maiores na base de óxidos calculadas pelo refinamento de Rietveld no Profex, comparativamente com os resultados obtidos por FRX.

Tabela 09 - Quantificação de química total por DRX - Método Rietveld.

|                                    | MY-01   |         | MY-04   |         | MY-06   |         | KMC     |         |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | (FRX) % | (DRX) % |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 57,46   | 58,36   | 58,43   | 57,71   | 44,01   | 50,15   | 56,22   | 58,61   |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,34    | -       | 0,58    | -       | 3,94    | -       | 0,54    | 0,34    |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 22,16   | 22,76   | 20,11   | 23,17   | 11,14   | 16,92   | 22,53   | 20,30   |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 2,36    | 2,16    | 4,09    | 2,06    | 13,65   | 9,80    | 2,54    | 2,23    |
| <b>MnO</b>                         | 0,18    | -       | 0,17    | -       | 0,20    | -       | 0,18    | -       |
| <b>MgO</b>                         | 0,14    | -       | 0,54    | 0,07    | 8,24    | 6,15    | 0,28    | 1,47    |
| <b>CaO</b>                         | 1,64    | 0,26    | 2,46    | 4,93    | 12,28   | 7,85    | 0,95    | 0,57    |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7,85    | 8,39    | 6,19    | 3,68    | 2,39    | 3,54    | 5,28    | 4,92    |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 7,82    | 8,04    | 7,30    | 8,16    | 3,47    | 5,44    | 11,43   | 11,22   |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,03    | -       | 0,12    | -       | 0,68    | -       | 0,05    | -       |
| <b>Total</b>                       | 100,00  | 99,97   | 100,00  | 99,78   | 100,00  | 99,85   | 100,00  | 99,66   |

#### 6.4 Microscopia eletrônica de varredura

Foram realizadas 2 sessões de microscopia eletrônica de varredura com dispersão de energia (MEV-EDS) no laboratório de caracterização tecnológicas da Poli USP (LCT Poli-USP) em lâminas delgadas sem lamínulas, as mesmas que foram utilizadas para o microscópio óptico no laboratório de caracterização tecnológicas da Poli USP (LCT Poli-USP). As imagens obtidas foram montadas em Power Point, e estão disponíveis no Apêndice B (Mapas Composicionais).

A amostra MY-01, fonolito que faz parte do Complexo Montes Claros, os principais minerais que fazem parte da rocha são: nefelina, ortoclásio, plagioclásio, aegirina, hornblenda magnetita e fluorita. Os minerais fundamentais da rocha, que antes em microscópio óptico não era possível distinguir os feldspatos e feldspatoides da matriz, em MEV notamos que esses minerais ocorrem agrupados, e não dispersos em microcristais homogeneamente distribuídos. Na figura 33, usando a configuração (Na-Azul); (Mg-Amarelo); (Ca-Vermelho) e (K-Verde), conseguimos distinguir os feldspatos ortoclásio (em verde) do plagioclásio (azul), no entanto, a nefelina fica mascarada com o plagioclásio, sendo difícil sua distinção dos demais. Apenas a aegirina se destaca com sua cor alaranjada, e a hornblenda avermelhada.

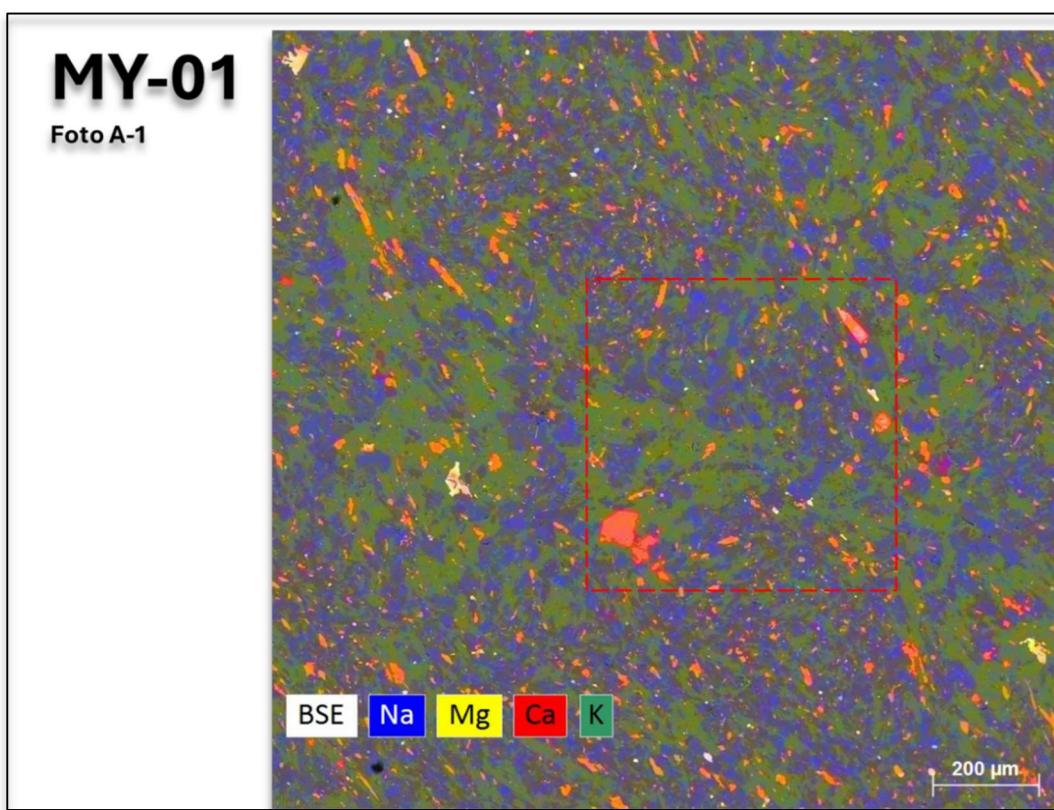


Figura 33 - (Na-Azul); (Mg-Amarelo); (Ca-Vermelho) e (K-Verde) - ortoclásio (em verde) , plagioclásio (azul), aegirina (laranja), hornblenda (avermelhado) – imagem exclusiva deste trabalho.

Na figura 34, usando a composição (Na-azul); (Si-vermelho);(Al-verde) e (K-amarelo) conseguimos delimitar o plagioclásio e a nefelina. Devido a nefelina possuir K na sua estrutura cristalográfica, o sódio (Na) e o potássio (K) se somam gerando a cor verde. Enquanto o plagioclásio, ausente de potássio, fica com aspecto roxo, já que o silício (Si) e o sódio (Na) da estrutura cristalográfica se somam. Esta é a melhor composição que podemos usar para mapear feldspatos e feldspatoides em rochas vulcânicas. Eventuais imagens com composições de cores diferentes foram feitas exclusivamente para caracterização de alguns minerais, como é o caso da andradita (figura 35)

Em EDS foi determinado como silicato de ferro e cálcio, e consultando a bibliografia para rochas alcalinas, Silva et al. (2018) caracterizou também andradita em fonolitos da Suíte Alcalina Passo da Capela, na cidade de Piratini no Rio Grande do Sul. A figura 35 é correlacionada com a figura 7F, apresentada no capítulo de descrição petrográfica (ver capítulo 6.1).

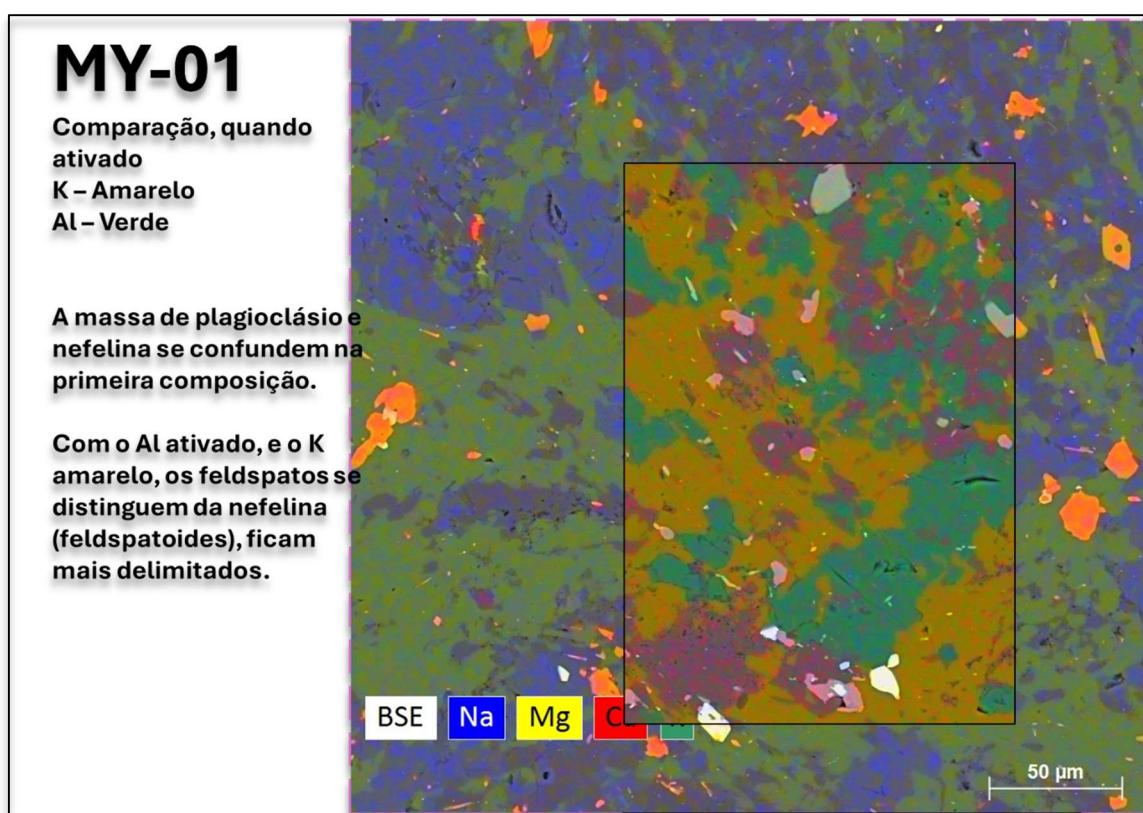
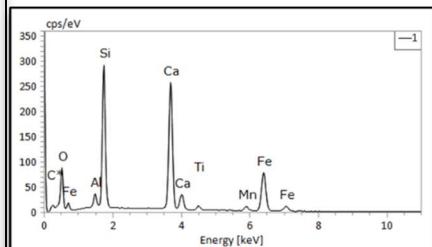


Figura 34 – (Na-Azul); (K-Amarelo); (Si-Vermelho); (Al-verde) – imagem montada exclusiva deste trabalho.

# MY-01

## FOTO A



| Mineral   | Fórmula   |
|-----------|---|
| Granada   | (Ca) <sub>3</sub> (Fe) <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) |
| Andradita |   |

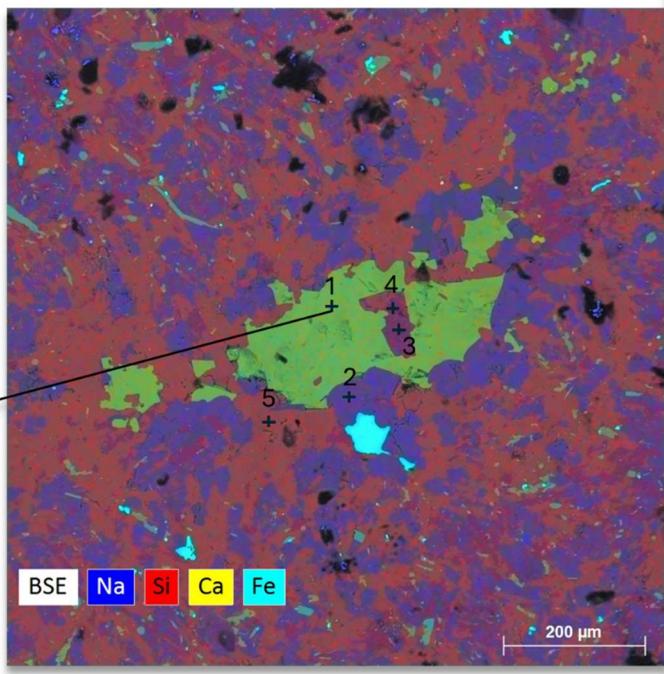


Figura 35 – Destaque para Andradita, uma espécie de granada encontrada em rochas alcalinas.

A figura 36 tem destaque para um fenocristal de nefelina, rodeado por cristais de plagioclásio, ortoclásio e nefelina. Quando observado em detalhe, vemos que há um padrão de alteração na superfície do fenocristal de nefelina. Em EDS, esses minerais foram caracterizados como fluorita e na análise química, notamos que dentre as outras amostras, a MY-01 é a que possui mais flúor. Não foi determinado se esses cristais são posteriores à formação da rocha, no entanto, fica evidente que a formação da fluorita possui um controle de formação direcionado pela clivagem (ou fratura ?) da nefelina. (figura 37).

Na amostra MY-04, em vista geral para lâmina (figura 38) temos plagioclásio (EDS-1) e ortoclásio(EDS-3) do grupo dos feldspatos, sodalita (EDS-5) e nefelina (EDS-2) do grupo dos feldspatoides, hornblendita (EDS-4) e aegirina dos máficos, e como acessórios, titânia e pirita (consultar anexo para pirita). Em destaque para os feldspatoides da figura 39, notamos uma inclusão em formato hexagonal (EDS 4 e 5) na nefelina (EDS-1). Esse mineral trata-se de uma variedade de sodalita com o ânion SO<sub>4</sub> (EDS-5 – variedade com enxofre), enquanto a área verde trata-se de substituição com cloro, essa variedade de sodalita com enxofre pode ser tanto *hackmanita* ou *hauyna*. A *hackmanita*, caso seja, apresenta propriedade ótica conhecida como “tenebrescência”. Foi realizado teste com luz UV e não foi verificada mudança de cor nos minerais, sugerindo que seja a variedade de sodalita *hauyna*.

## MY-01 FOTO B1

| Mineral              | Fórmula   |
|----------------------|---|
| Nefelina (verde)     | $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$                   |
| Mineral              | Fórmula   |
| Ortoclásio (amarelo) | $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  |
| Mineral              | Fórmula   |
| Plagioclásio (roxo)  | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$<br>$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |

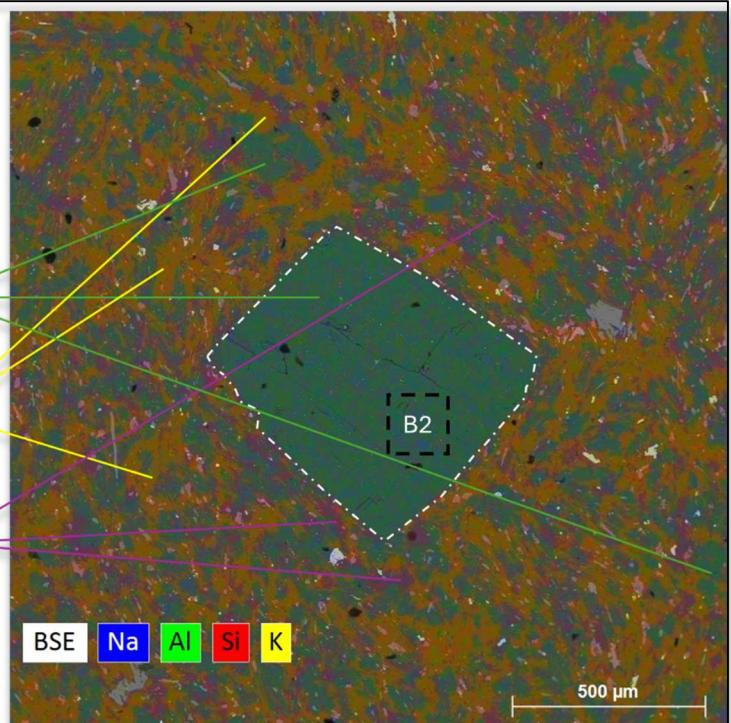


Figura 36 – Fenocristal de nefelina

## MY-01 FOTO B2

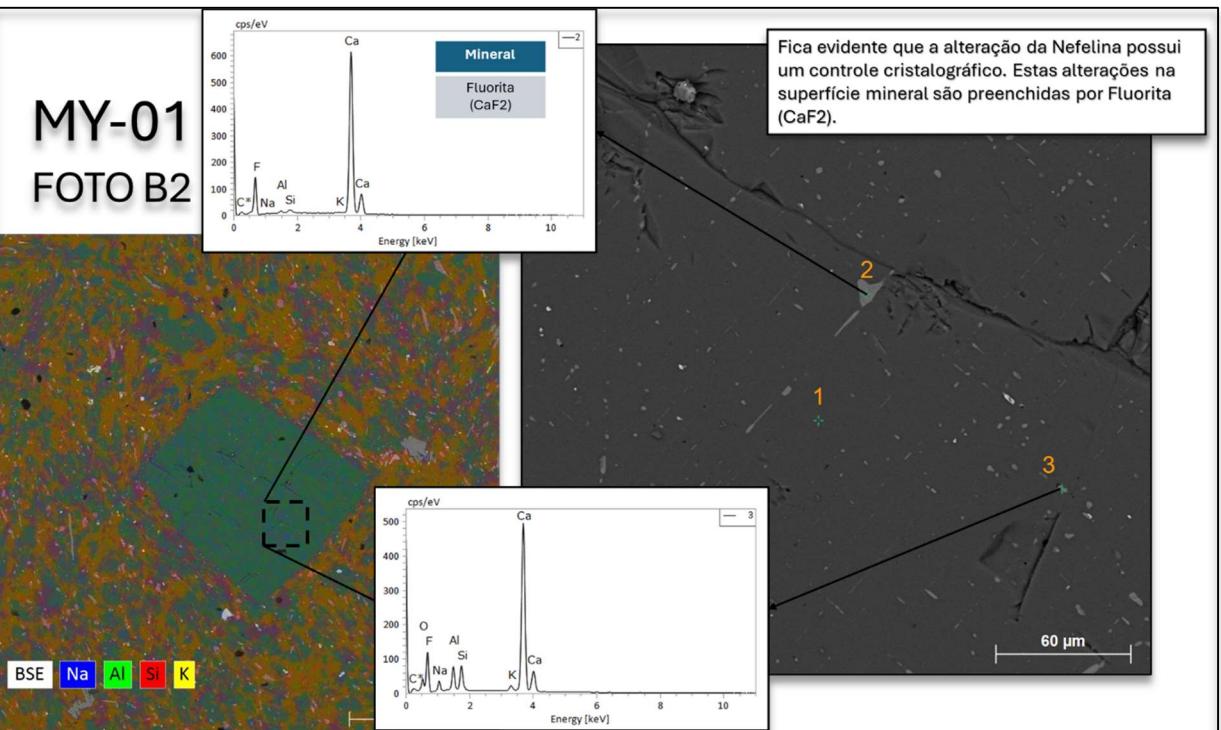


Figura 37 – EDS 1-Nefelina; 2 e 3-Fluorita

# MY-04

## FOTO A

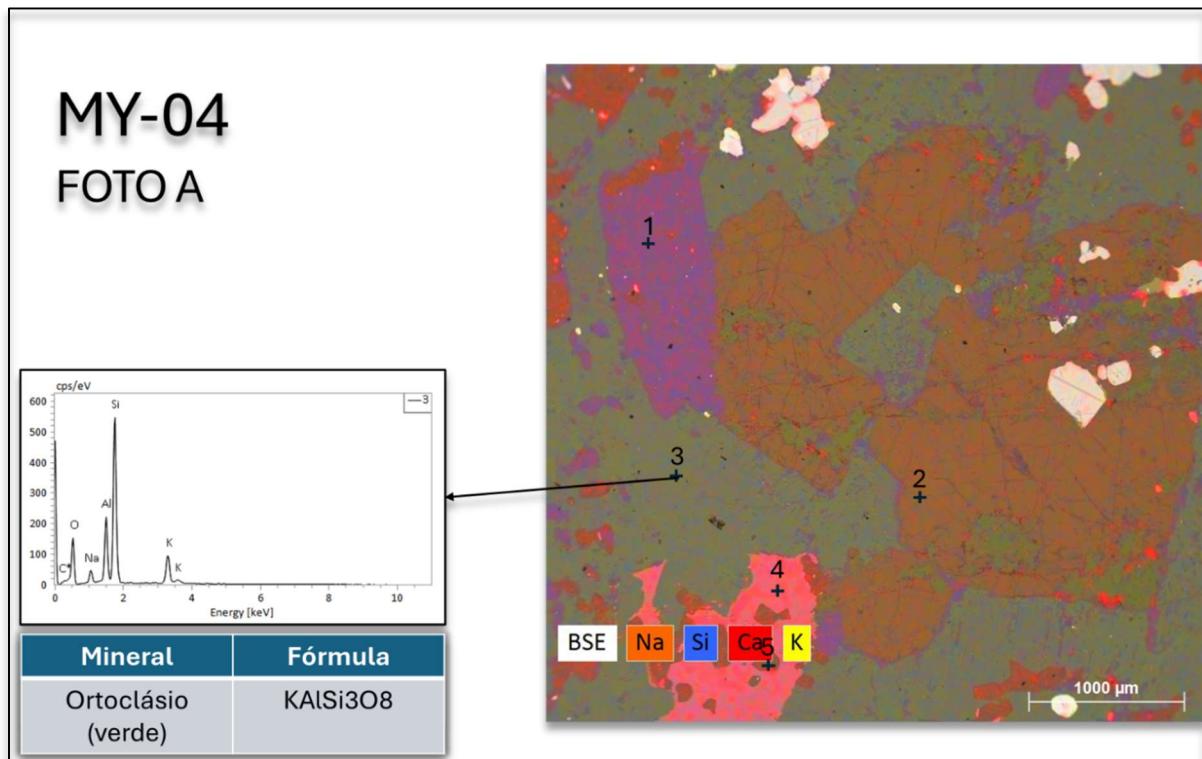


Figura 38 – Vista geral para os principais minerais da rocha – plagioclásio (EDS-1); nefelina (EDS-2); ortoclásio (EDS-3);hornblenda (EDS-4) e sodalita (EDS-5)

# MY-04

## FOTO B2

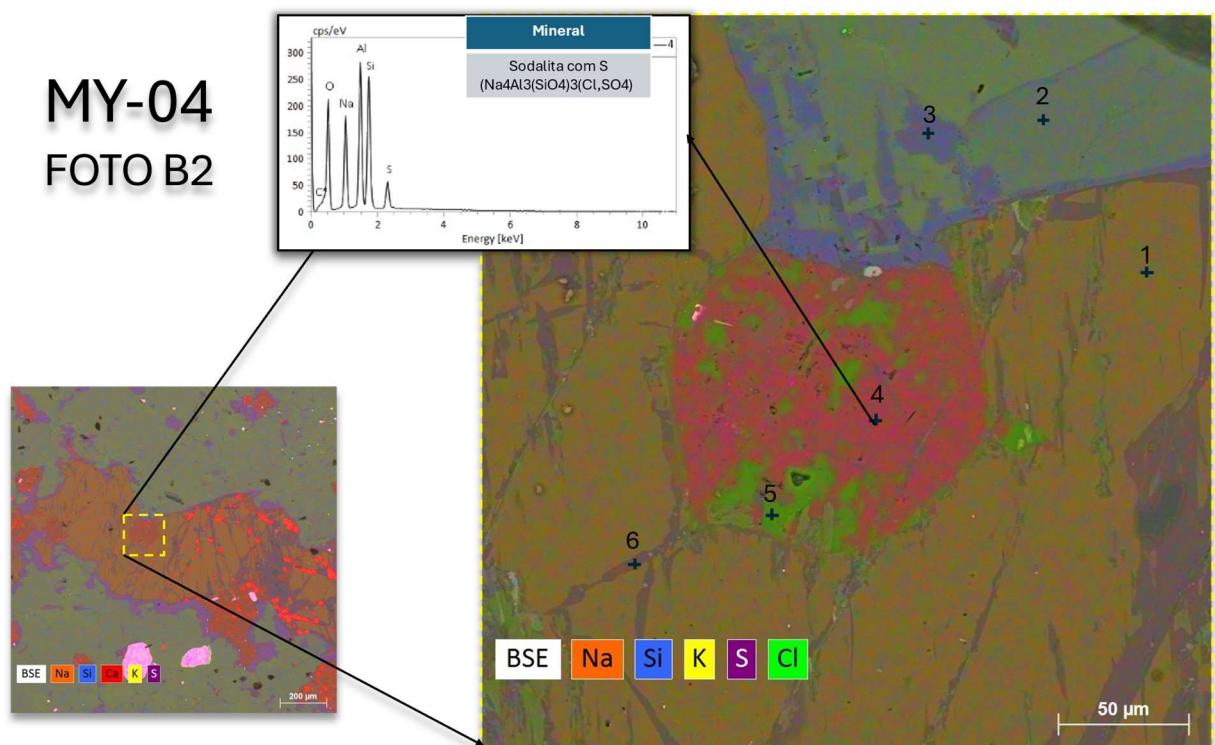


Figura 39 – Destaque para inclusão de sodalita com enxofre (Huayna) (EDS-4) em grão de nefelina (EDS-1).

Em torno do mesmo cristal de nefelina observado na figura 39, nota-se uma reação de alteração nas bordas do ortoclásio (EDS-2), que gradualmente migra para tons azulados, e isso é notado pelo ruido de sódio no gráfico de energia de dispersão (EDS-3 – ver apêndice B). Na figura 40, foi feito o EDS-3 e 4, e notamos que a borda de contato é rica em sódio (Na). Esse tipo de substituição parcial nas bordas do ortoclásio registra o evento de cristalização gradual do magma que gerou esta rocha. Inicialmente a rocha cristalizou em temperatura mais elevada (acima de 700°C), gerando uma única fase de cristalização, no caso o ortoclásio, com o resfriamento gradual e abaixo de 600°C (curva solvus), ocorre a desestabilização dos cristalitos com substituição por sódio (figura 41). Essa substituição catiônica do campo do K (raio atômico de 1,51Ang) pelo Na (raio atômico de 1,18Ang), ocorre por questões de cinética e estabilidade mineral em temperaturas mais baixas. Esse processo de exsolução não possui uma característica gráfica dentro do mineral de ortoclásio, sendo observado esse processo de substituição apenas nas bordas do mineral.

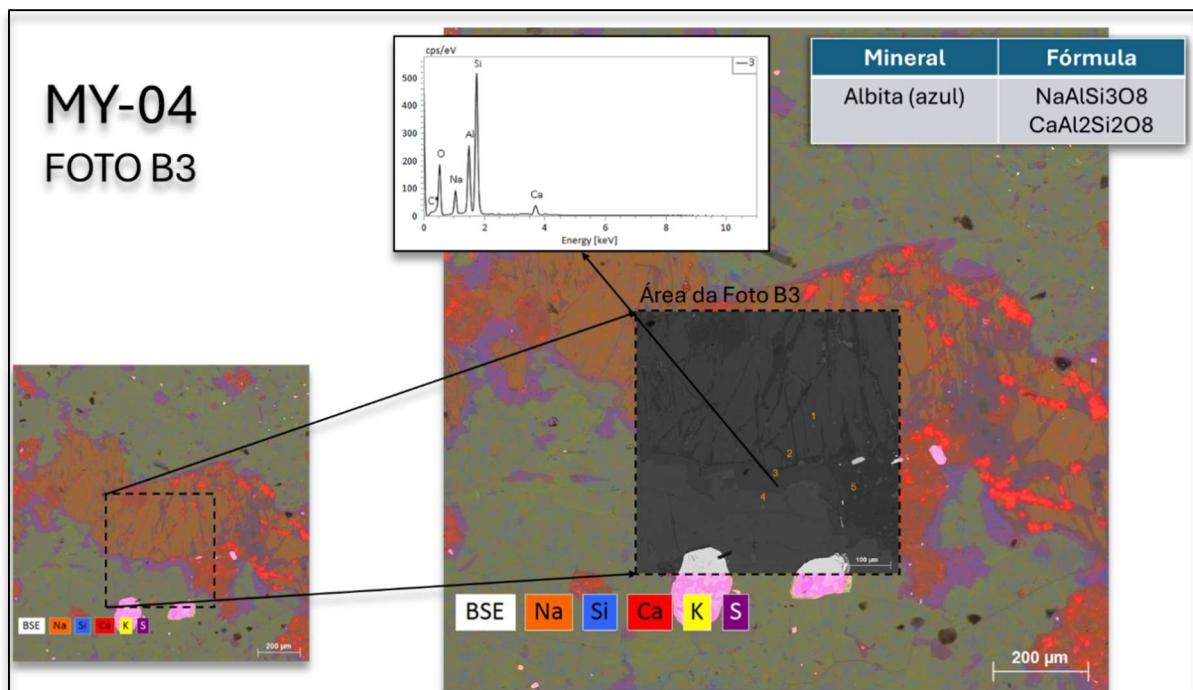


Figura 40 – EDS-3 feito na borda do ortoclásio, que perdeu o K e foi substituído por Na, formando albita.

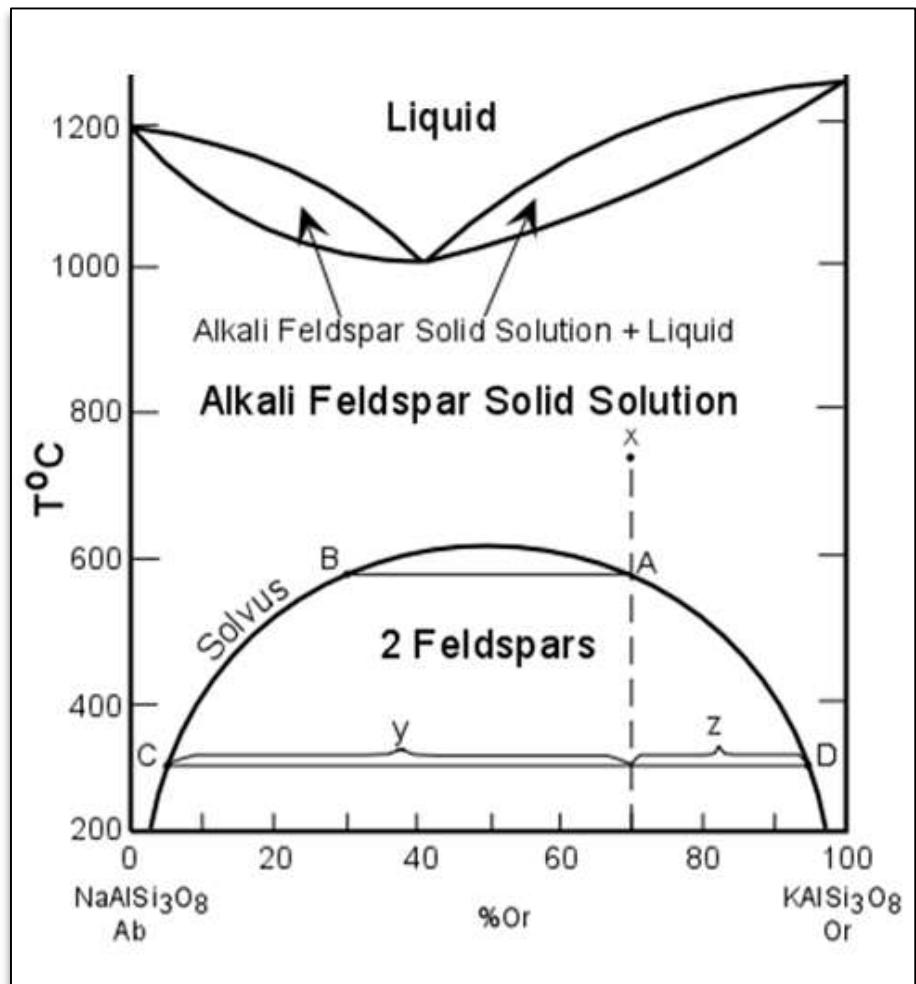
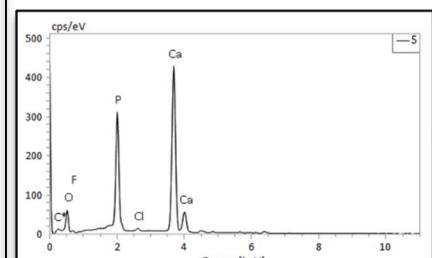


Figura 41 – Diagrama binário para ortoclásio e albita (exemplo de cristalização gradual)

Os minerais observados na amostra MY-06, são nefelina (EDS-1), ortoclásio (EDS-2), augita (EDS-3), biotita (EDS-4), apatita (EDS-5) e ilmenita (EDS-6), além de titanita, magnetita, sodalita e fases secundárias observadas em DRX. Comparativamente com as outras amostras, os feldspatos e feldspatoides desta lâmina não apresentam alterações por hidratação. Em destaque na figura 42, EDS feito em grão de apatita, indicando a formação de minerais fosfatados na rocha. Outros grãos da figura não são necessariamente de apatita, e podem ser confundidos com titanita pela cor avermelhada por ambos os minerais possuírem Ca na estrutura química.

## MY-06 FOTO A



| Mineral | Fórmula  |
|---------|--|
| Apatita | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ |

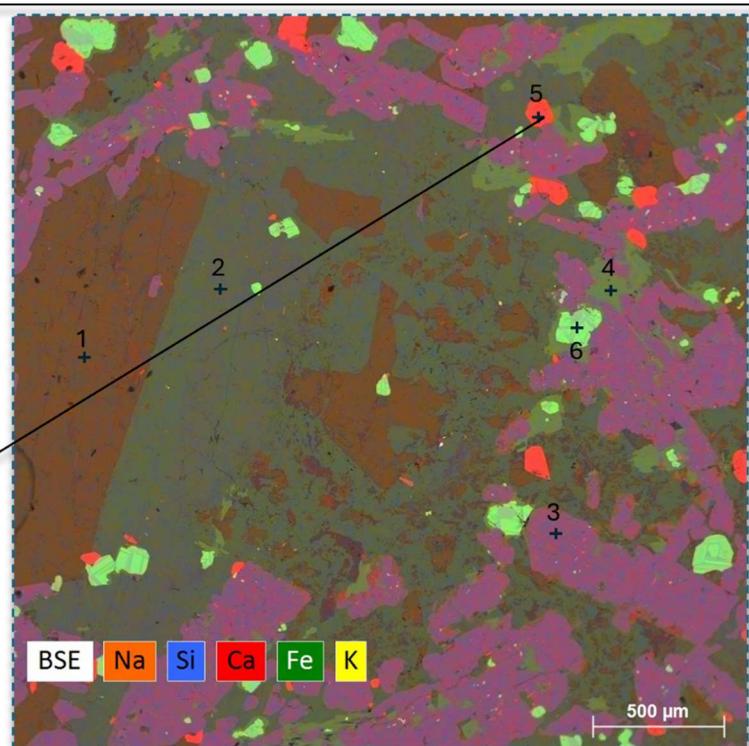


Figura 42 – Vista geral para os minerais da amostra MY-06, notar que os minerais apresentam um grau alto de cristalinidade e pouquíssimas alterações superficiais.

Na amostra KMC, a característica mais notável da nefelina, é a sua alteração que também foi observada em lâmina (figura 43).

## KMC FOTO A2

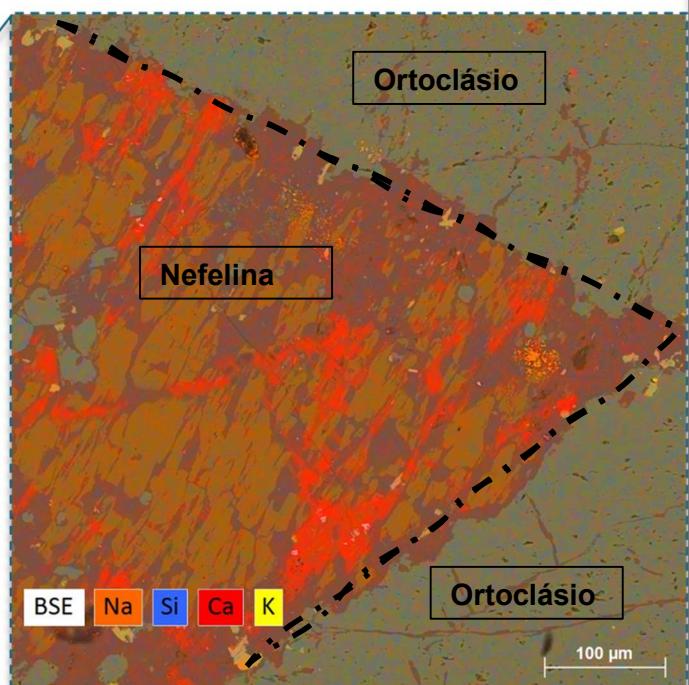
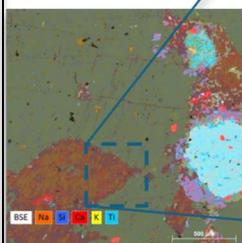


Figura 43 – Delimitação de borda de grão de nefelina (delimitado em pontilhado) com ortoclásio (verde) ao redor.

Assim como na amostra MY-04, a amostra KMC possui grãos de nefelina de tamanho médio a grossos. Estes grãos possuem substituições em diversas porções do mineral, na borda, no centro, na diagonal. A primeira característica é que em MEV é possível distinguirmos ao menos 3 cores: um primeiro ao centro mais amarelada; uma secundária de tom roxo amarronzado que ocorre nas bordas do mineral e no centro, sem orientação preferencial, e uma terceira cor avermelhada que possui um padrão de formação na diagonal, formando ângulos internos de 60º aproximadamente.

Na figura 44, foi realizado o EDS-2 para a porção mais amarelada do grão, confirmando a natureza mineral como nefelina ( $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ ), e nota-se que a energia dispersiva de potássio é inferior à de sódio.

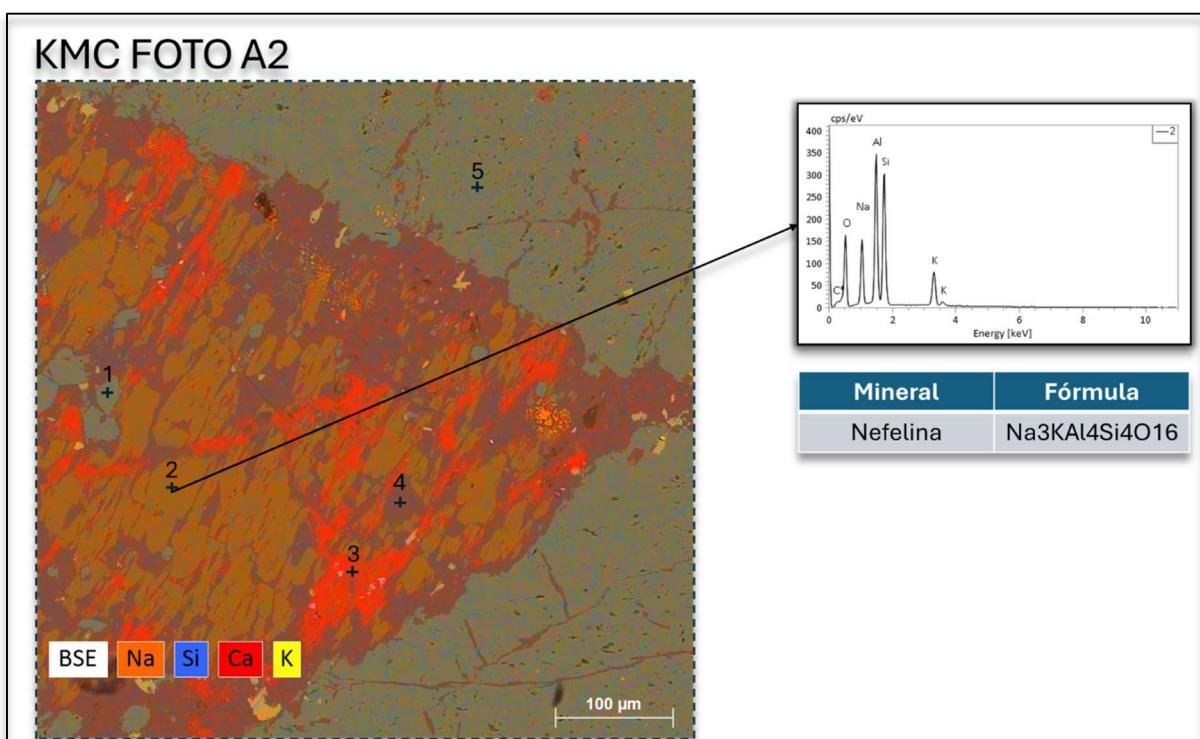
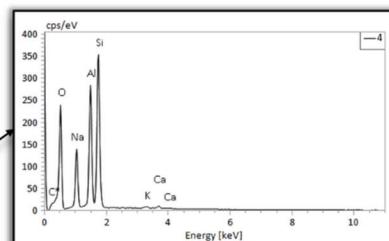
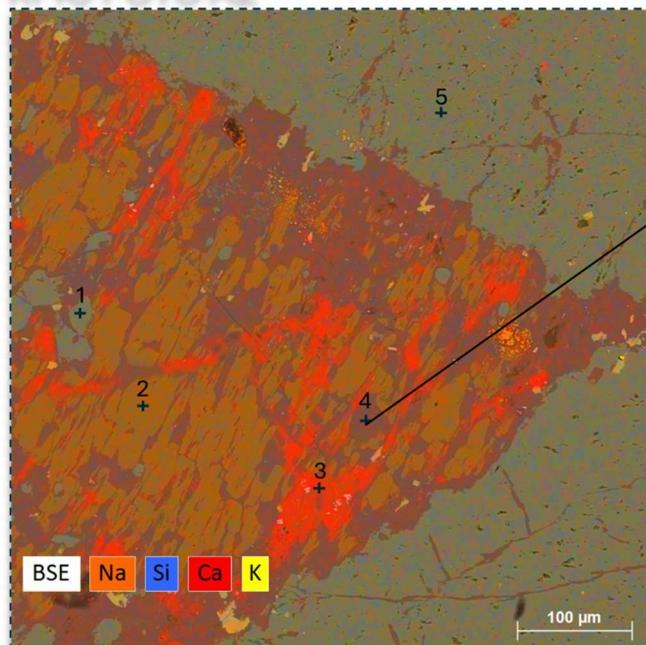


Figura 44 – EDS em porção amarelada de nefelina.

Na figura 45, foi realizado o EDS-4 para a porção com tom roxo amarronzado. A primeira característica é a ausência de potássio nessas porções do mineral. Outra evidência para a analcima, é que a intensidade do oxigênio é de aproximadamente 250cps/eV , enquanto na nefelina a intensidade máxima foi quase 180cps/eV. Pelo fato da analcima ser um mineral hidratado, é esperada uma intensidade de oxigênio maior para essas faixas marrom na lâmina, e um empobrecimento de potássio. Infelizmente não é possível capturar a energia dispersiva do hidrogênio para uma caracterização conclusiva, no entanto, há fortes evidências de analcima nos difratogramas de raios X.

## KMC FOTO A2



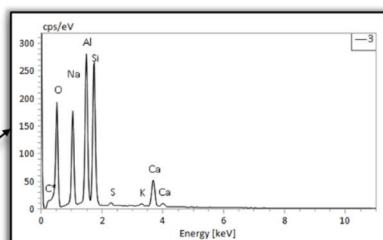
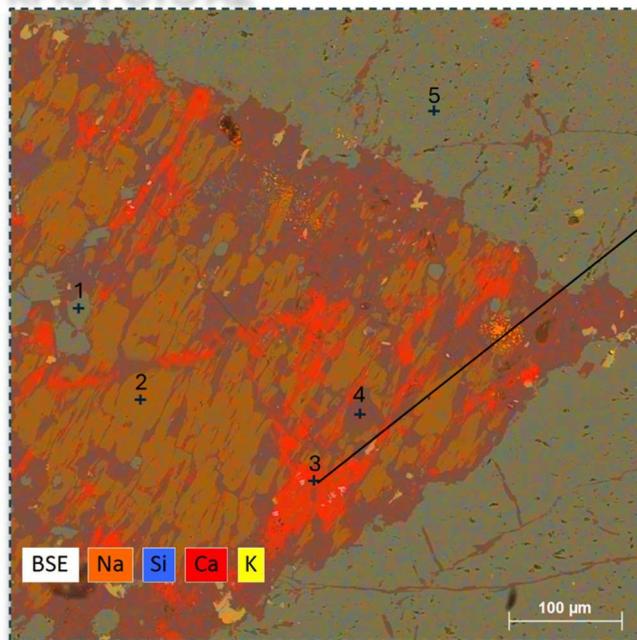
| Mineral  | Fórmula  |
|----------|--|
| Analcima | $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_1_6 \rightarrow \text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$ |

Notar empobrecimento de K, o que torna ela menos amarelo. Notar ruído de Ca, e intensidade do pico de O maior que a Nefelina.

Figura 45 – EDS em porção marrom do grão de nefelina, caracterizado como analcima.

A figura 46 apresenta o EDS-3 realizado na porção avermelhada da nefelina. O mineral foi caracterizado como cancrinita, outro feldspatoides secundário resultado da hidratação da nefelina e inserção de cálcio na estrutura.

## KMC FOTO A2



| Mineral    | Fórmula  |
|------------|--|
| Cancrinita | $\text{Na}_6\text{Ca}_2[(\text{CO}_3)_2 \text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |

Figura 46 – EDS em porção avermelhada da nefelina, caracterizada como cancrinita.

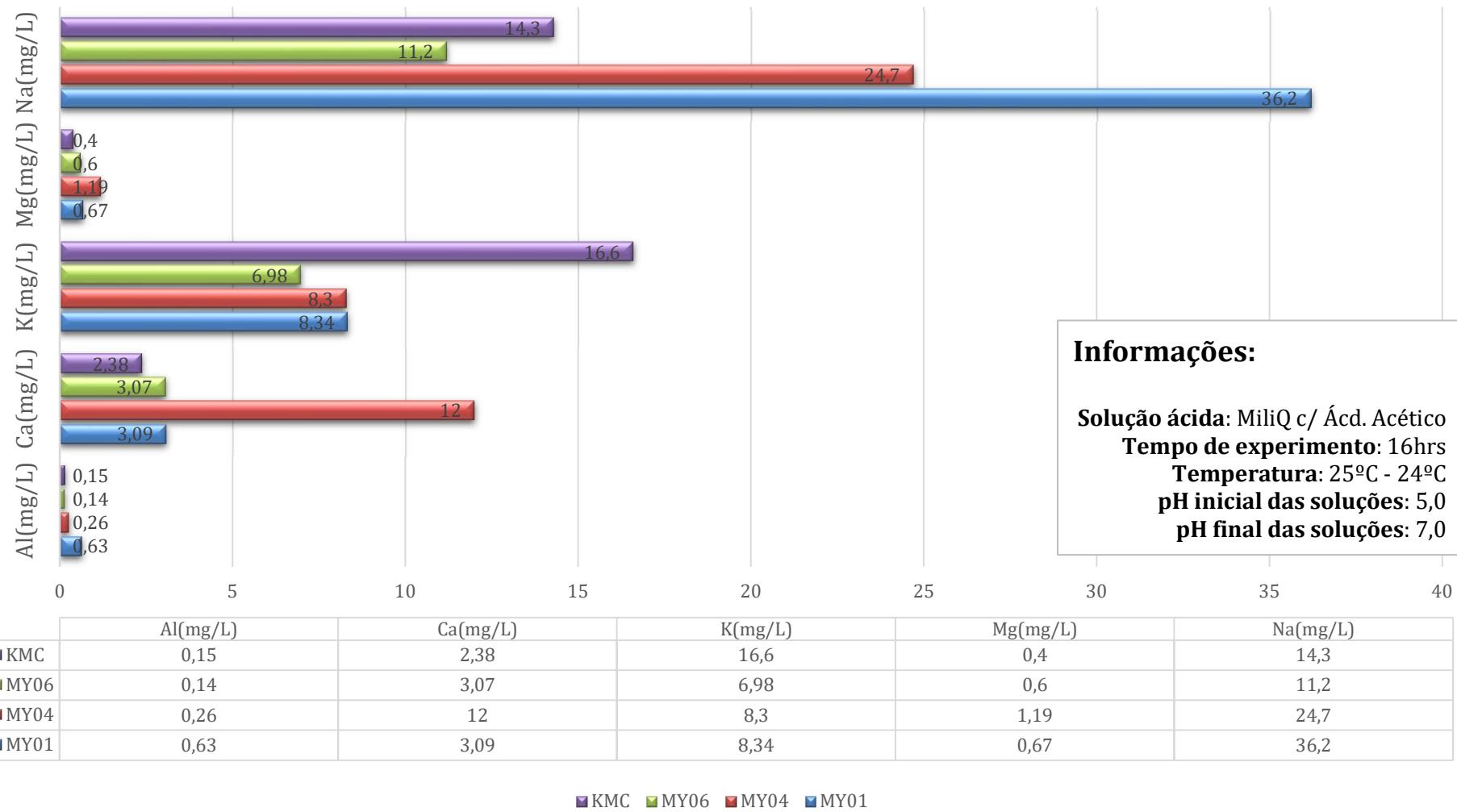
## **6.5 Experimento de dissolução**

Os teores apresentados foram determinados em amostras líquidas e dosados em espectrômetro de emissão óptica (ICP OES), marca Thermo Scientific, modelo iCap 6300 Duo. A tabela 11, junto com o gráfico de barras, apresenta a liberação de cátions para cada amostra. Os cátions menos liberados para o meio foram os de Al e Mg, o máximo liberado foi de 0,63mg/L para amostra MY-01 e 1,19mg/L para amostra MY-04, respectivamente.

A amostra MY-01 apresentou a maior liberação de Na, com 36,2mg/L, seguido da amostra MY-04 com 24,7mg/L, KMC com 14,3mg/L e a amostra MY-06 liberando 11,2mg/L. A amostra MY-04 foi a que apresentou maior liberação de Ca, com 12mg/L. Provavelmente, a hornblenda deve influenciar substancialmente a liberação de Ca para essa amostra.

O potássio, e elemento de maior interesse para este trabalho, foi mais liberado pela amostra KMC com 16,6mg/L. Seguido das amostras MY-04 e MY-01 com 8,3mg/L por fim MY-06 com 6,98mg/L.

**Tabela 11 - Liberação de Cátions (mg/L)**



## **7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

A partir dos resultados obtidos pelos métodos de análises realizados para se observar em detalhes características texturais de minerais, relação de contato, fases minerais primárias e secundárias, composição química e imagens de microscopia eletrônica de varredura, fica evidente que o principal mecanismos que auxiliam a liberação de potássio está associado aos cátions de K da estrutura da nefelina.

Este processo ficou evidenciado em MEV quando observamos os mapas compostacionais da amostra MY-04 e KMC. A formação de analcima e cancrinita (minerais secundários) é intensificada com a adição de água ao sistema, e sua formação é limitada pela formação da nefelina (mineral primário). A identificação destas fases secundárias também é reforçada em difratogramas de raios X observados nas amostras, incluindo a MY-01. A equação química equilibrada para a formação da analcima é evidenciada na figura 47, e a equação química para formação da cancrinita na figura 48. Para a formação da cancrinita, é o caso em que deve ter no sistema cátions de Ca disponíveis para a sua formação, e como na amostra KMC foi observado carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) e apatitas, estas são fontes de Ca para a formação desta fase.

## Equação química balanceada para formação de Analcima

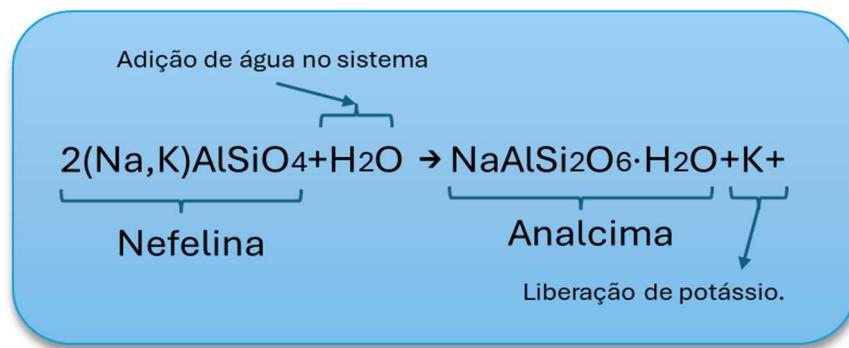


Figura 47 – Equação empírica para formação de Analcima  
**Equação química balanceada para formação de Cancrinita**

Adição de Ca, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O no sistema

$$2\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} + 2\text{Ca}^{++} + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_6\text{Ca}_2[(\text{CO}_3)_2|\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{K}^{+}$$

Nefelina

Liberação de potássio.

Figura 48 – Equação empírica para formação de Cancrinita.

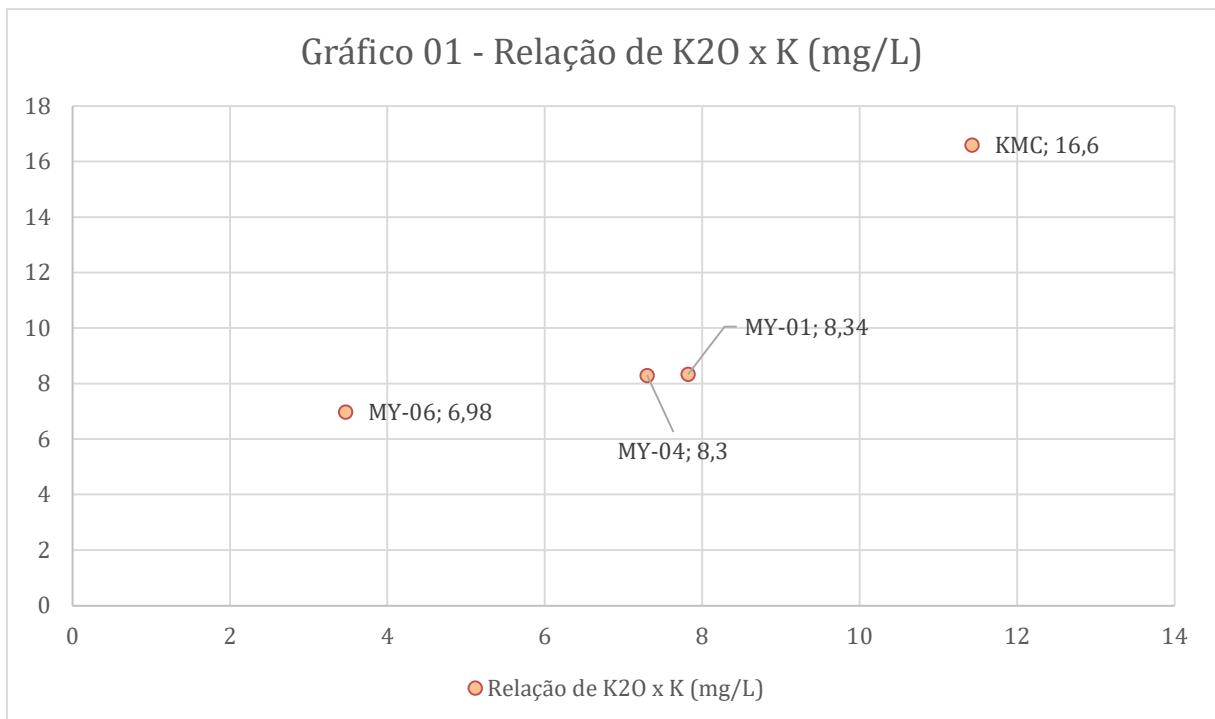
No trabalho de Swoboda, et al. (2022), capítulo 2.1, são discutidas as características mineralógicas e os tipos de minerais silicáticos comuns de rochas básicas até ácidas. Na tabela 12 são listados os principais minerais silicáticos, sua composição, e a taxa de dissolução média para cada mineral, com base nos dados mineralógicos adaptados de Klein e Philpotts (2017) e Manning e Theodoro (2020).

Quando comparamos as imagens observadas em MEV para a nefelina ao lado do ortoclásio na amostra KMC (figura 43) com a tabela de dissolução, entendemos o porquê a nefelina apresenta quase que por completo substituição para analcima e cancrinita, enquanto o ortoclásio quase está límpido, boa baixa alteração na superfície mineral, ou formação de argilas. A partir da tabela 12, podemos avaliar que a aplicação de um pó de rocha qualquer e o potencial de liberação de cátions para o meio não depende do teor da química total dos elementos, e sim da estrutura dos minerais presente do pó de rocha, visto que cada mineral silicátilcos tem uma ordem de alteração e um tipo de arranjo atômico. Apesar do ortoclásio possuir cerca de 3 a 4 vezes mais potássio na sua composição química, os feldspatoídes possuem taxas de dissolução 1000x maiores que os feldspatos alcalinos.

Tabela 12 – Taxas de dissolução média para minerais silicáticos – Extraído de Swoboda, et al. (2022) - Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review, Science of The Total Environment

| Dissolution rate constants (25 °C, pH = 0) of silicate minerals. Relative dissolution rates show the dissolution rate of a given mineral relative to that of K-Feldspar (Dissolution rates from Palandri and Kharaka (2004)). Mineralogical data adapted from Klein and Philpotts (2017) and Manning and Theodoro (2020). |              |   |  |                           |
|---|--------------|---|--|---------------------------|
| Mineral sub-group   | Mineral      | Formula   | Dissolution rate log mol·m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> | Relative dissolution rate |
| <b>Tectosilicates</b>   |              |   |  |                           |
| K-Feldspar  | Orthoclase   | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>   | −10.06   | 1                         |
| Plagioclase-Feldspar  | Albite       | NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | −10.16   | 0.794                     |
| Plagioclase-Feldspar  | Anorthite    | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>  | −3.50  | 3.630.000                 |
| Feldspathoids   | Nepheline    | (Na,K)AlSiO <sub>4</sub>  | −2.73  | 21.400.000                |
| Feldspathoids   | Leucite      | KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>   | −6.00  | 11.500                    |
| <b>Phyllosilicates</b>  |              |   |  |                           |
| Mica  | Muscovite    | KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>                              | −11.85   | 0.016                     |
| Mica  | Biotite      | K(Fe,Mg) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>                         | −9.84  | 1.66                      |
| Mica  | Glauconite   | (K,Na)(Fe <sup>3+</sup> ,Al,Mg) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> | −4.80  | 182.000                   |
| Serpentine  | Lizardite    | Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>                                    | −5.70  | 22.909                    |
| <b>Inosilicates</b>   |              |   |  |                           |
| Pyroxene  | Wollastonite | CaSiO <sub>3</sub>  | −5.37  | 49.000                    |
| Pyroxene  | Diopside     | CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>  | −6.36  | 5.010                     |
| Pyroxene  | Enstatite    | MgSiO <sub>3</sub>  | −9.02  | 11                        |
| Amphibole   | Hornblende   | Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>4</sub> Al[Si <sub>2</sub> AlO <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>        | −7.00  | 1.150                     |
| Amphibole   | Glaucophane  | Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>5</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>      | −5.60  | 28.840                    |
| <b>Nesosilicates</b>  |              |   |  |                           |
| Olivine   | Forsterite   | Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | −6.85  | 1.620                     |

A partir dos difratogramas de raios X, foram exportados os arquivos refinados de cada estrutura em formato (cif.), os parâmetros de cela unitária para cada amostra e representação 3D do mineral foi visualizado no software VESTA. O fonolito (MY-01) possui a nefelina com menor volume, enquanto a amostra piloto KMC, foi a que teve os maiores parâmetros de cela em todos os eixos, assim como o volume (KMC>MY-06>MY-04>MY-01). Isto pode ser um indicativo de que celas cristalográficas com volume e área maior, podem ser propensas a liberarem mais cátions para o meio? A partir do experimento de dissolução, vemos que a amostra KMC foi a que mais liberou potássio para o meio. No entanto, é incerto afirmar que a relação de liberação está relacionada aos parâmetros espaciais, visto que a liberação de K, esteve proporcionalmente relacionada ao seu teor total de potássio (K<sub>2</sub>O), o gráfico 01 apresenta o teor total de K<sub>2</sub>O (eixo X) vs K (mg/L – eixo Y) liberado do experimento.



A figura 49 apresenta os parâmetros de cela para as nefelinas refinadas em cada amostra, a figura 50 apresenta um modelo 3D das posições atômicas e os poliedros de cada átomo. A nefelina ajustada para o modelo, possui os cátions de K posicionados nas extremidades do cristalito, ja o Na, fica entre os sítios de K. Este tipo de arranjo, sugere que a espacialidade hexagonal da nefelina e o posicionamento dos cátions de potássio nas extremidades são favorecidos para a interação com o meio. Enquanto no ortoclásio, os tetraedros de silícios devem influenciar na liberação do cátion, já que outras moléculas catiônicas podem fazer

ligações com estes tetraedros, impossibilitando a mobilidade do potássio para o meio (figura 51).

Parametros espaciais para nefelina

MY-01

Space Group: P 63 (#173-1)

a = 9.99068 Å     $\alpha$  = 90.0000°

b = 9.99068 Å     $\beta$  = 90.0000°

c = 8.37448 Å     $\gamma$  = 120.0000°

V = 723.9000 Å<sup>3</sup>

MY-04

Space Group: P 63 (#173-1)

a = 9.99099 Å     $\alpha$  = 90.0000°

b = 9.99099 Å     $\beta$  = 90.0000°

c = 8.37560 Å     $\gamma$  = 120.0000°

V = 724.0417 Å<sup>3</sup>

MY-06

Space Group: P 63 (#173-1)

a = 9.99956 Å     $\alpha$  = 90.0000°

b = 9.99956 Å     $\beta$  = 90.0000°

c = 8.38030 Å     $\gamma$  = 120.0000°

V = 725.6914 Å<sup>3</sup>

KMC

Space Group: P 63 (#173-1)

a = 10.00218 Å     $\alpha$  = 90.0000°

b = 10.00218 Å     $\beta$  = 90.0000°

c = 8.38781 Å     $\gamma$  = 120.0000°

V = 726.7224 Å<sup>3</sup>

Figura 49 – Parâmetros de cela unitária para a nefelina de cada amostra.

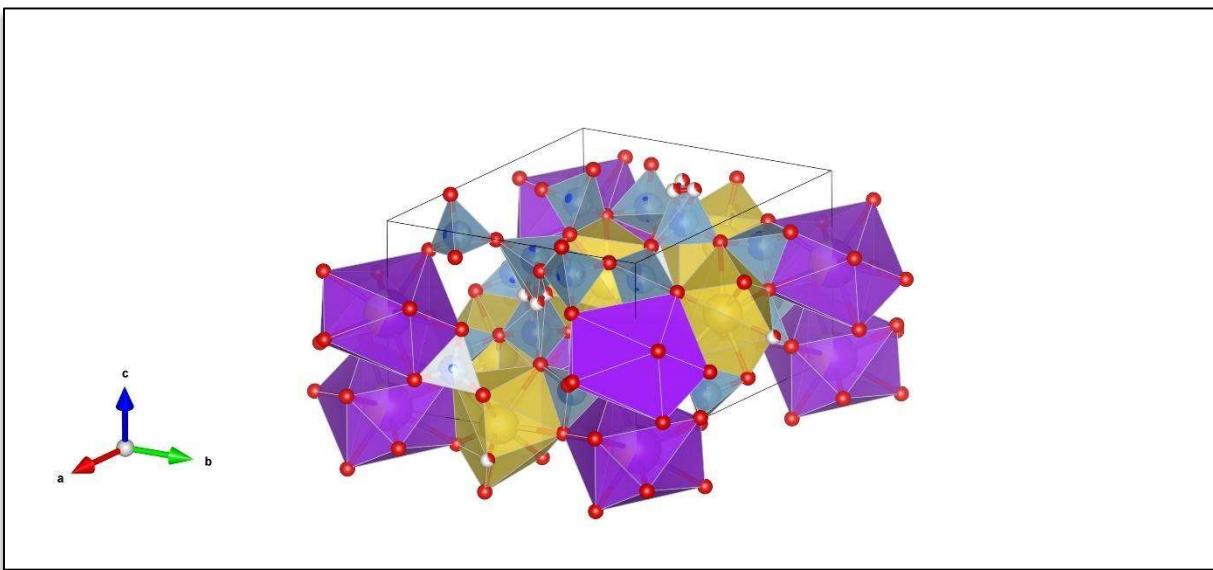


Figura 50 – Representação 3D para as posições atômicas dos átomos da nefelina exportado no software Vesta - roxo – potássio; amarelo – sódio; Azul – alumínio, vermelho – oxigênio.

Um estudo realizado pela Embrapa Milho e Sorgo com bactérias e fungos inoculados, foram usados para avaliar o potencial de biosolubilização de um fonolito in vitro. Foi analisado que a estirpe B30, bactéria pertencente ao gênero Burkholderia, foi a mais eficaz no teste de solubilização feita com 10 fungos e 3 bactérias, sendo a B30 uma dessas três. Ao longo de 10 dias de fermentação, a estirpe liberou 38 mg/L, correspondendo a um incremento de 70% no teor de K no meio incubado em relação à amostra de controle sem microrganismos. Além disso, o pH avaliado de cada testes variou de 5,2 a 7,3. Sendo que a B30-Burkholderia foi a que houve maior acidificação do meio e maior disponibilização de K ao meio, mostrando uma correlação entre o meio acidificado e a liberação de potássio. Ácidos orgânicos também foram identificados nos testes, como oxálico, tartárico, glucônico, cítrico e málico (Embrapa, 2015).

Através deste estudo, podemos concluir que a liberação de potássio pode ser acelerada com bactérias e fungos que estão presentes nos solos, e que algumas bactérias em especiais, podem ser mais promissoras que outras. Uma alternativa, seria testar o potencial de dissolução dessas bactérias com grãos de feldspatos puramente moídos, sem contaminação de outras fases.

Outra consideração que deve ser levada, é a química das rochas que foram avaliadas. A amostra MY-06 é a mais básica de todas, o teor de SiO<sub>2</sub> é de 44%, enquanto as outras possuem teores intermediários, semi-básicos (56-58%). Pela natureza da rocha, é normal que o Gabro possua mais minerais maficos, com pouco teor de K<sub>2</sub>O do que as outras amostras. E mesmo que a liberação de K seja a menor de todas, não deve ser descartada seu uso como remineralizador.

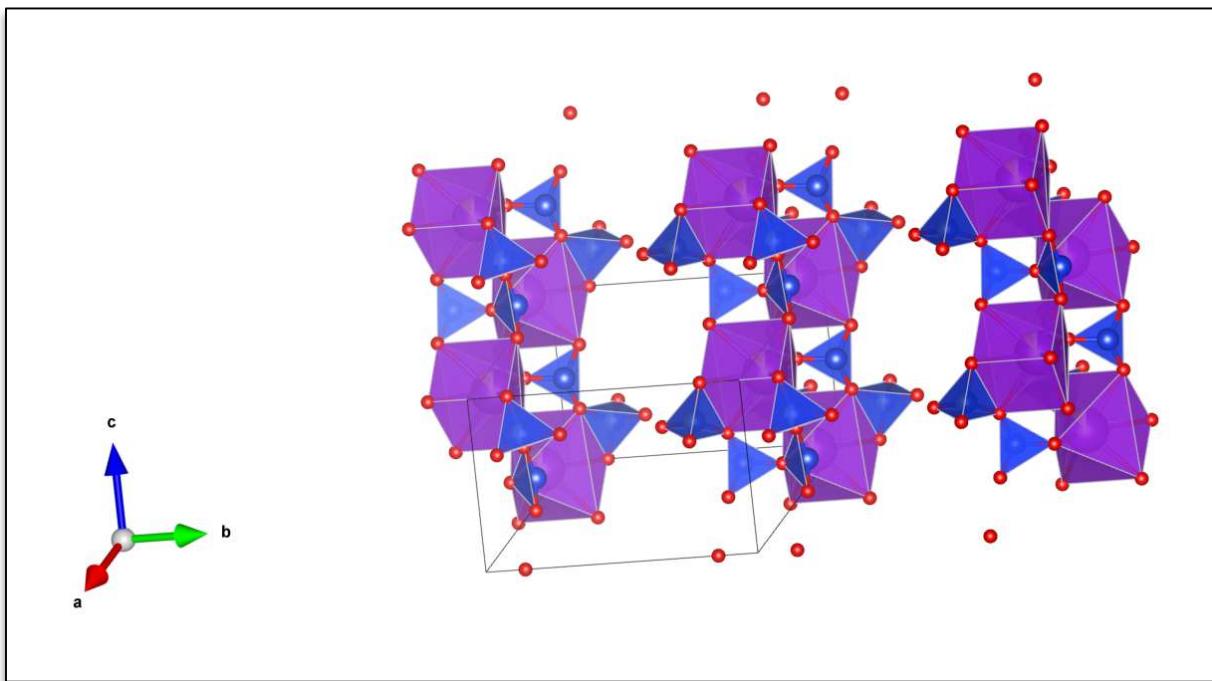


Figura 51 – Representação 3D para as posições atômicas dos átomos de ortoclásio exportado no software Vesta – Roxo – potássio; azul – silício.

Swobodda et al. (2022) também compara a eficiência de rochas geneticamente diferente, como granitos e basaltos. Apesar de testes com granitos não apresentarem resultados de rendimentos a curto prazo satisfatórios, comparado com rochas alcalinas e básicas, a longo prazo estas rochas apresentaram redução de Al trocável no solo, reduzindo o nível de toxicidade e aumento do nível de CTC (capacidade de troca catiônica).

Veja, a eficiência de liberação de nutrientes para o solo com pós de rochas, estão muito mais associadas com as propriedades espaciais dos átomos dos minerais, e isto é exemplificado no caso nefelina e ortoclásio. Rochas que possuem muito mais ortoclásio, como granitos por exemplo, possuem altos teores de potássio na composição química total comparado a outras rochas, mas sua liberação de nutrientes vai ser muito mais lenta, comparada a outras rochas que possuem minerais muito mais propensos a liberarem seus cátions para o meio. Pensando nisto, pós de rochas podem ser utilizadas para diferentes finalidades e objetivos a curto ou longo prazo pensando na sua mineralogia. Rochas alcalinas por exemplo, poderiam ser usadas para remineralização de solos e lavouras que apresentam deficiência de potássio, e com isso, fornecem uma rápida liberação deste nutriente. Rochas granitoides poderiam ser pensadas em casos que o solo apresenta baixa CTC e alta permeabilidade, como caso de solos arenosos. Ao longo prazo, a alteração de feldspato para argila, auxiliariam solos deficientes na retenção de nutrientes.

## 8. CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados de texturas minerais, composição mineral, e características cristalográficas dos minerais potássicos avaliados:

1. Dos minerais potássicos, a nefelina é o mineral com melhor capacidade de liberação potássio. Esse processo é marcado pela formação de minerais secundários analcima e cancrinita nas bordas e no centro do mineral da nefelina. Além disto, o posicionamento atômico dos cátions de K nas extremidades do mineral, favorecem com que este mineral seja mais propenso a liberar este elemento para o meio;
2. A amostra que mais liberou K para o meio, a partir experimento de bancada realizado, foi em ordem decrescente: KMC (16,6mg/L); MY-01 (8,34 mg/L); MY-04 (8,30 mg/L) e MY-06 (6,98mg/L), e tiveram uma relação de liberação com seu teor total de K<sub>2</sub>O;
3. Os mapas compostionais realizados nas lâminas de cada amostras foram um ótimo método para mapear a distribuição de potássio de outros minerais não caracterizados em microscopia ótica ou difratometria de raios X, permitindo a identificação de minerais isotrópicos e outros acessórios em menor proporção nas amostras;
4. A presença de enxofre na química da rocha faz com que se forme uma variedade rara de sodalita com enxofre na amostra MY-04, tratando-se da huayna;
5. Apesar da amostra KMC ser a que mais liberou potássio para o meio, não devem ser descartadas a possibilidade destas outras amostras serem utilizadas como remineralizador;
6. Os experimentos de bancadas realizados foram um ótimo meio para se comparar a eficiência de liberação de cátions de diferentes rochas em meio controlado. Como o experimento leva menos de 24hrs, este método poderia ser replicado em larga escala para outros experimentos comparativos que desejam direcionar estudos em rochas com melhores resultados;
7. O refinamento de Rietveld por difração de raios X se provou uma ótima ferramenta para identificação e quantificação das fases minerais das amostras e cálculo teórico da química total das amostras difratadas;
8. Este trabalho não segue os métodos de avaliação e caracterização de remineralizadores, determinada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), e outros procedimentos e normas são adotadas para que um pó de rocha seja atestado e cadastrado como remineralizador de acordo com a legislação brasileira.

## 9. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fernando F. M.; HASUI, Yociteru; NEVES, Benjamim B. B.; FUCK, Roberto A. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., Anais... p. 363-391, 1977.
- ALMEIDA, Fernando F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. Revista Brasileira de Geociências, v. 16, n. 4, p. 325-349, 1986.
- ALMEIDA, Fernando F. M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. Revista Brasileira de Geociências, v. 13, n. 3, p. 139-158, 1983.
- BROD, Jose & BARBOSA, Elisa & JUNQUEIRA-BROD, Tereza Cristina & GASPAR, J.C. & Senna Diniz Pinto, Henrique & Sgarbi, Patricia & Petrinovic, Ivan. The Late – Cretaceous Goiás Alkaline Province (GAP), Central Brazil. In: COMINCHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (editores). Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo: Fapesp, p. 261-316, 2005
- Danni, J.C.M. (1974). Geologie des complexes ultrabasiques alcalins de la region d'Iporà, Goiás (Brasil). Thèse, Université Sud – Centre d'Orsay, Paris, 101 p.
- DIAS, H.; AZEVEDO, A. Solubilização de basalto por ácidos orgânicos. Universidade de São Paulo. Anais... In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM - NORMATIZAÇÃO DO USO DE PÓS DE ROCHA NA AGRICULTURA. II Congresso Brasileiro de Rochagem: USP-ESALQ, 2013.
- DOEBELIN, N.; KLEEBERG, R. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. Journal of Applied Crystallography, v. 48, n. 5, p. 1573–1580, 1 out. 2015.
- Klein, C., Philpotts, A.R., 2017. Earth Materials: Introduction to Mineralogy and Petrology / Cornelis Klein, University of New Mexico, Emeritus, Anthony Philpotts, University of Connecticut, Emeritus. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA.
- LACERDA FILHO, J. V.; REZENDE, A.; SILVA, A. Geologia e recursos minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal - Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil (Escala 1:500.000). Goiânia: CPRM / METAGO / UnB, 1999
- Le Bas, Michael J., et al. "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram." *Journal of petrology* 27.3 (1986): 745-750.
- Manning, D.A., Theodoro, S.H., 2020. Enabling food security through use of local rocks and minerals. Ext. Ind. Soc. 7 (2), 480–487.

Philipp Swoboda, Thomas F. Döring, Martin Hamer, Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review, Science of The Total Environment, Volume 807, Part 3, 2022, 150976, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.

Rietveld, H. M. (1967). Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement. *Acta Cryst.* 22, 151–152.

SEIXAS, M. A. IMPACTOS DOS CONFLITOS ISRAEL-HAMAS E RÚSSIA-UCRÂNIA NO MERCADO GLOBAL DE FERTILIZANTES E SEUS POSSÍVEIS REFLEXOS NO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO - EMBRAPA/NT-45, Acesso em: 14 mar. 2024.

SIC/ SGM – SECRETÁRIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ESTADO DE GOIÁS/ SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO. Disponível em <http://www.sic.goiás.gov.br/sgm> .

SILVA, M. A. G. DA; BOARETTO, A. E.; FERNANDES, H. G.; SCIVITTARO, W. B. Efeito do cloreto de potássio na salinidade de um solo cultivado com pimentão, *Capsicum annuum* L., em ambiente protegido. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 23, p. 1085-1089, 8 maio 2008.

SILVA, U. C.; MARIEL, I. E.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A.; RESENDE, A. V.; LANA, U. G. P. Biossolubilização de potássio in vitro a partir da rocha fonolito por microrganismos do solo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 28 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 177).

SILVA et al. ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO COMPOSICIONAL DA GRANADA MELANITA: CHAVE PARA O ENTENDIMENTO DA GÊNESE DE ROCHAS ALCALINAS. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://ssbg2017anais.siteoficial.ws/ST/st8/ST819.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

VIEIRA, M. M.; BRITO, Y. L.; BARBOSA, E. S. R.; NASCIMENTO, E. C. L.; REIS, M. A. "Mapeamento Geológico em Escala 1:30000 do Complexo montes Claros de Goiás, Província Alcalina de Goiás". Universidade Federal de Goiás, 2024.

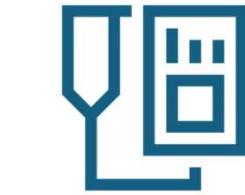
Vlach, S.R.F. 2002 –A Classe dos Tectossilicatos: Guia Geral da Teoria e Exercício. Geologia USP: Série Didática 1. 49 p.

## SITES CONSULTADOS

<http://www.crystallography.net/cod/index.php>

<http://www.profex-xrd.org/>

LEI 12.890 - L12890. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/lei/l12890.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/lei/l12890.htm)>. Acesso em: 25 mar. 2024.



## APÊNDICE A

### DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X

- O apêndice contém os resultados gerados através do refinamento feito no Software Profex.



## Sample Information

| MY01_D                   |   |                         |                   |              |
|--------------------------|---|-------------------------|-------------------|--------------|
| File Name                | MY01_D.dia  |                         |                   |              |
| Instrument configuration | d8-lynxeye-fds-02.geq                               |                         |                   |              |
| Wavelength               | CU (1.5406 Å)                                       |                         |                   |              |
| Directory                | C:/Users/Bruno Borges/Desktop/Refinamentos final/01 |                         |                   |              |
| Date of Refinement       | quarta-feira outubro 23, 2024                       |                         |                   |              |
| Operator                 | Bruno Borges  |                         |                   |              |
| Statistics               | R <sub>wp</sub> = 8.93                              | R <sub>exp</sub> = 7.46 | $\chi^2$ = 1.4329 | GoF = 1.1971 |

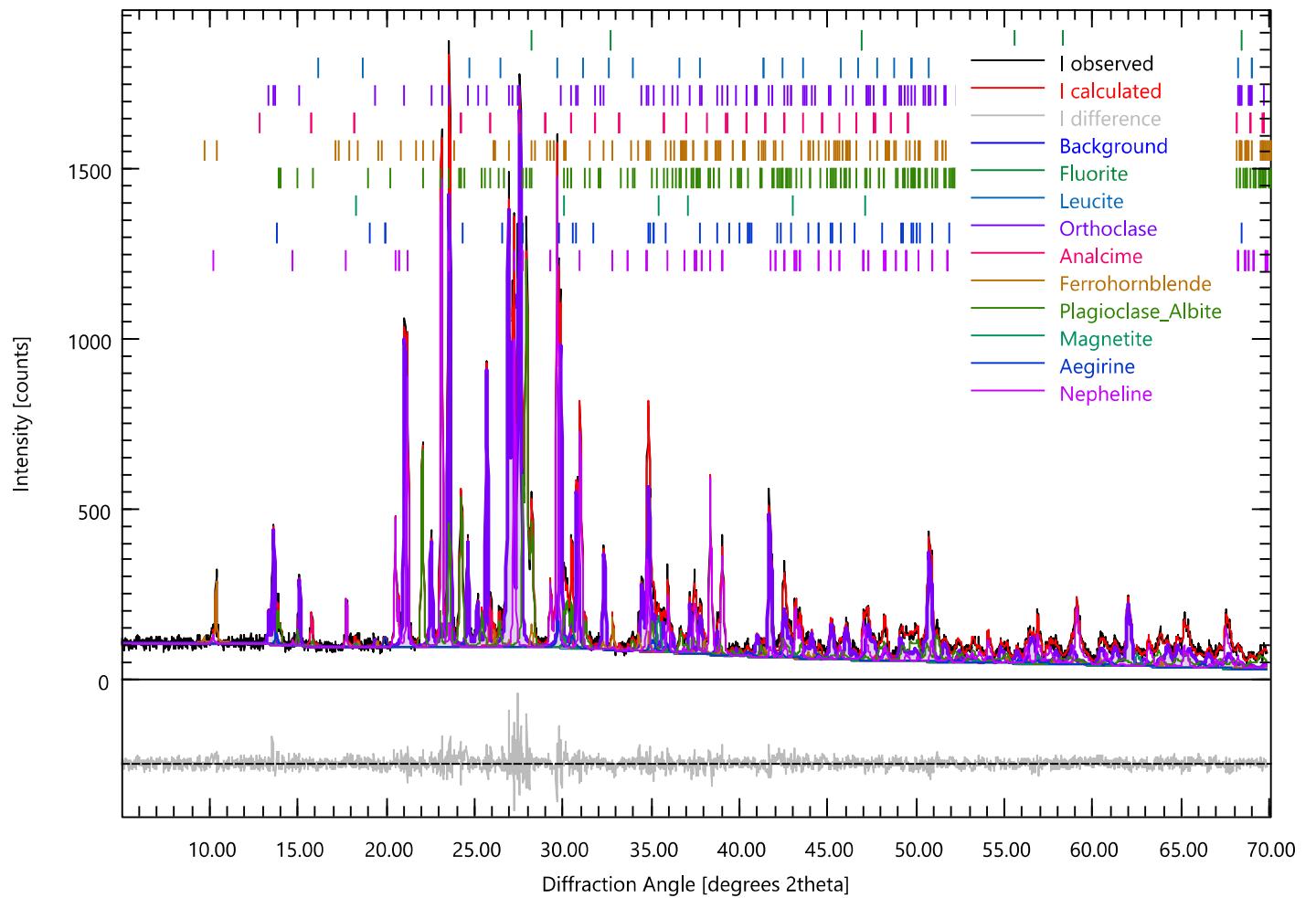
## Global GOALS

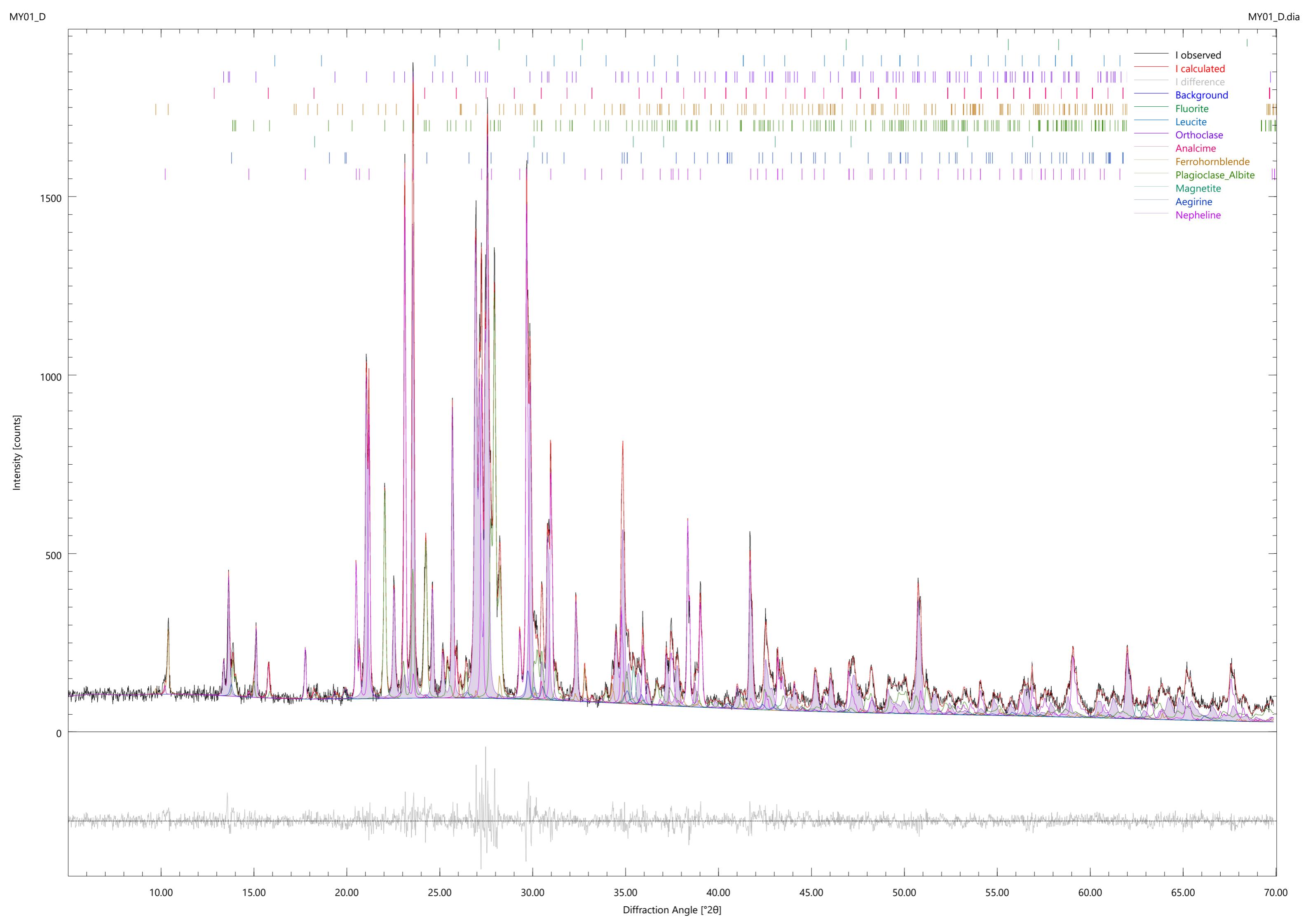
| Parameter                         | Value  | ESD    |
|-----------------------------------|--------|--------|
| Qfluorite                         | 0.0007 | 0.0004 |
| QPotassiumaluminiumcatenasilicate | 0.0016 | 0.0008 |
| QOrthoclase                       | 0.453  | 0.003  |
| QAnalcime                         | 0.0129 | 0.0009 |
| QFerrohornblende                  | 0.0197 | 0.0008 |
| Qalbite                           | 0.202  | 0.003  |
| Qmagnetite                        | 0.0075 | 0.0005 |
| Qaegirine                         | 0.019  | 0.001  |
| QNepheline                        | 0.284  | 0.003  |

## Diffraction Pattern

MY01\_D

MY01\_D.dia







## Sample Information

| MY04_D                   |   |                         |                   |              |
|--------------------------|---|-------------------------|-------------------|--------------|
| File Name                | MY04_D.dia  |                         |                   |              |
| Instrument configuration | d8-lynxeye-fds-02.geq                               |                         |                   |              |
| Wavelength               | CU (1.5406 Å)                                       |                         |                   |              |
| Directory                | C:/Users/Bruno Borges/Desktop/Refinamentos final/04 |                         |                   |              |
| Date of Refinement       | sábado novembro 09, 2024                            |                         |                   |              |
| Operator                 | Bruno Borges  |                         |                   |              |
| Statistics               | R <sub>wp</sub> = 11.13                             | R <sub>exp</sub> = 6.32 | $\chi^2$ = 3.1014 | GoF = 1.7611 |

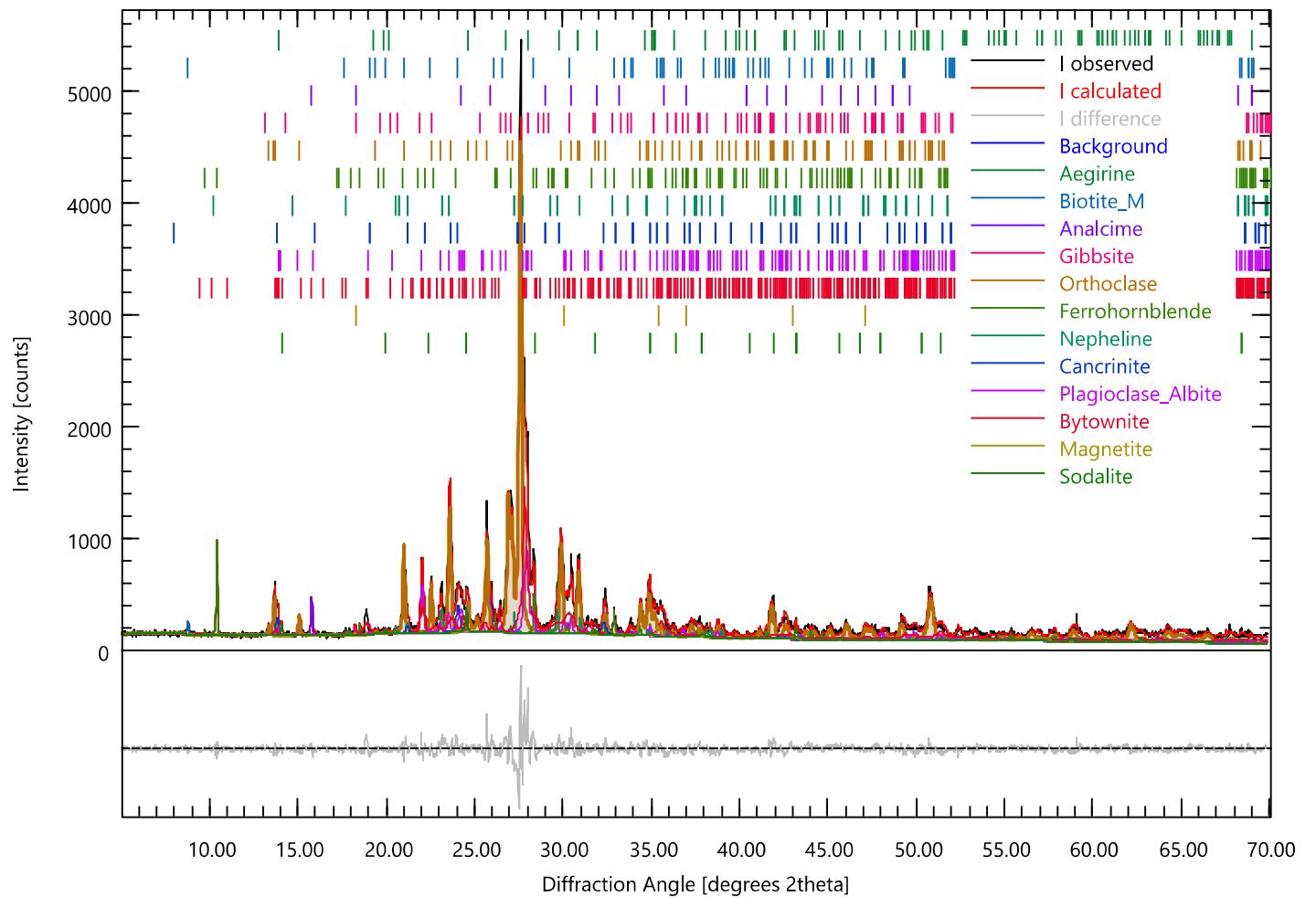
## Global GOALS

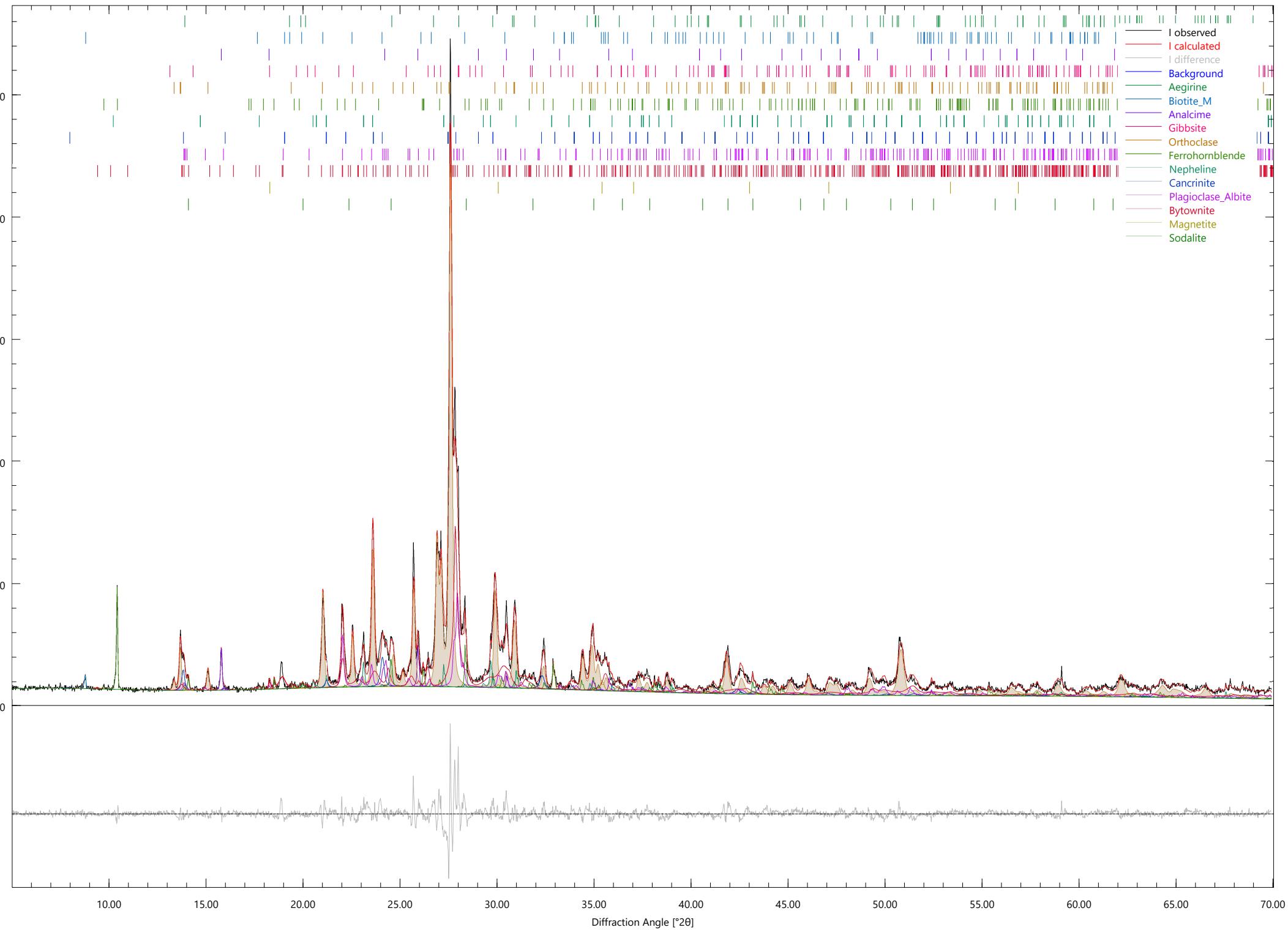
| Parameter        | Value  | ESD    |
|------------------|--------|--------|
| Qaegirine        | 0.010  | 0.002  |
| Qbiotite1m       | 0.0072 | 0.0008 |
| QAnalcime        | 0.0108 | 0.0004 |
| QGibbsite        | 0.005  | 0.001  |
| QOrthoclase      | 0.476  | 0.007  |
| QFerrohornblende | 0.035  | 0.001  |
| QNepheline       | 0.040  | 0.002  |
| QCancrinite      | 0.015  | 0.009  |
| Qalbite          | 0.134  | 0.004  |
| QBytownite       | 0.245  | 0.007  |
| QMagnetite       | 0.0045 | 0.0008 |
| Qsodalite        | 0.017  | 0.001  |

## Diffraction Pattern

MY04\_D

MY04\_D.dia







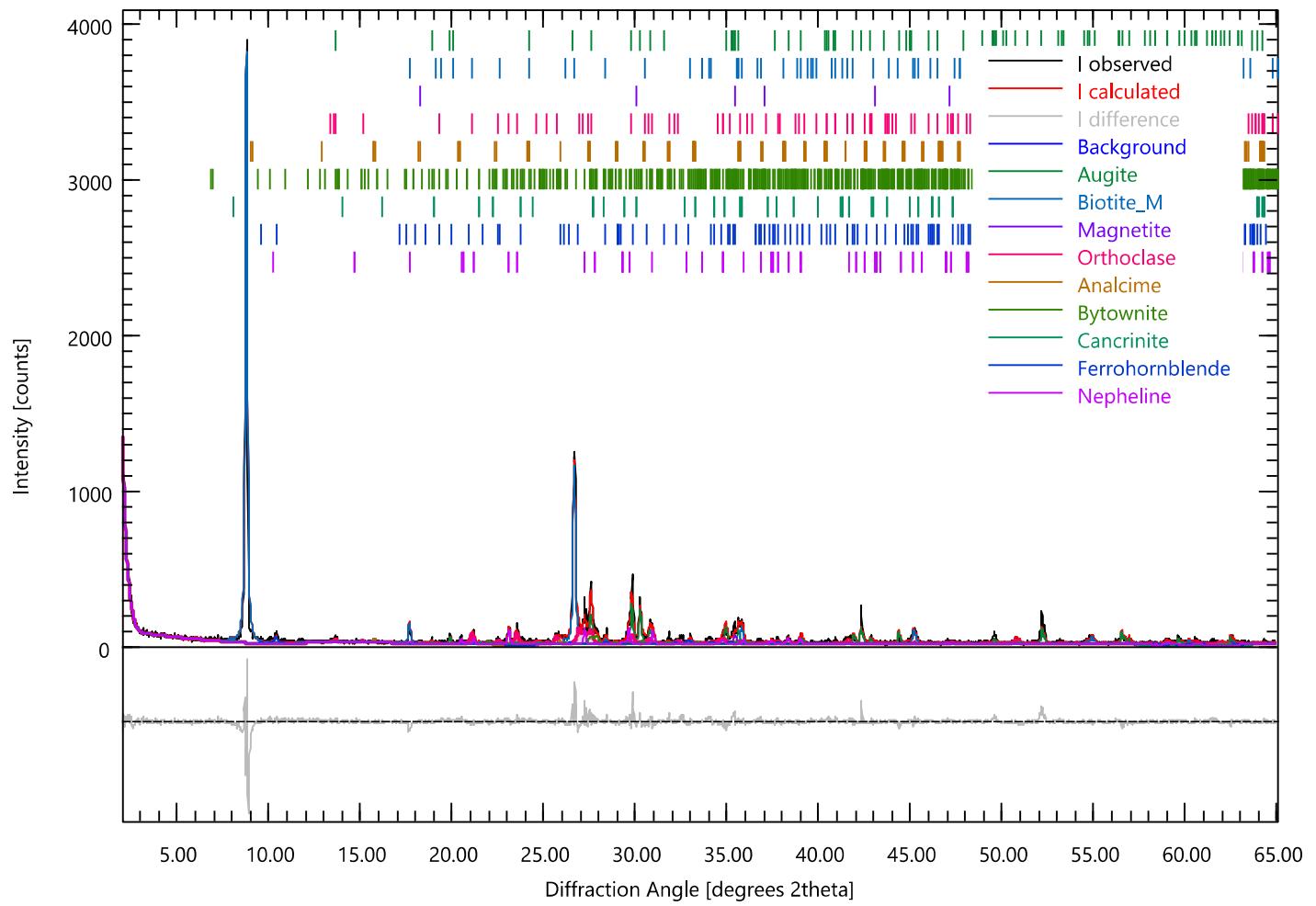
## Sample Information

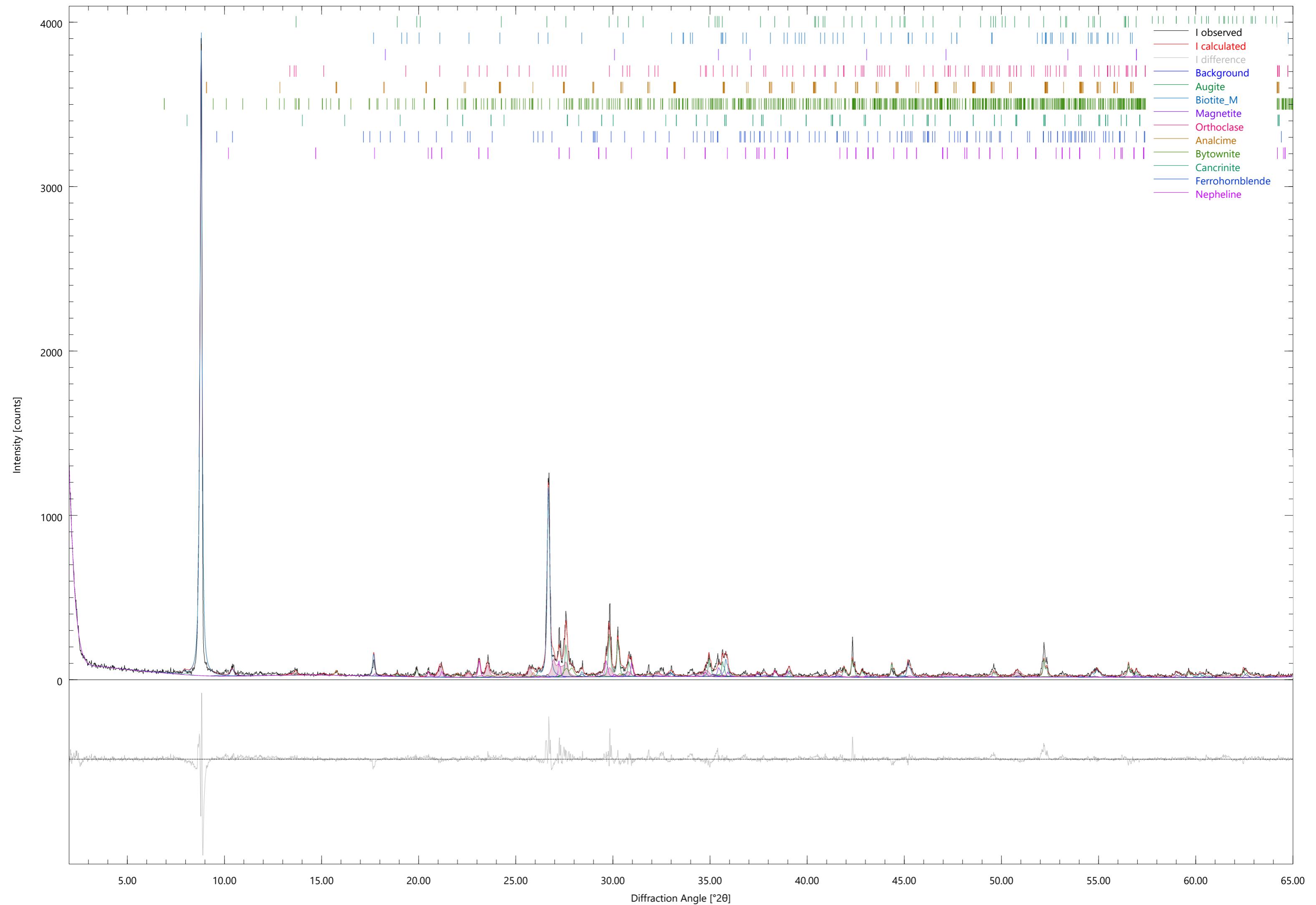
| drx4_p11My06             |   |                          |                   |              |
|--------------------------|---|--------------------------|-------------------|--------------|
| File Name                | drx4_p11_my06.dia                                   |                          |                   |              |
| Instrument configuration | d8-lynxeye-fds-02.geq                               |                          |                   |              |
| Wavelength               | CU (1.5406 Å)                                       |                          |                   |              |
| Directory                | C:/Users/Bruno Borges/Desktop/Refinamentos final/06 |                          |                   |              |
| Date of Refinement       | domingo outubro 27, 2024                            |                          |                   |              |
| Operator                 | Bruno Borges  |                          |                   |              |
| Statistics               | R <sub>wp</sub> = 20.48                             | R <sub>exp</sub> = 12.47 | $\chi^2$ = 2.6973 | GoF = 1.6423 |

## Global GOALS

| Parameter        | Value | ESD   |
|------------------|-------|-------|
| Qaugite          | 0.311 | 0.006 |
| Qbiotite1m       | 0.141 | 0.004 |
| Qmagnetite       | 0.015 | 0.002 |
| QOrthoclase      | 0.234 | 0.006 |
| QAnalcime        | 0.018 | 0.003 |
| QBytownite       | 0.108 | 0.005 |
| QCancrinite      | 0.009 | 0.001 |
| QFerrohornblende | 0.046 | 0.003 |
| QNepheline       | 0.119 | 0.004 |

## Diffraction Pattern







## Sample Information

| KMC_D                    |  |                         |                   |              |
|--------------------------|--|-------------------------|-------------------|--------------|
| File Name                | KMC_D.dia  |                         |                   |              |
| Instrument configuration | d8-lynxeye-fds-02.geq                                |                         |                   |              |
| Wavelength               | CU (1.5406 Å)  |                         |                   |              |
| Directory                | C:/Users/Bruno Borges/Desktop/Refinamentos final/KMC |                         |                   |              |
| Date of Refinement       | sexta-feira novembro 08, 2024                        |                         |                   |              |
| Operator                 | Bruno Borges   |                         |                   |              |
| Statistics               | R <sub>wp</sub> = 13.85                              | R <sub>exp</sub> = 7.54 | $\chi^2$ = 3.3741 | GoF = 1.8369 |

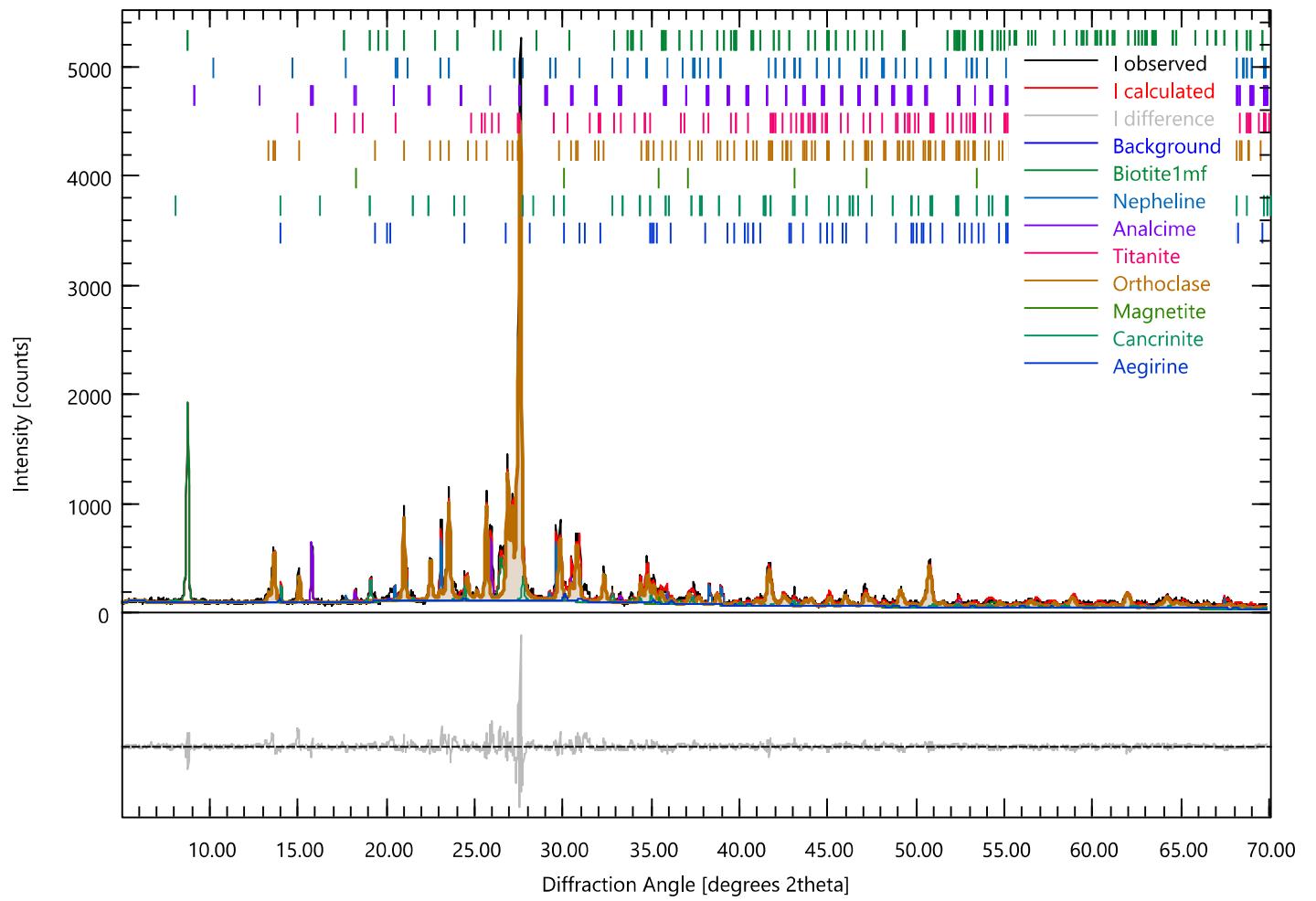
## Global GOALS

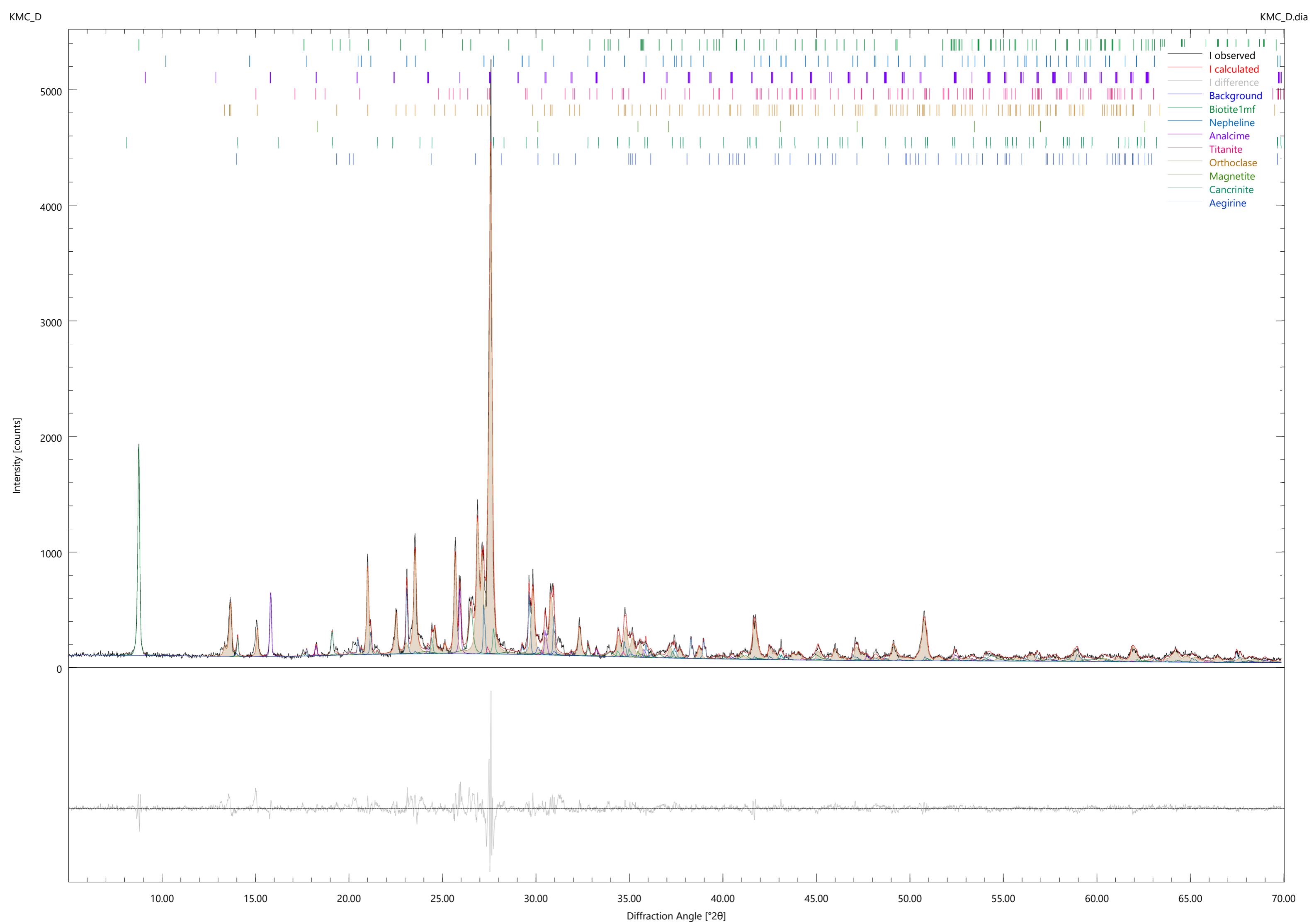
| Parameter   | Value  | ESD    |
|-------------|--------|--------|
| Qbiotite1mf | 0.078  | 0.004  |
| QNepheline  | 0.119  | 0.003  |
| QAnalcime   | 0.058  | 0.002  |
| Qtitanite   | 0.008  | 0.002  |
| QOrthoclase | 0.666  | 0.006  |
| Qmagnetite  | 0.0027 | 0.0006 |
| QCancrinite | 0.050  | 0.003  |
| Qaegirine   | 0.018  | 0.002  |

## Diffraction Pattern

KMC\_D

KMC\_D.dia



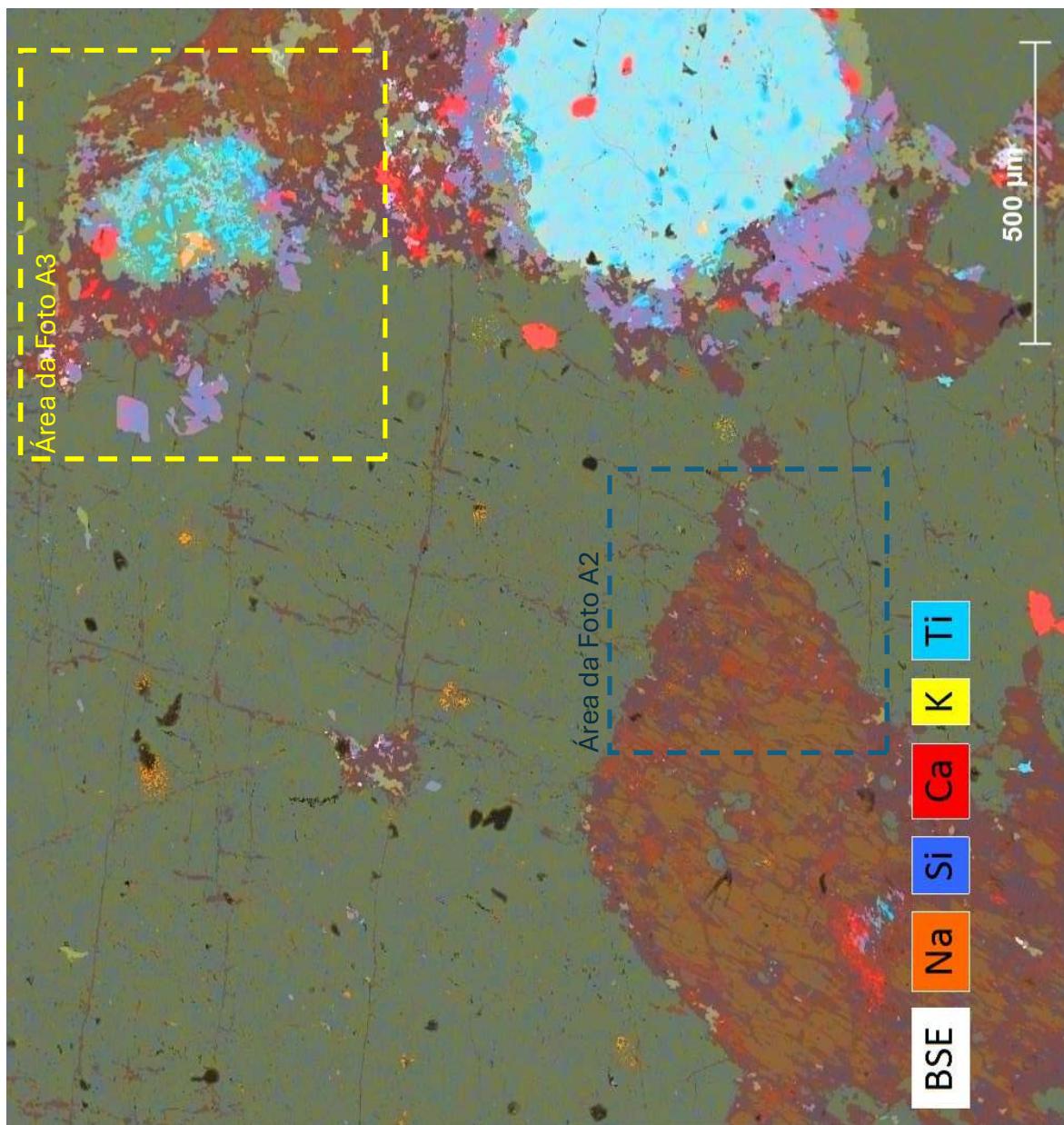




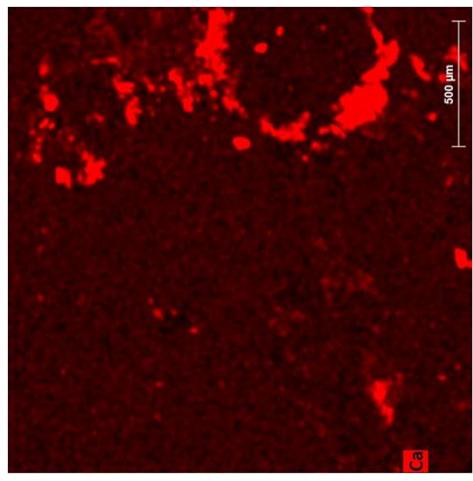
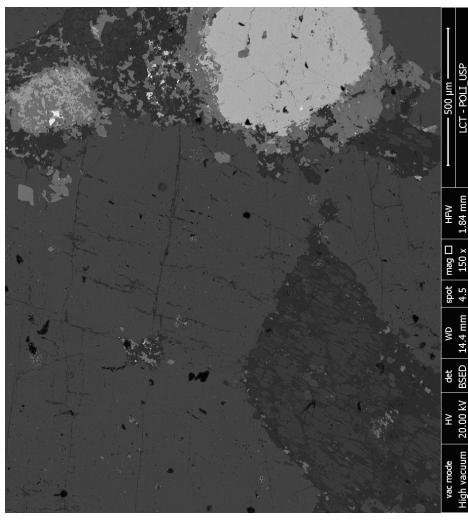
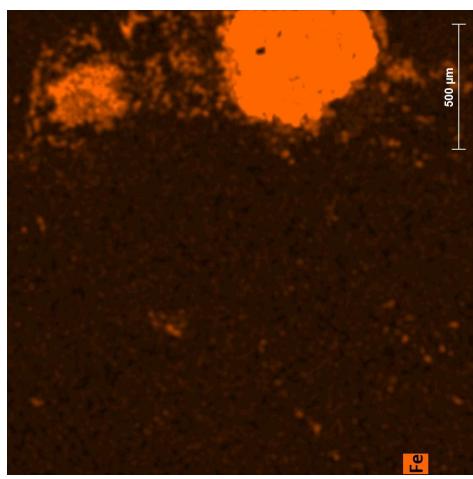
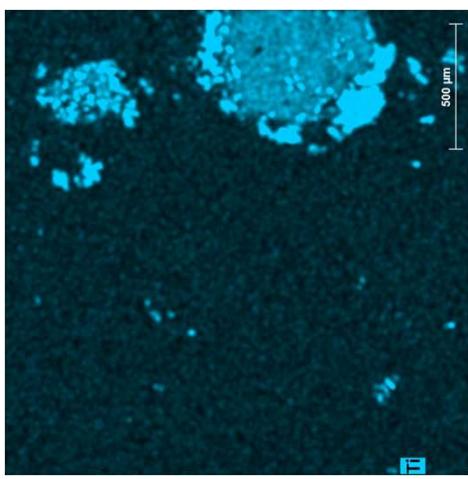
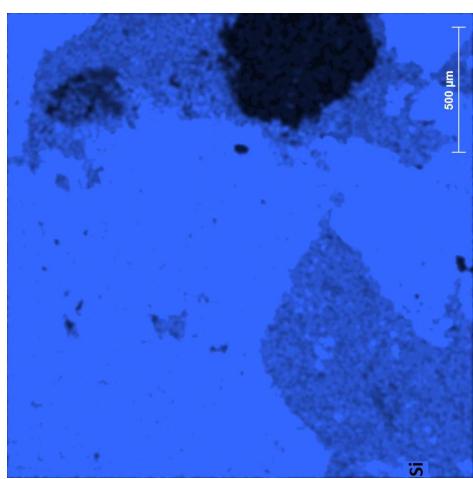
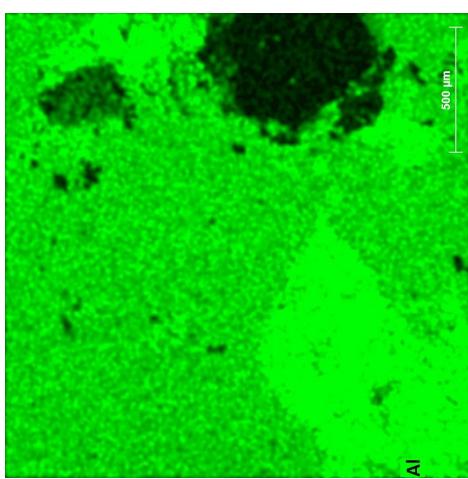
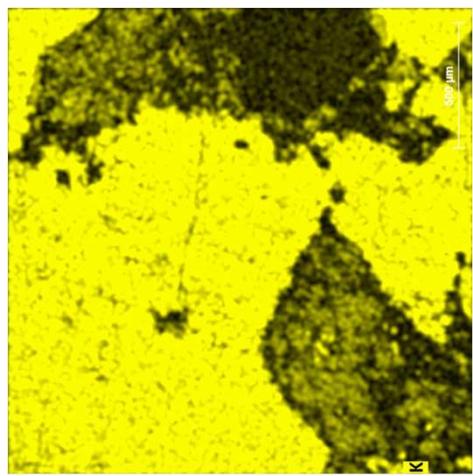
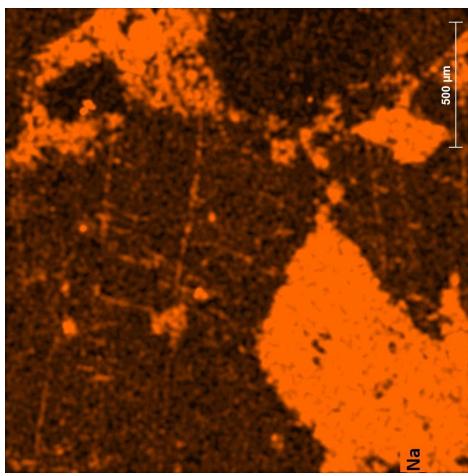
## APÊNDICE B

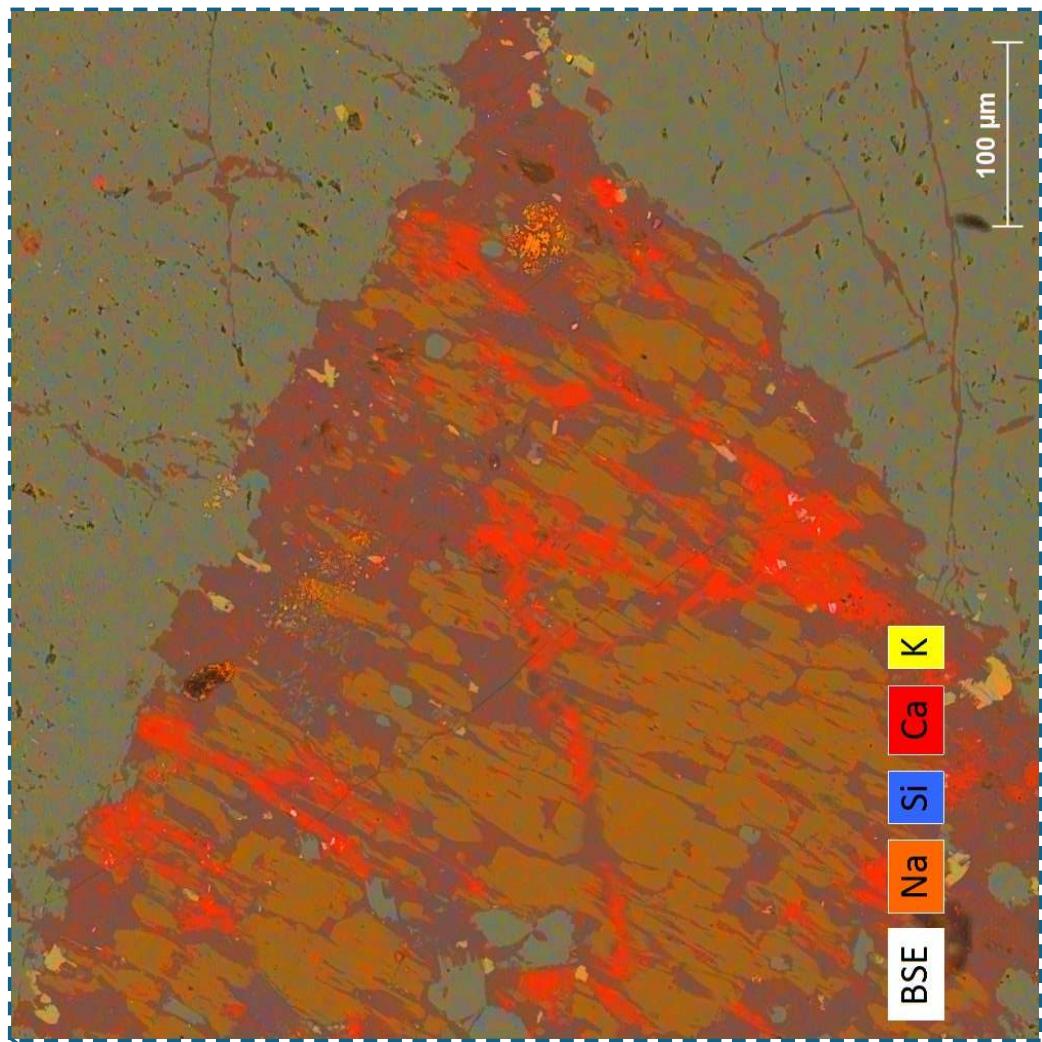
### MAPAS COMPOSIIONAIS

- O apêndice contém fotos selecionadas para apresentação das figuras que estão no texto da monografia.
- OBS:Algumas fotos não foram incluídas no texto. Sendo exclusivas deste anexo.

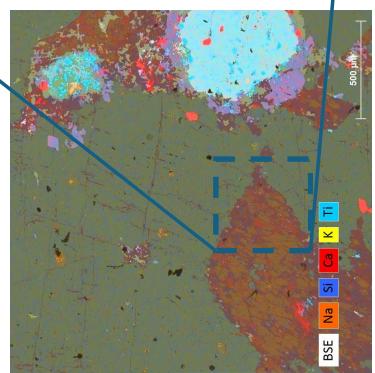


KMC  
FOTO A1

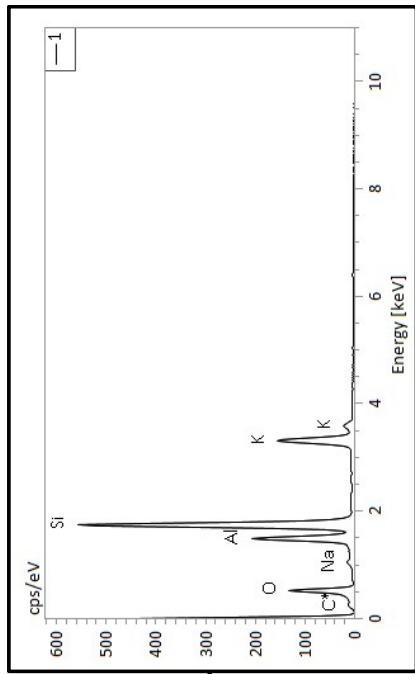
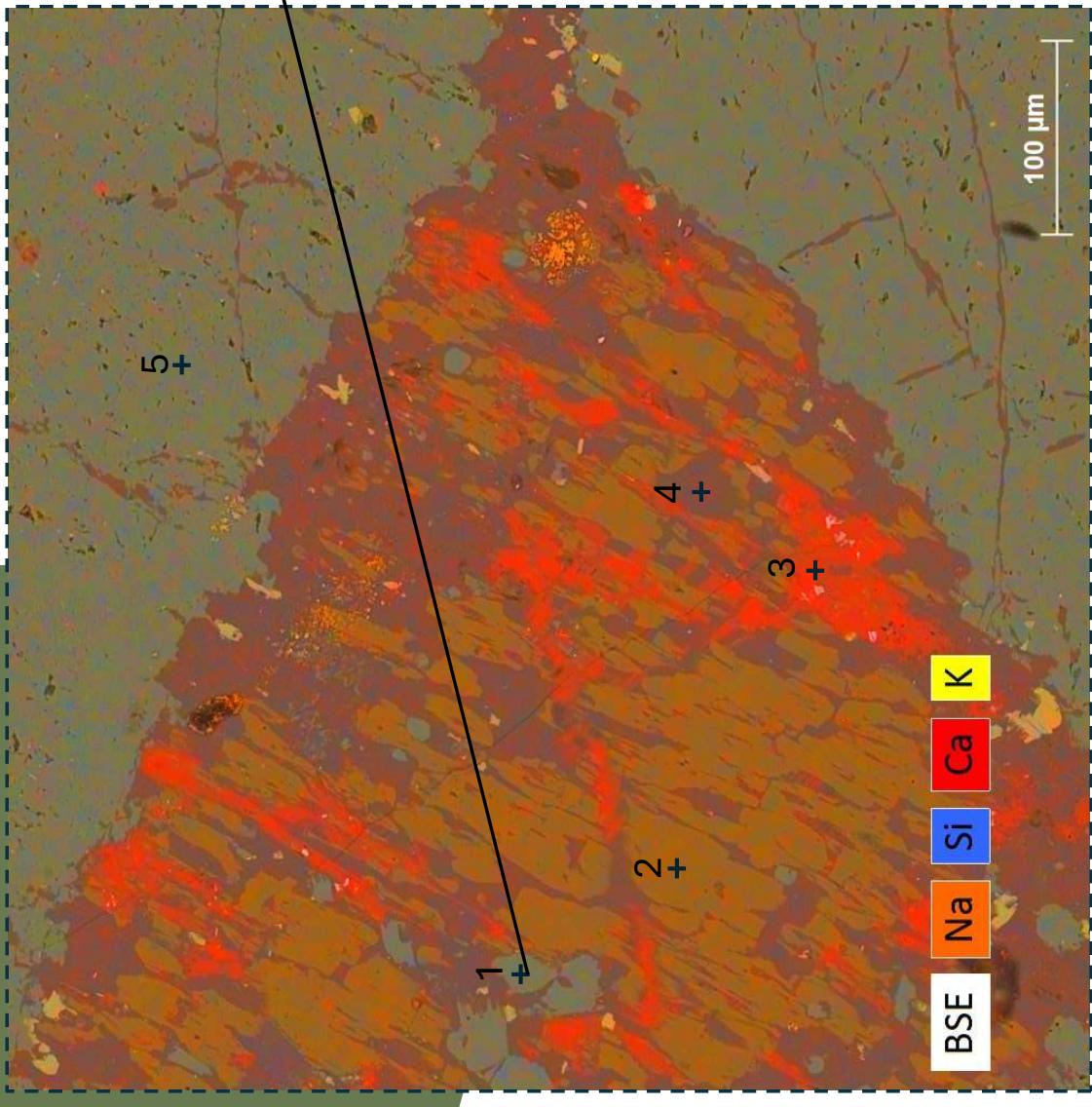




KMC  
FOTO A2



# KMC FOTO A2



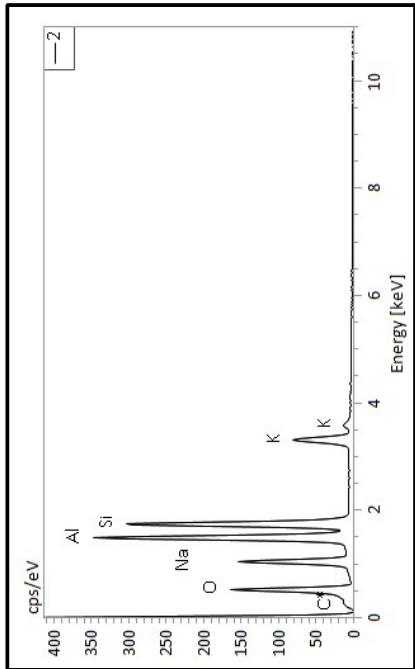
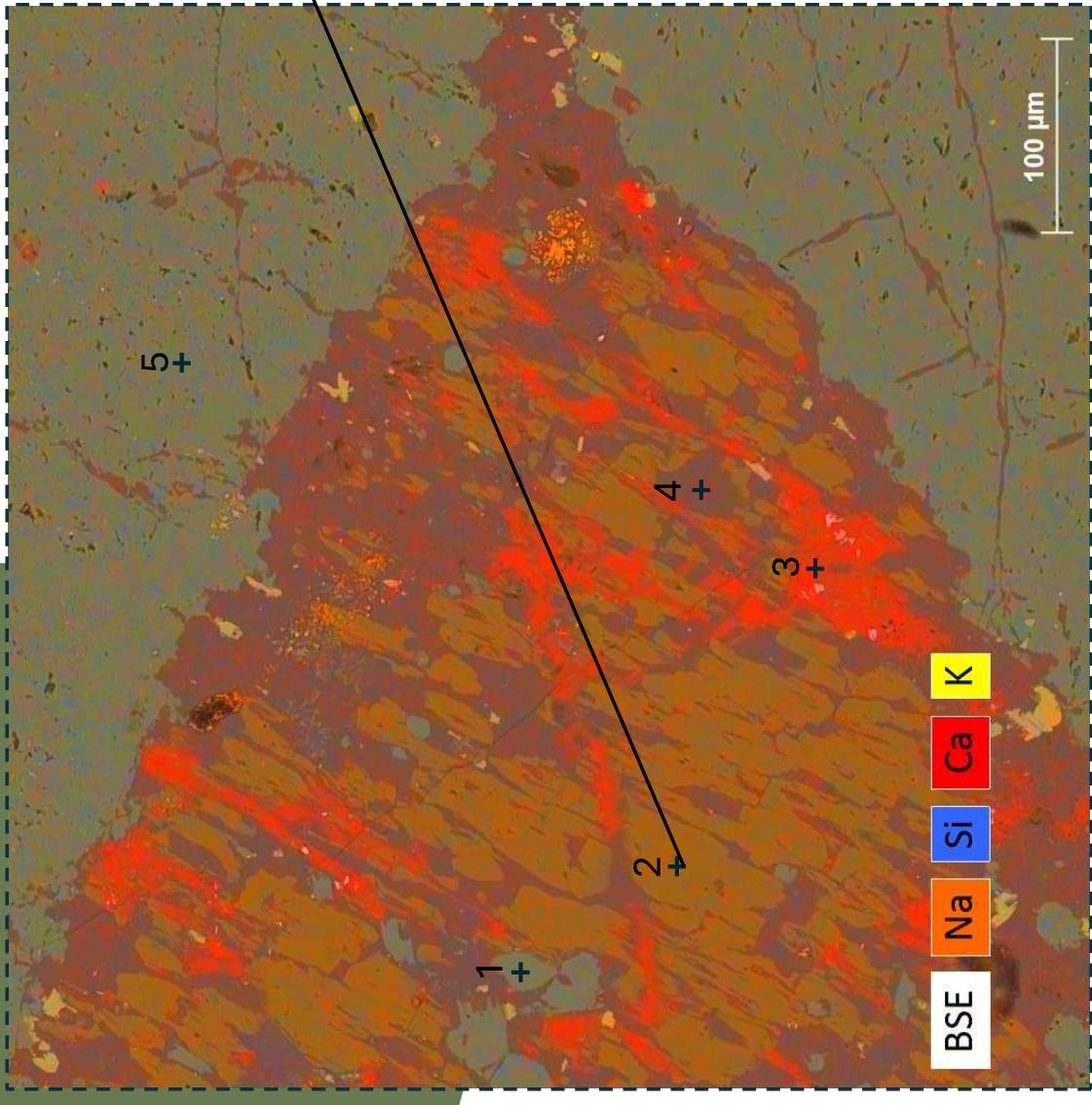
Mineral

Ortoclásio

KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

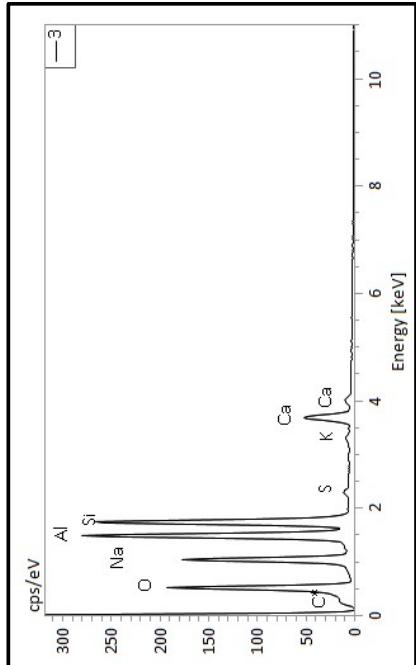
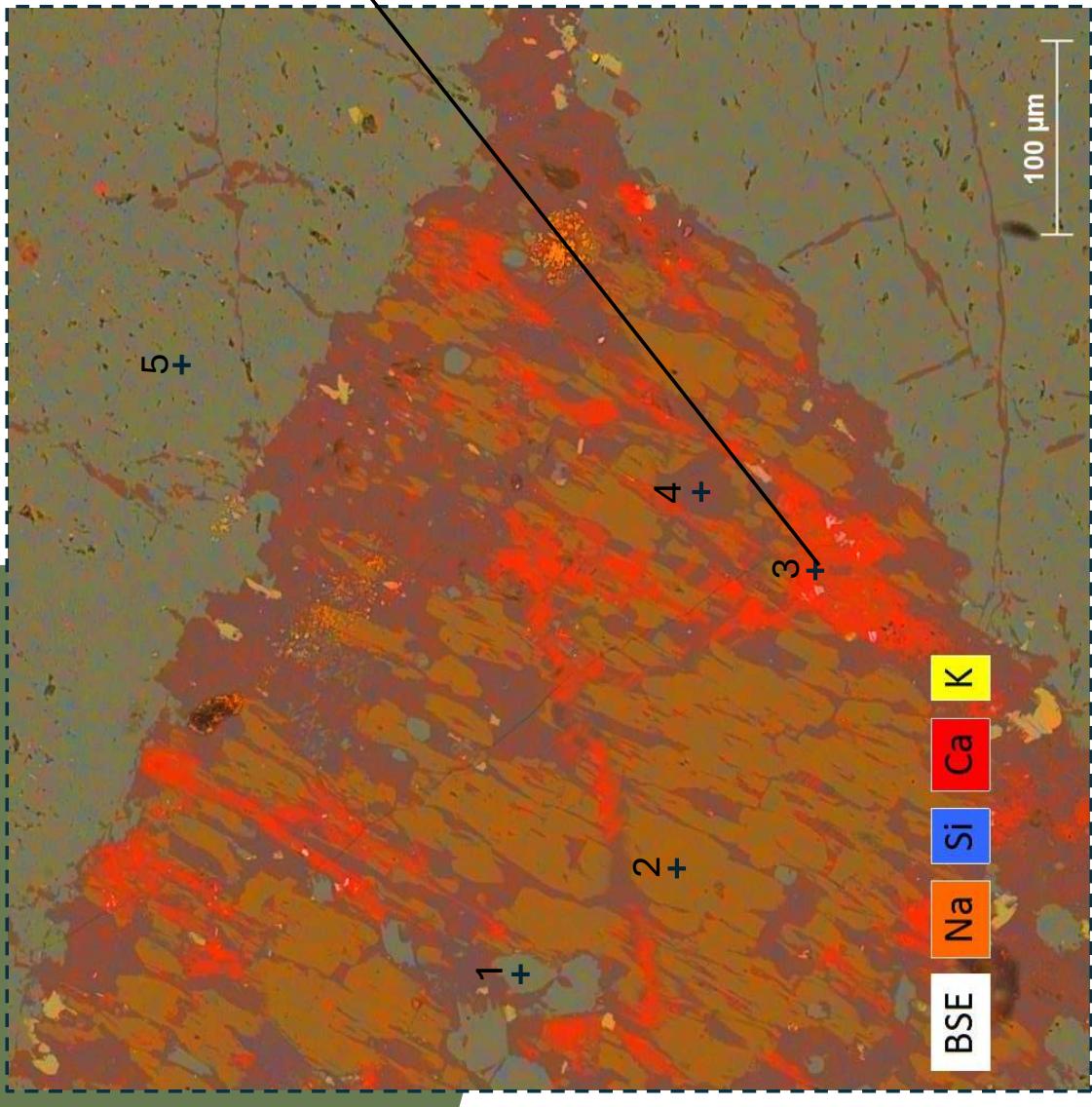
+

# KMC FOTO A2



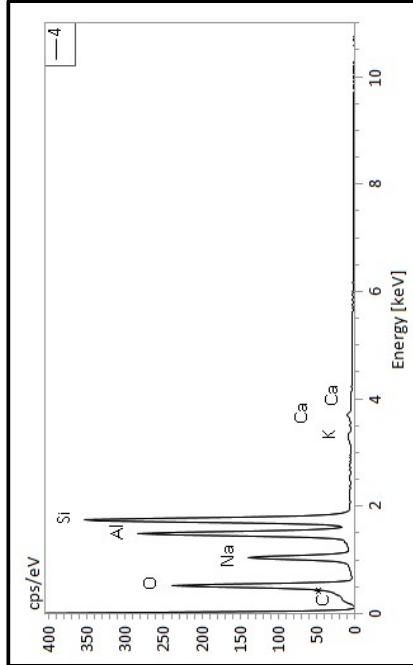
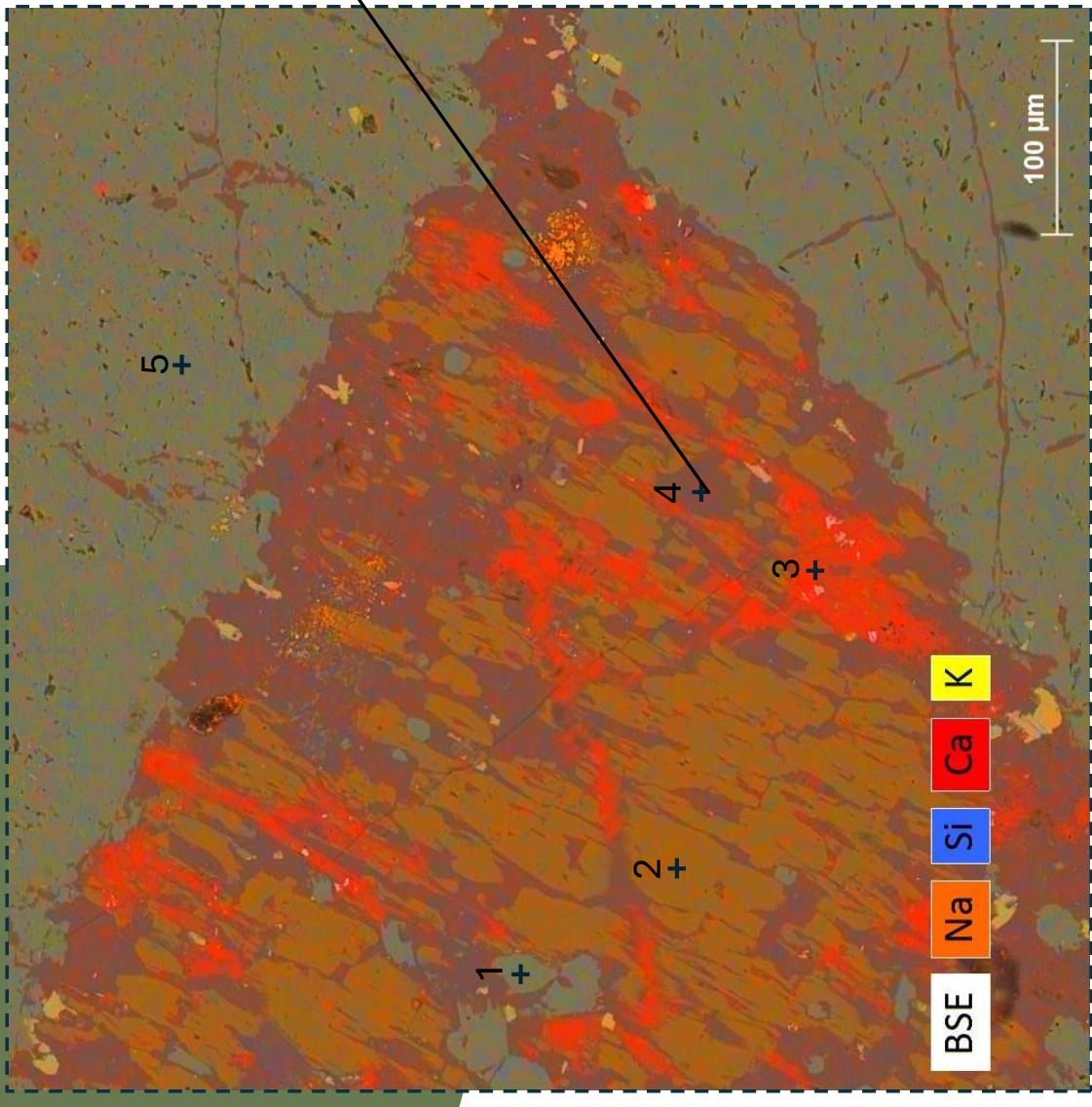
| Mineral  | Fórmula  |
|----------|--|
| Nefelina | Na <sub>3</sub> KAl <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>16</sub> |

# KMC FOTO A2



| Mineral    | Fórmula  |
|------------|--|
| Cancrinita | $\text{Na}_6\text{Ca}_2[(\text{CO}_3)_2 \text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |

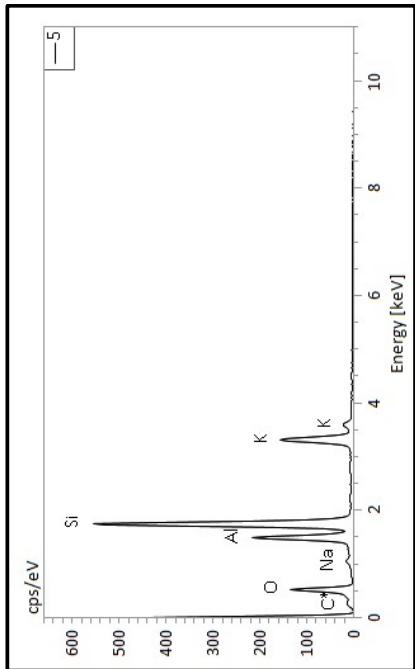
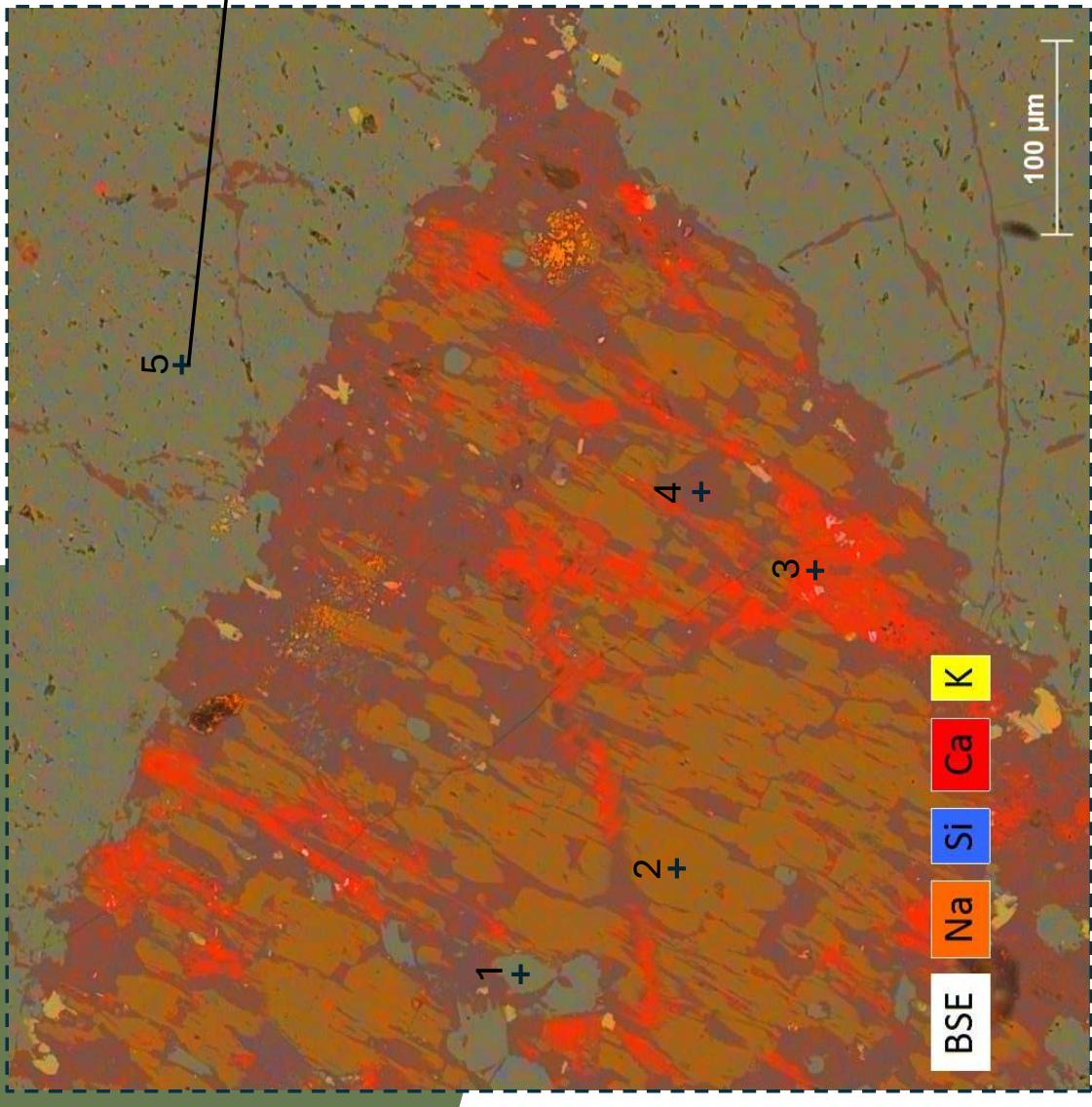
## KMC FOTO A2



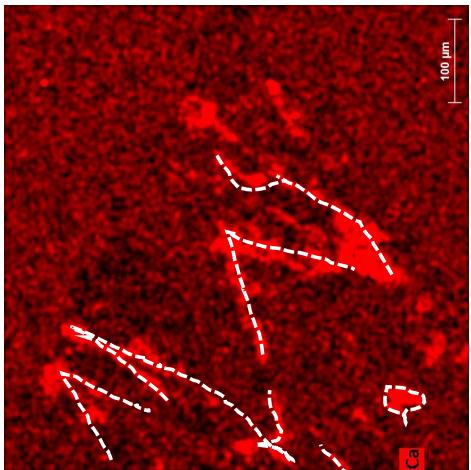
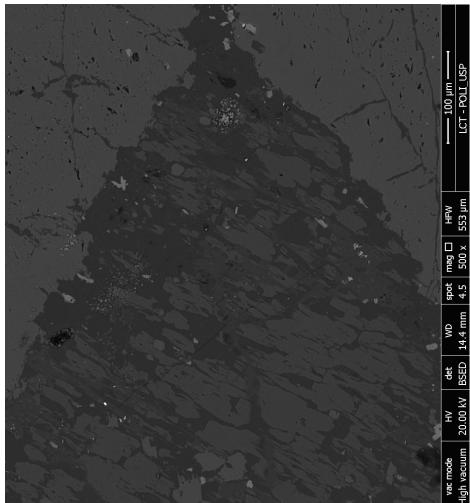
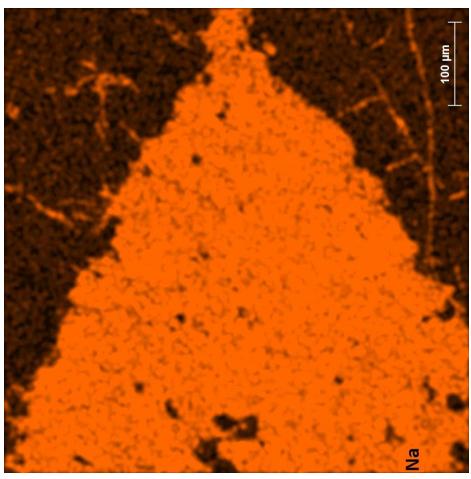
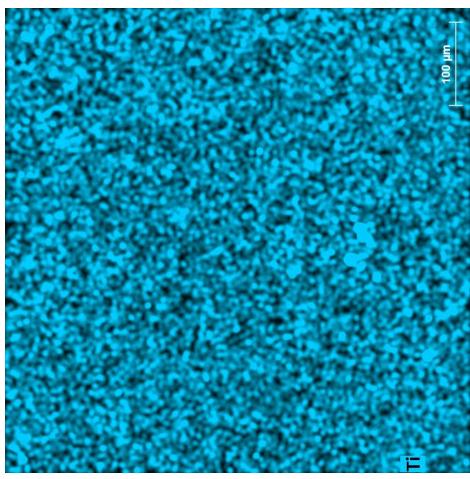
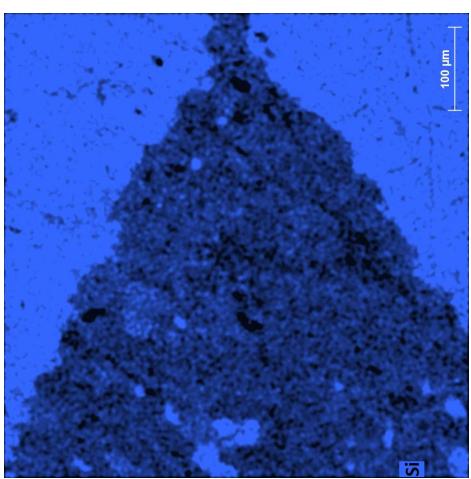
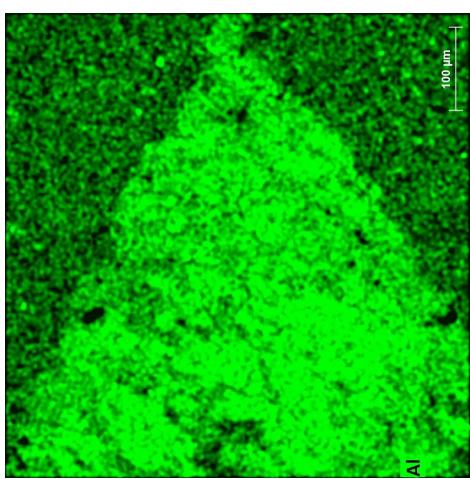
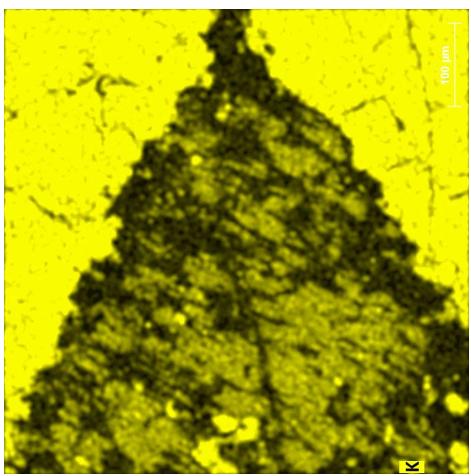
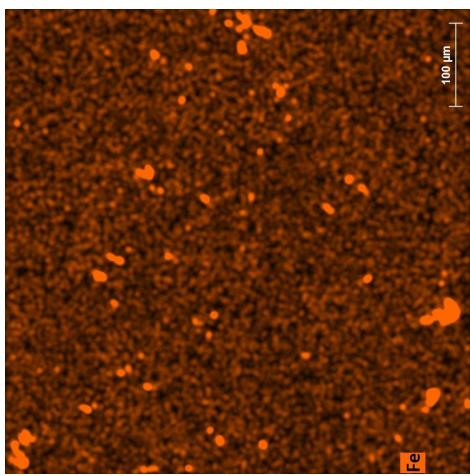
| Mineral  | Fórmula  |
|----------|--|
| Analcima | $\text{Na}_3\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$<br>→<br>$\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$ |

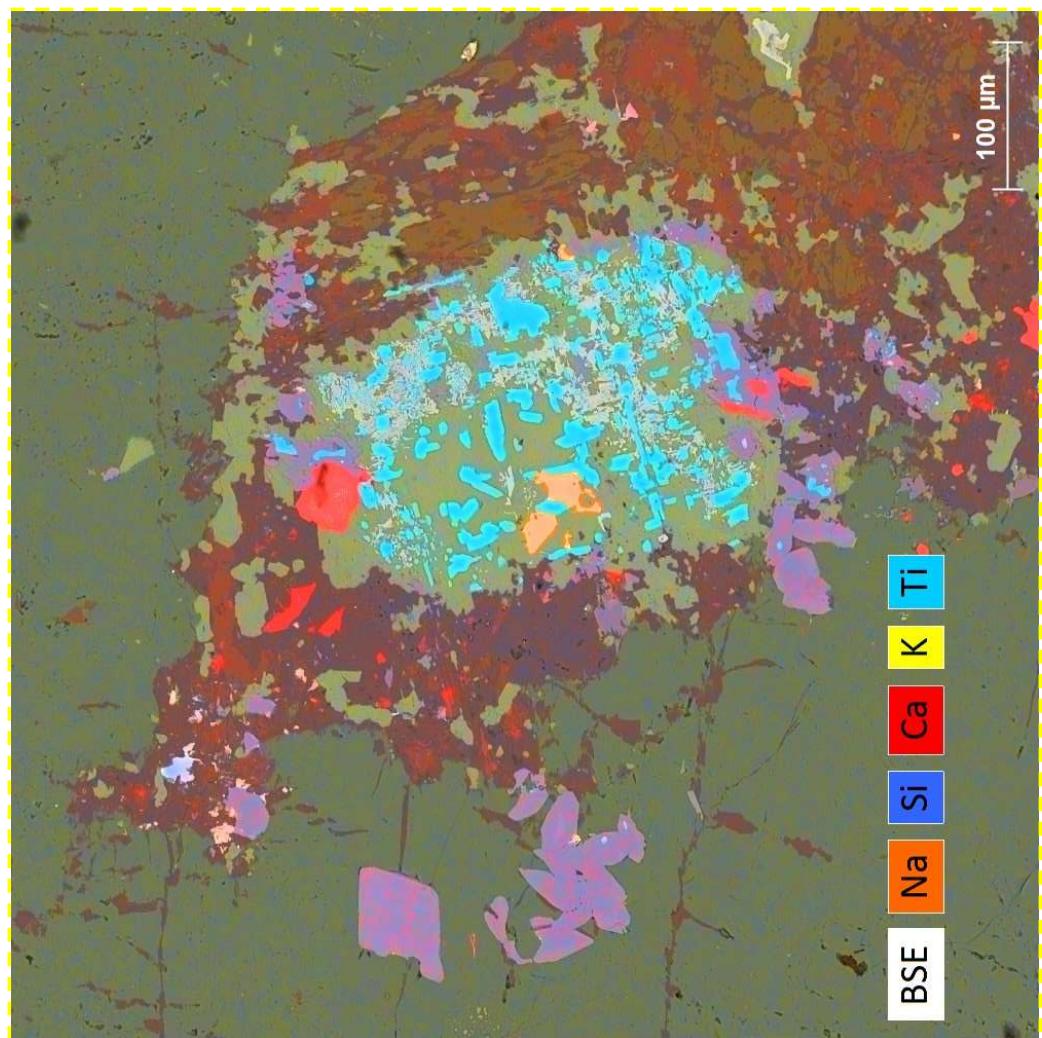
Notar empobrecimento de K, o que torna ela menos amarelo.  
Notar ruído de Ca, e intensidade do pico de O maior que a Nefelina.

# KMC FOTO A2

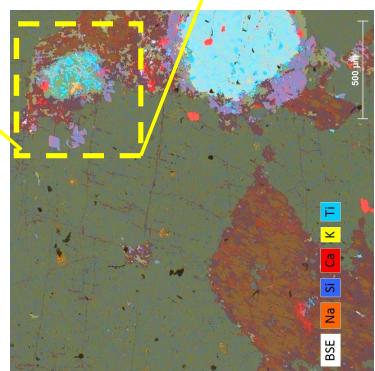


**Mineral**  
Fórmula  
Ortoclásio  
KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

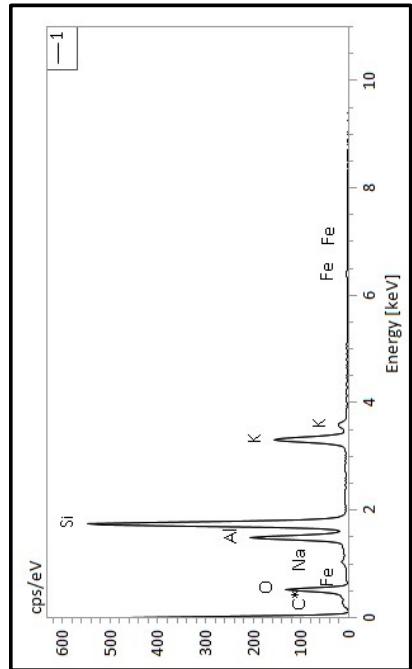
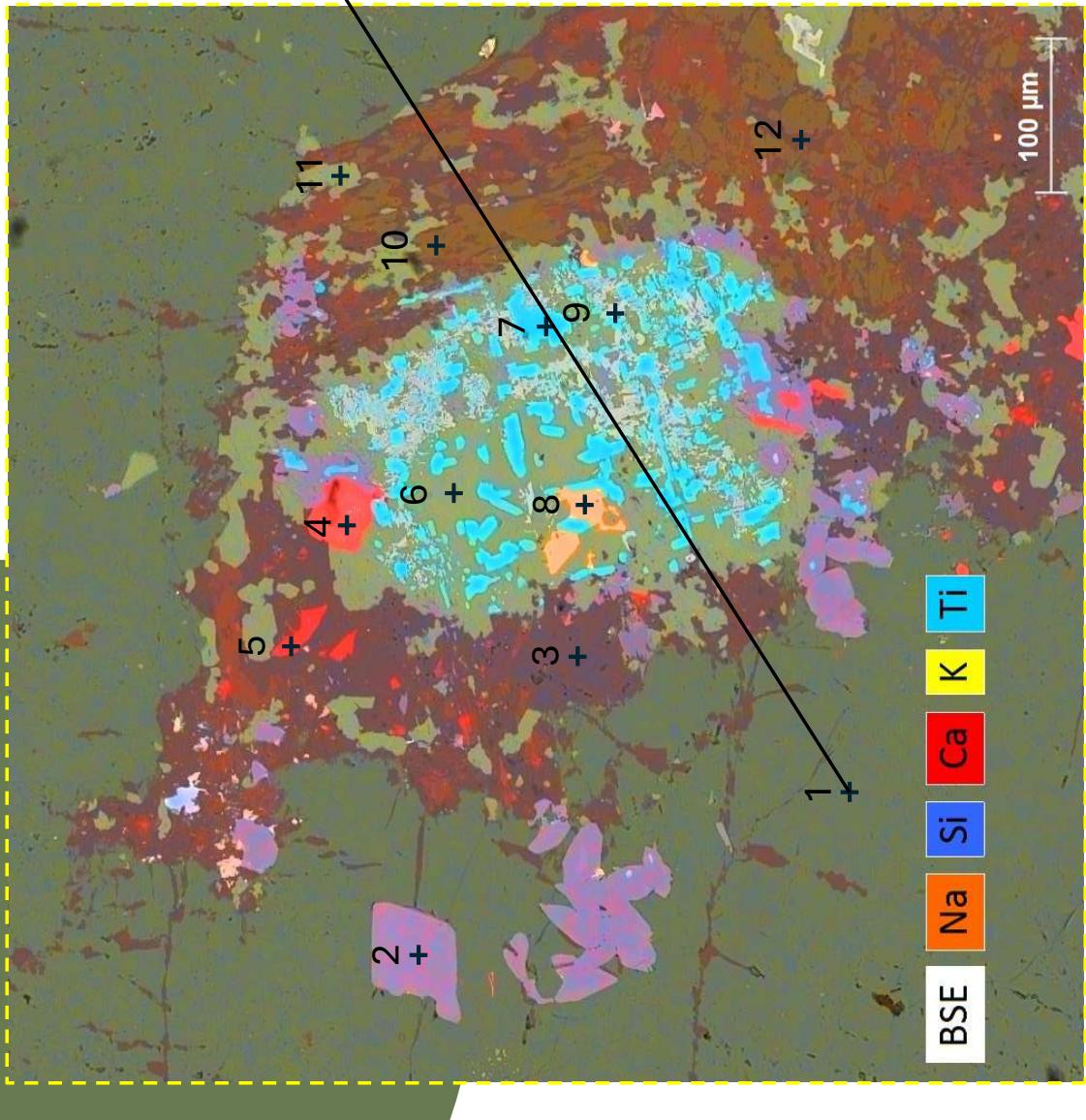




KMC  
FOTO A3



# KMC FOTO A3

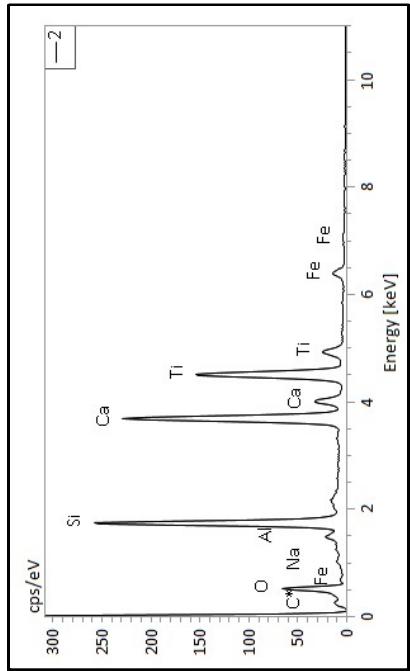
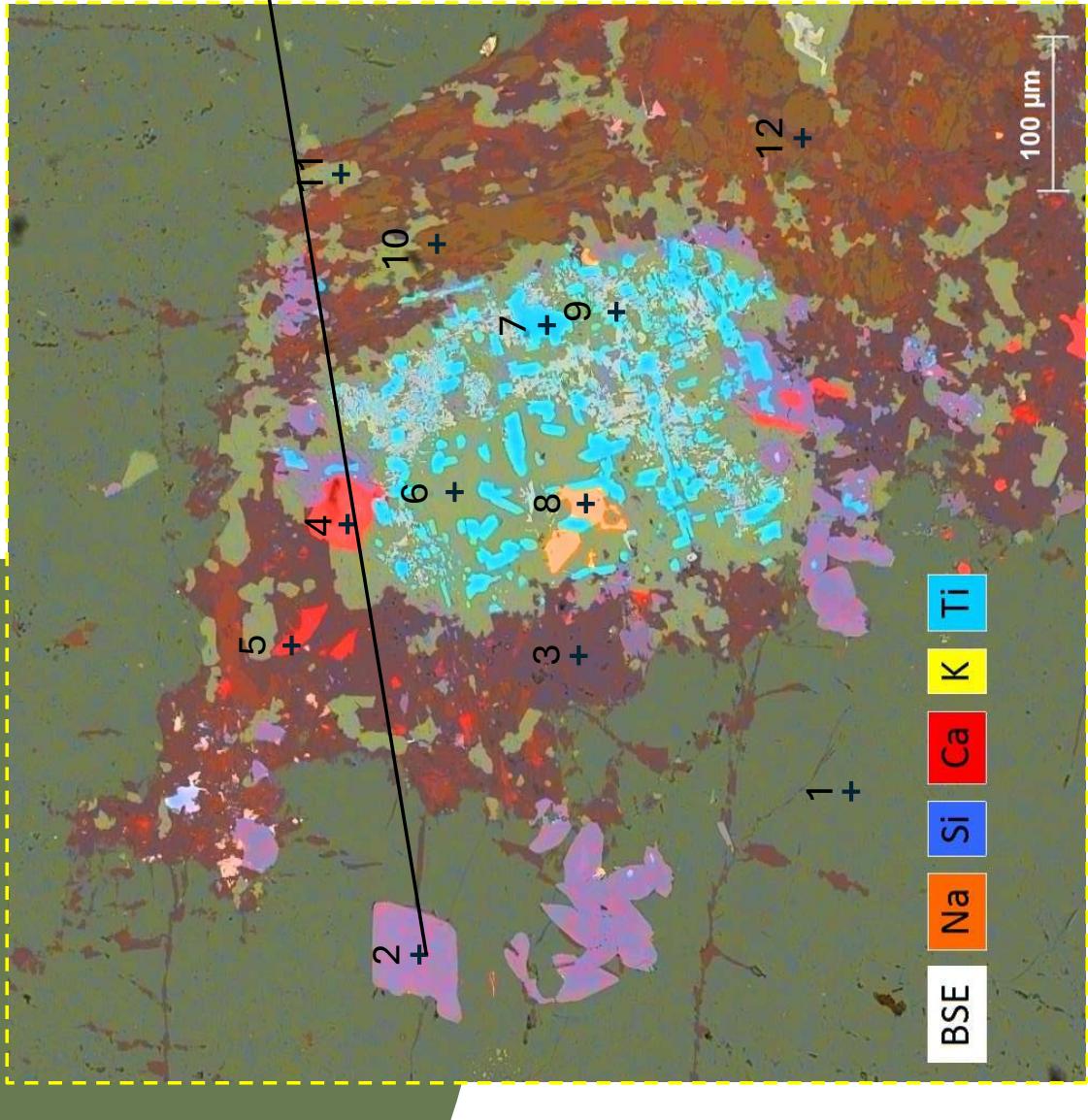


Mineral

Ortoclásio

KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

# KMC FOTO A3



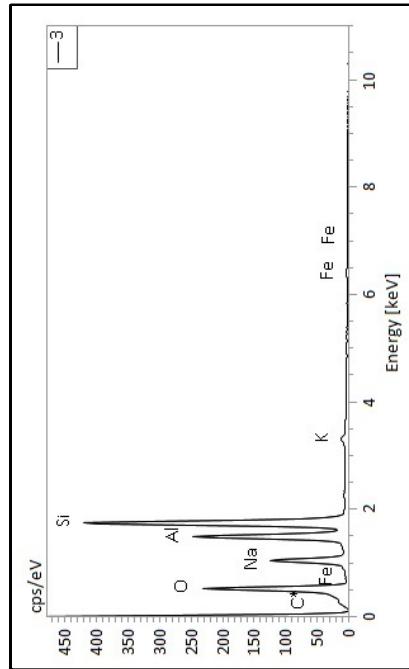
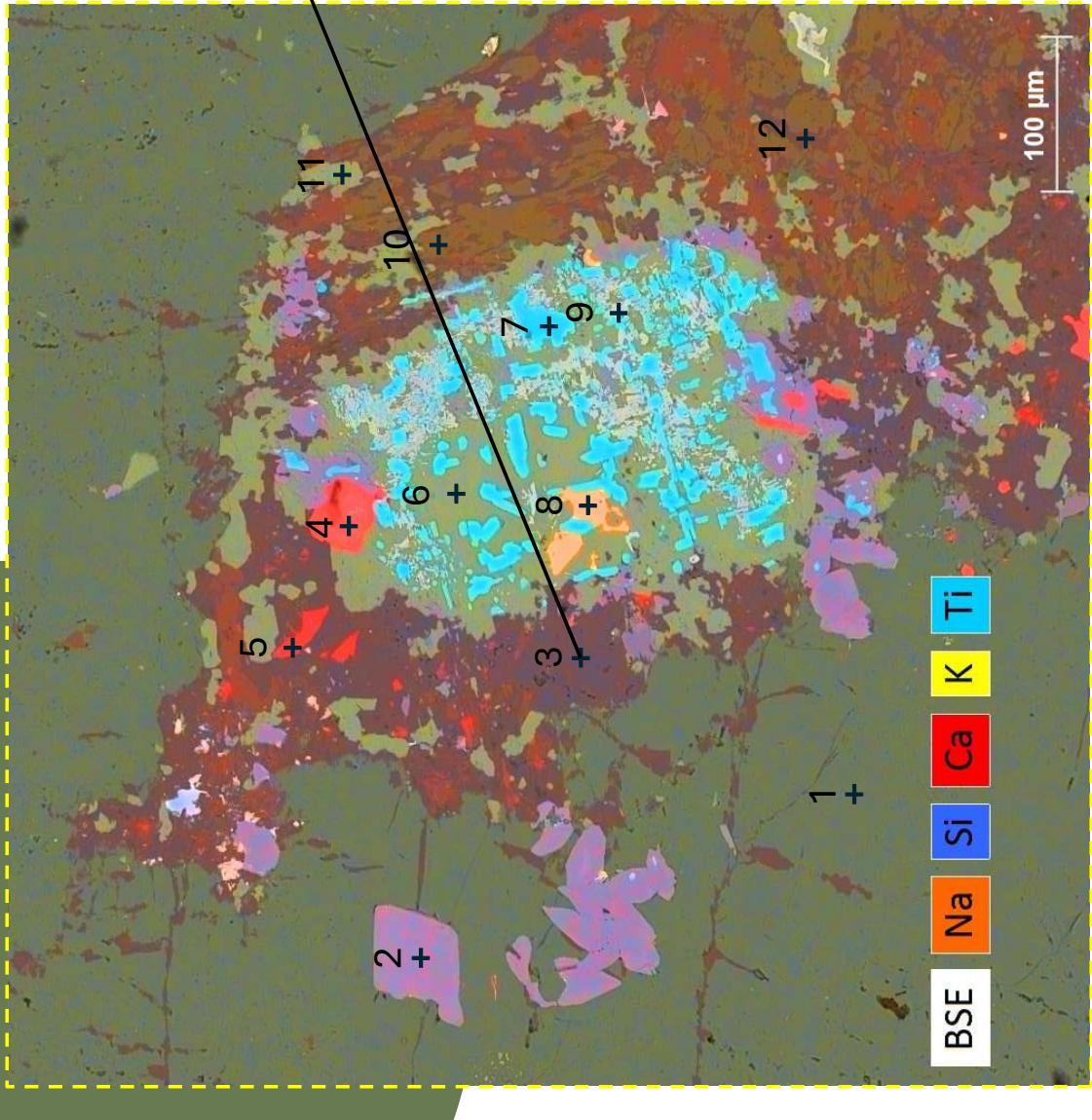
Mineral

Fórmula

$\text{CaTiSiO}_5$

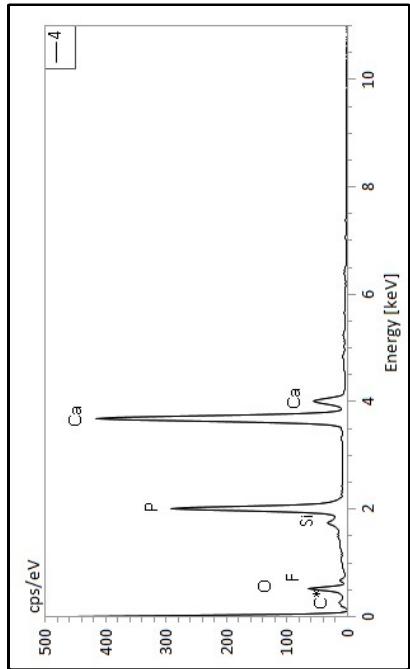
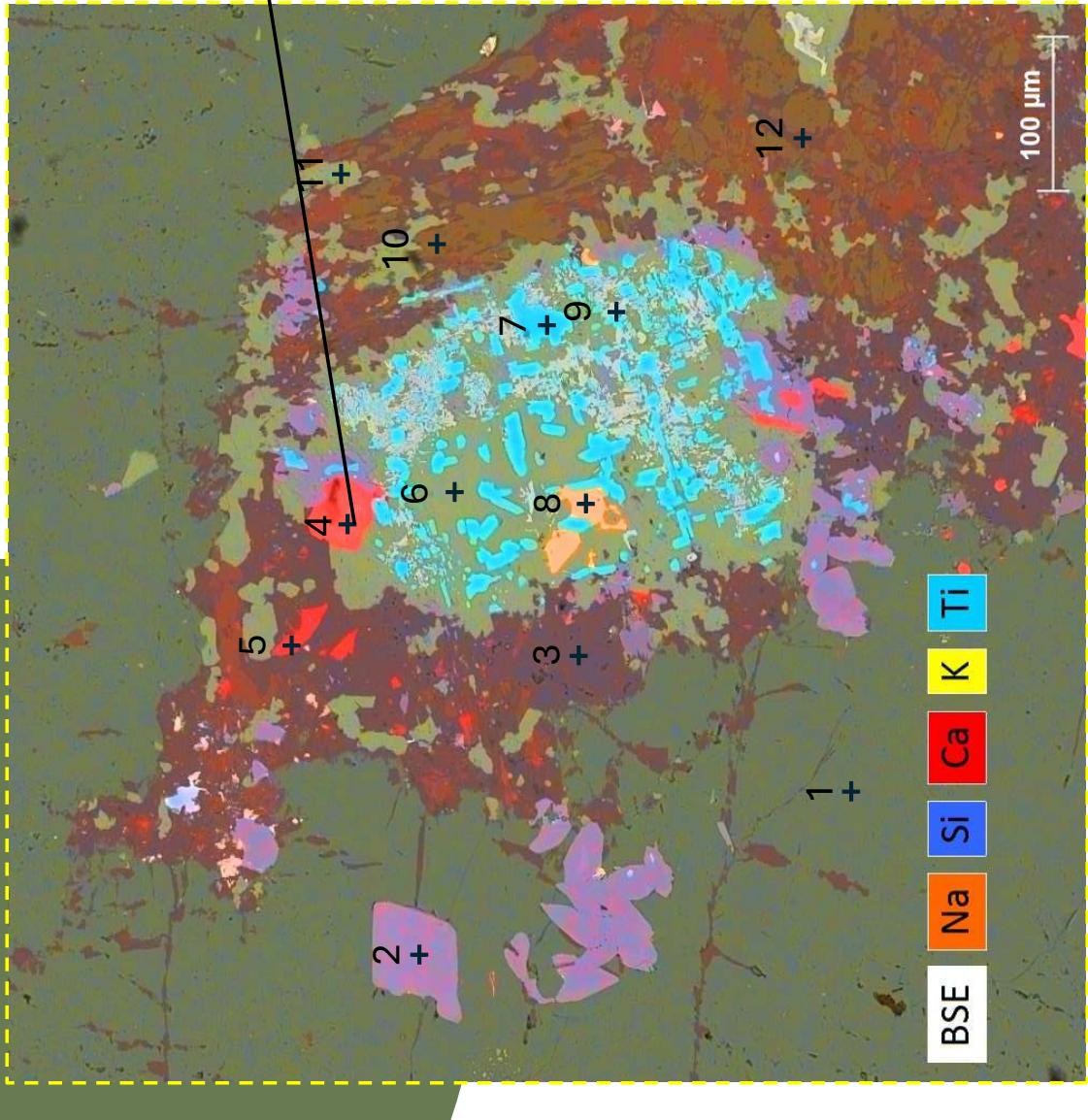
Titanita

# KMC FOTO A3



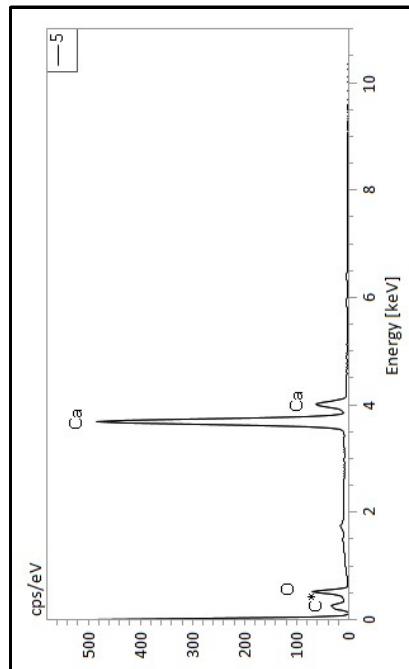
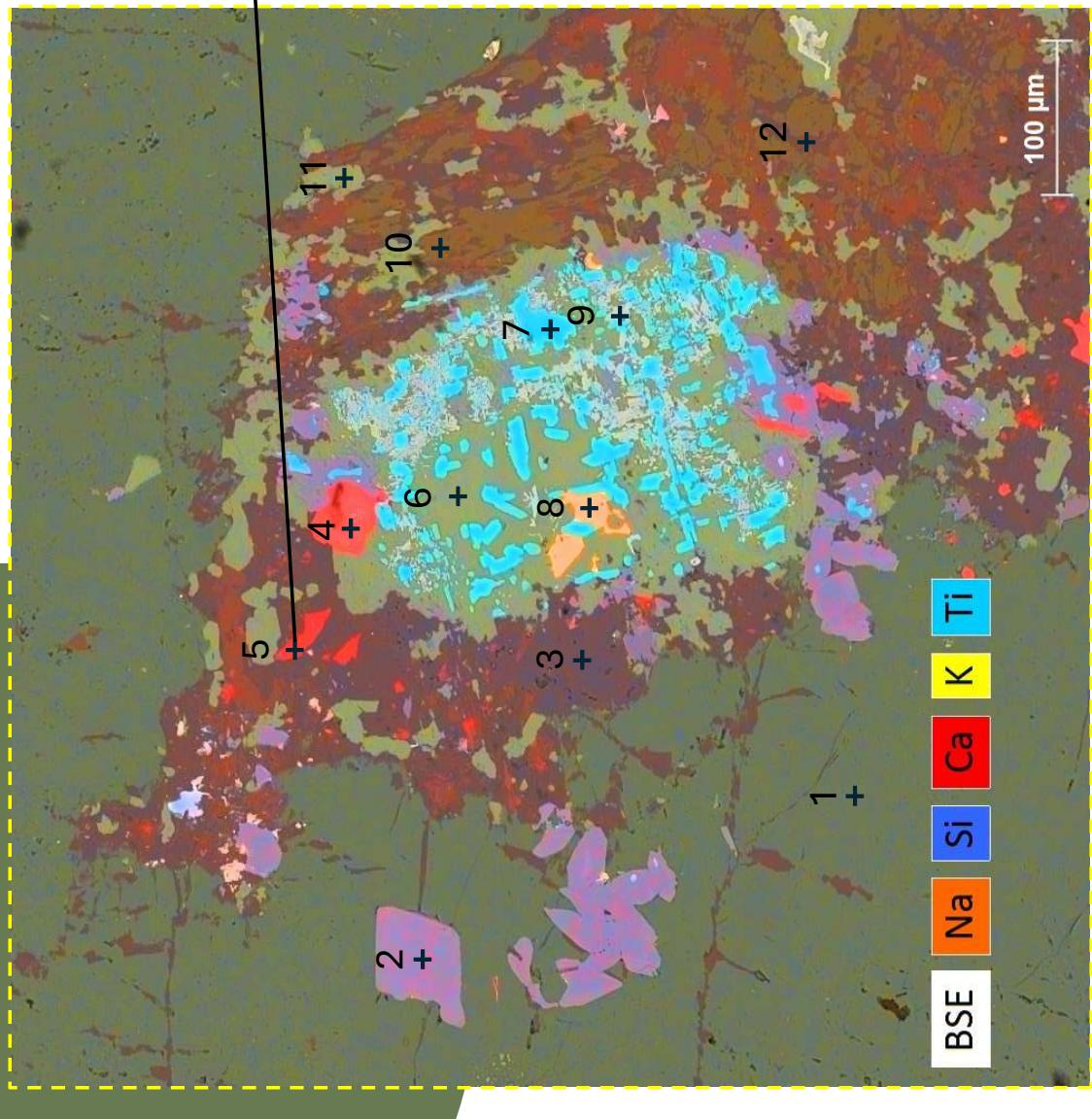
| Mineral  | Fórmula   |
|----------|---|
| Analcima | $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$ |

# KMC FOTO A3



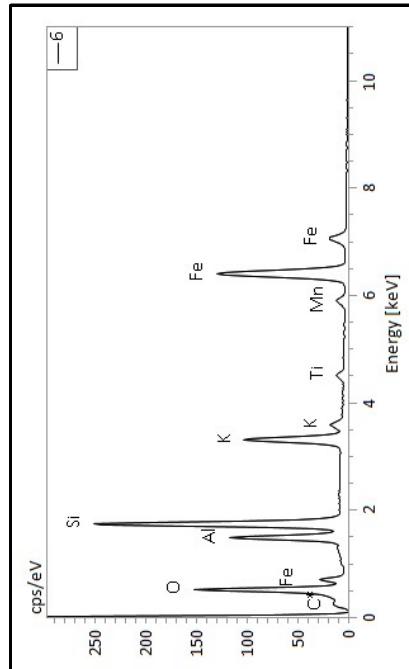
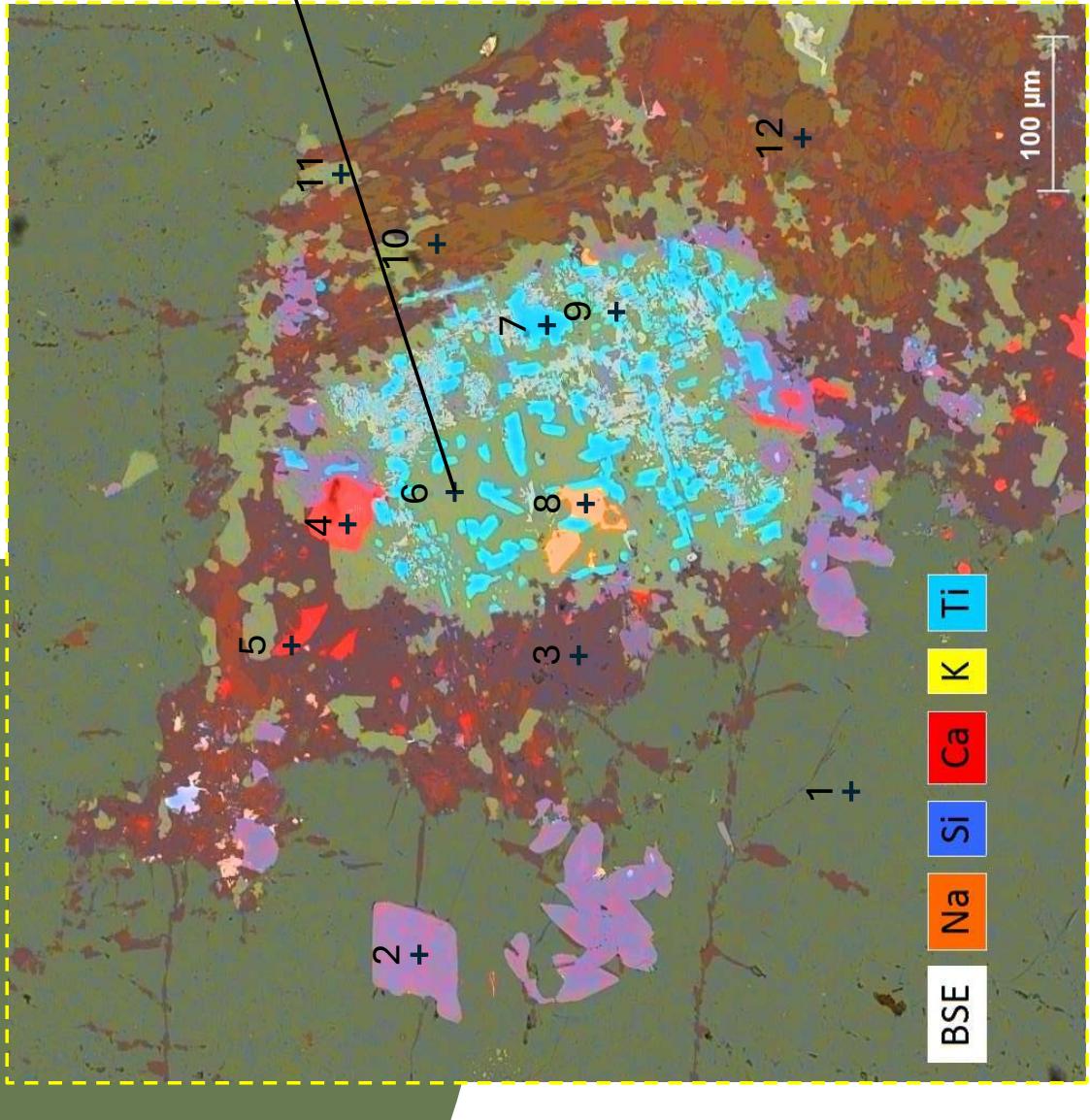
| Mineral | Fórmula  |
|---------|--|
| Apatita | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ |

# KMC FOTO A3



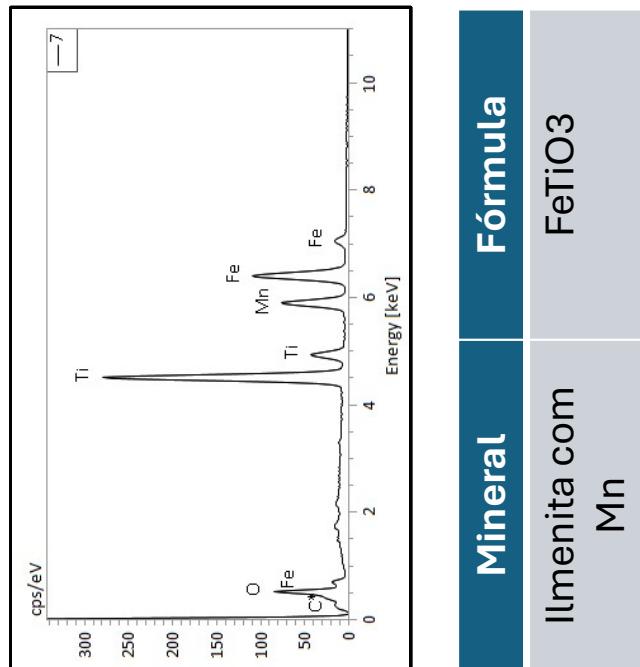
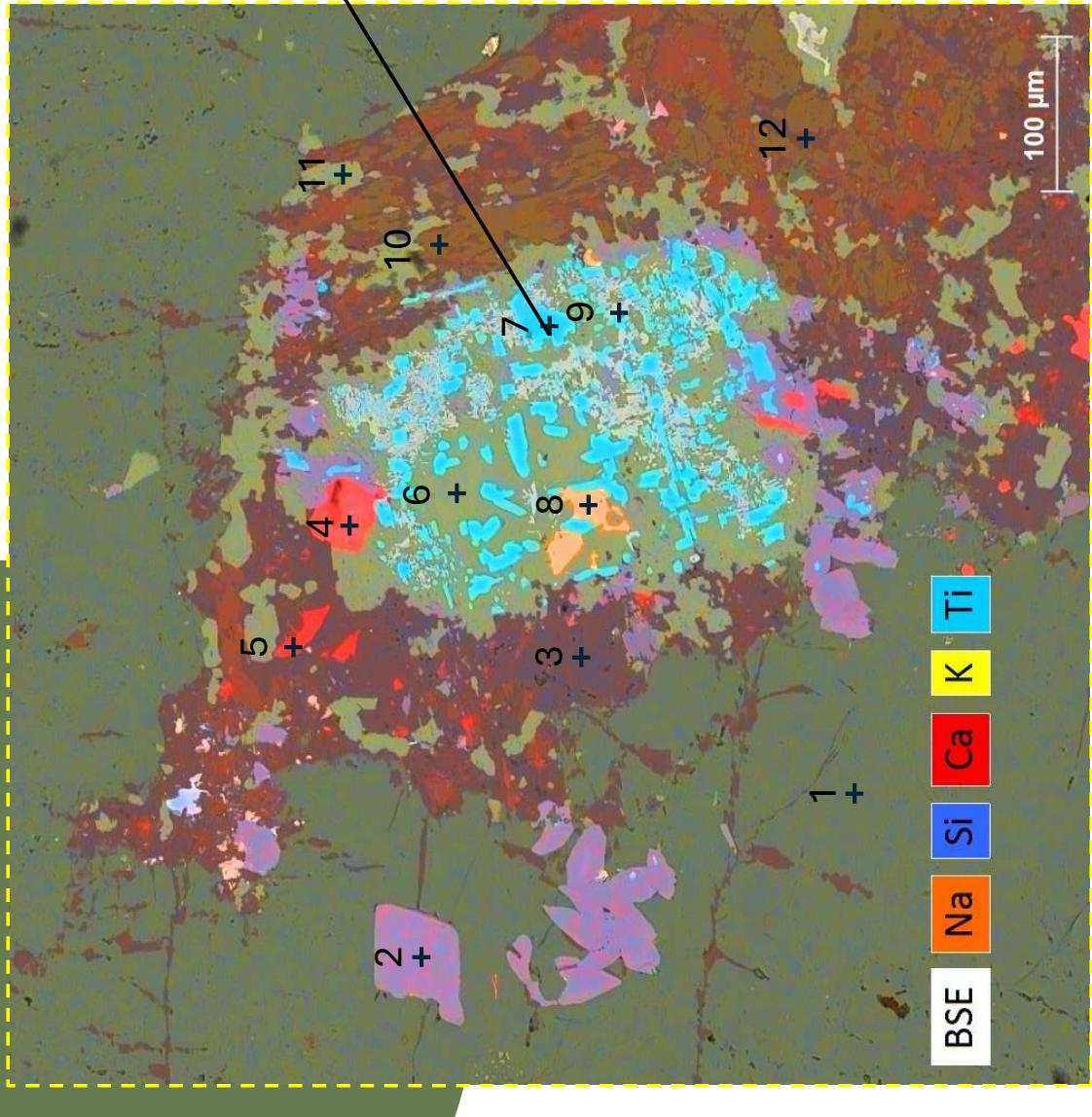
| Mineral | Fórmula         |
|---------|-----------------|
| Calcita | $\text{CaCO}_3$ |

# KMC FOTO A3

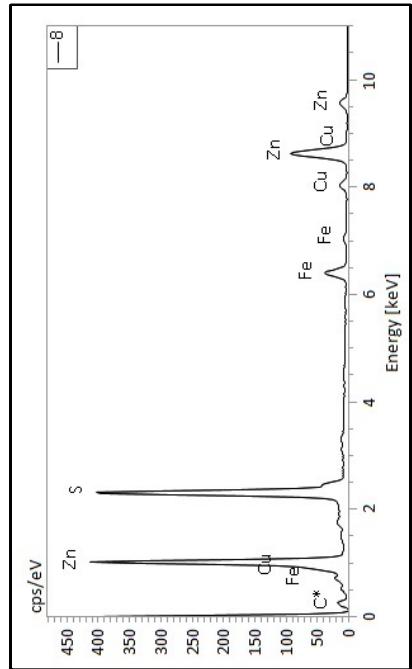
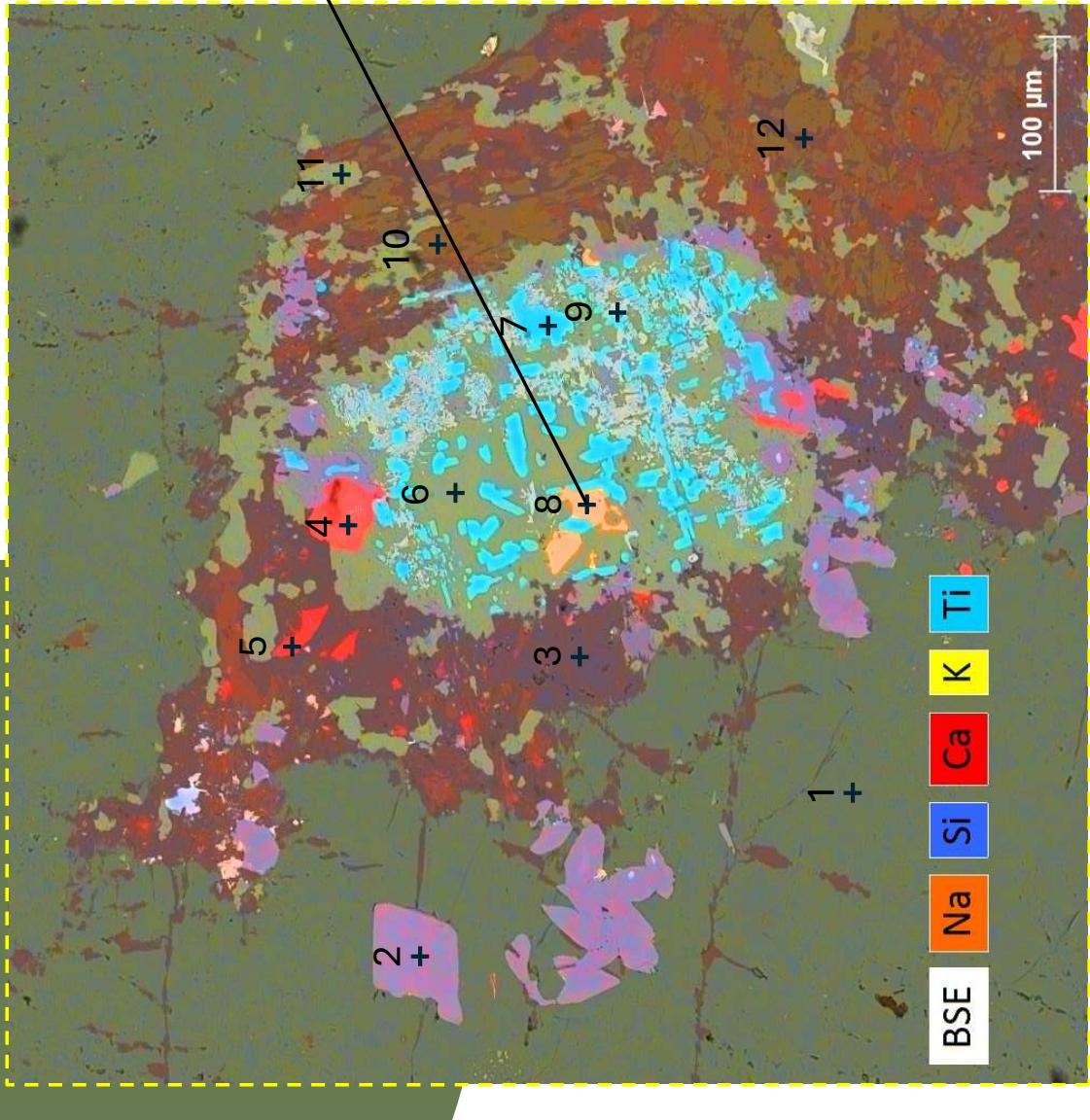


| Mineral | Fórmula                          |
|---------|----------------------------------|
| Biotita | $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_10)(F,OH)_2$ |

# KMC FOTO A3

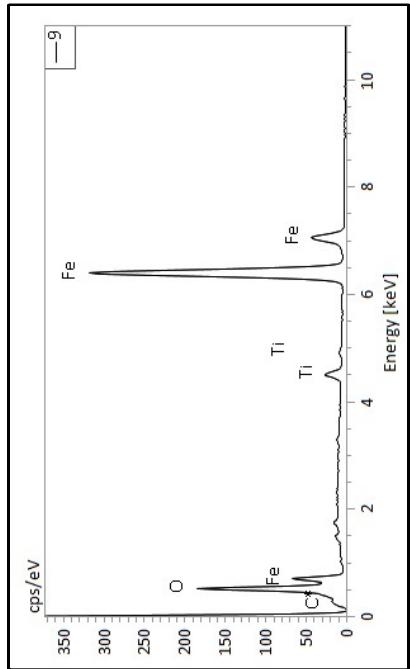
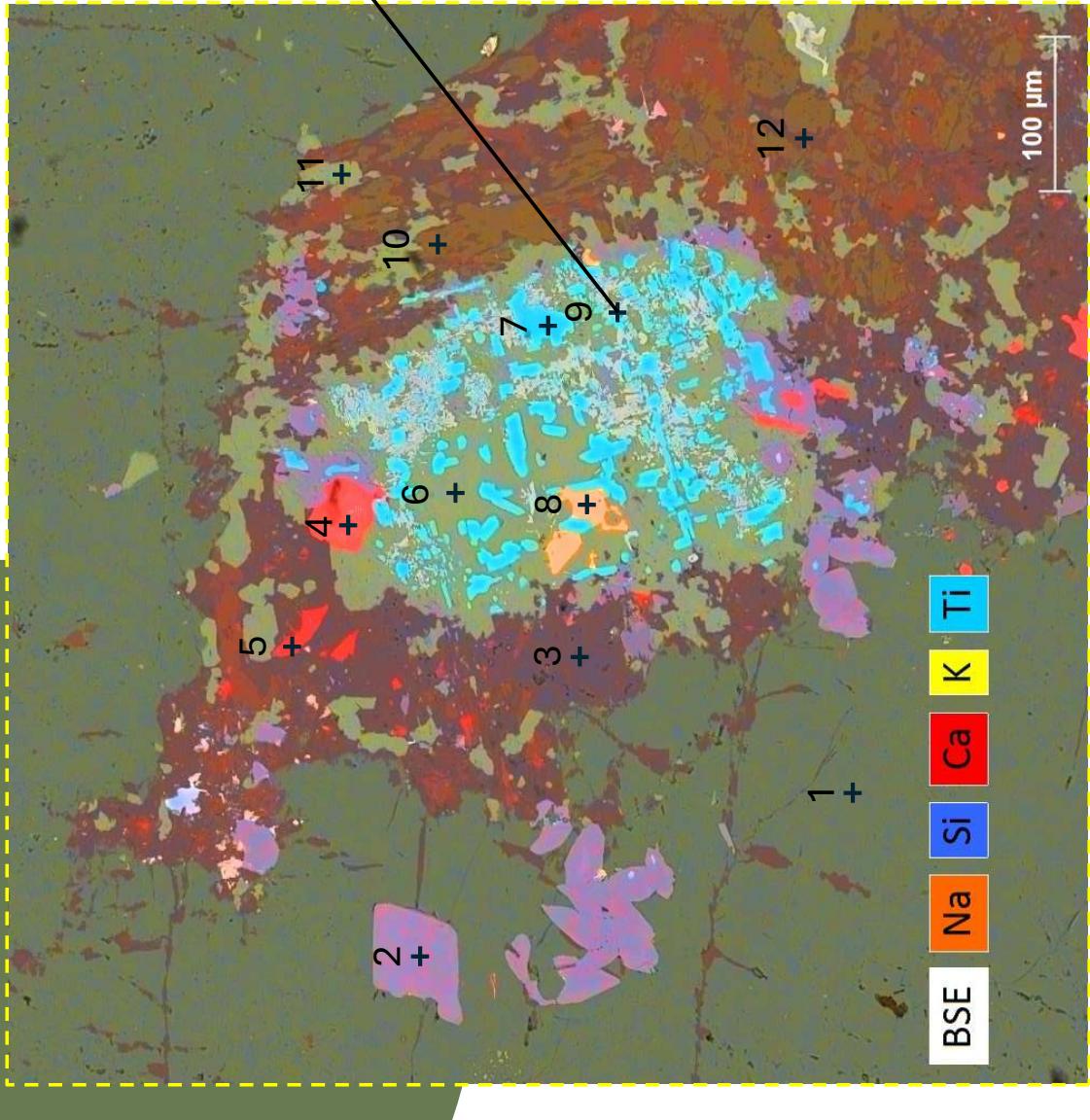


# KMC FOTO A3

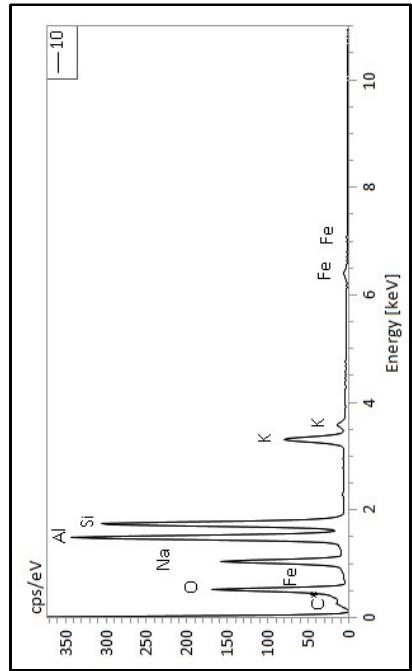
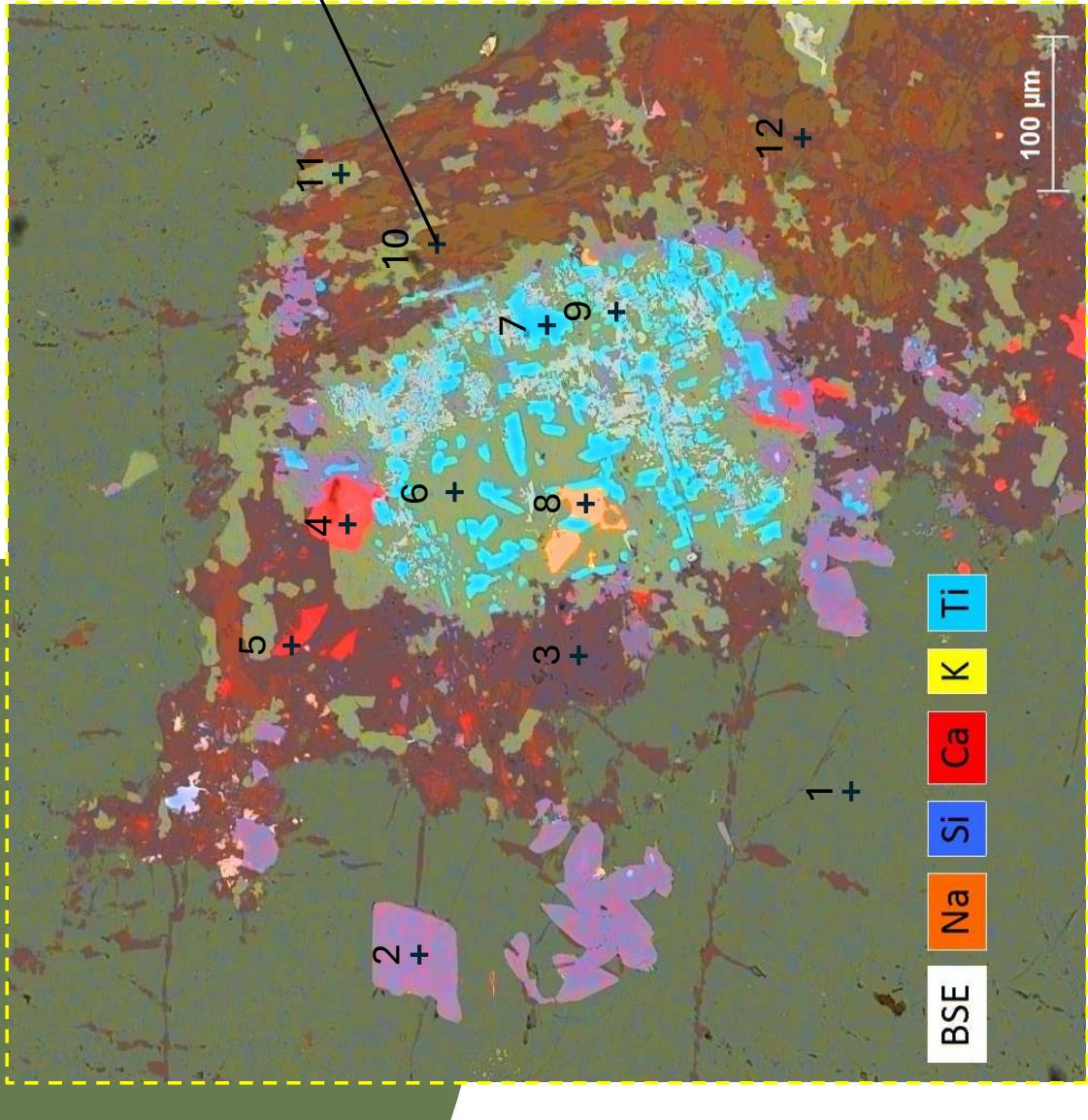


| Mineral          | Fórmula |
|------------------|---------|
| Sulfeto de Zinco | ZnS     |

# KMC FOTO A3

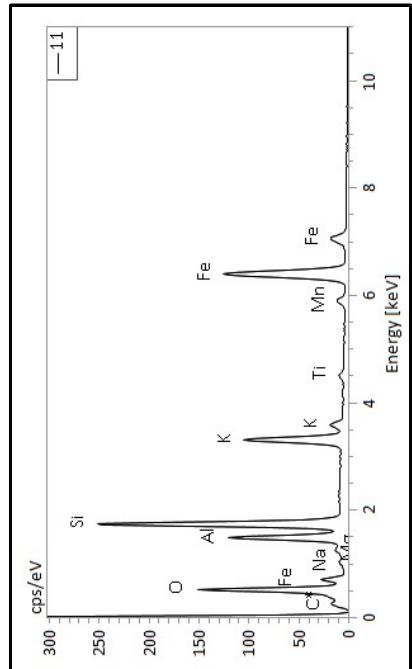
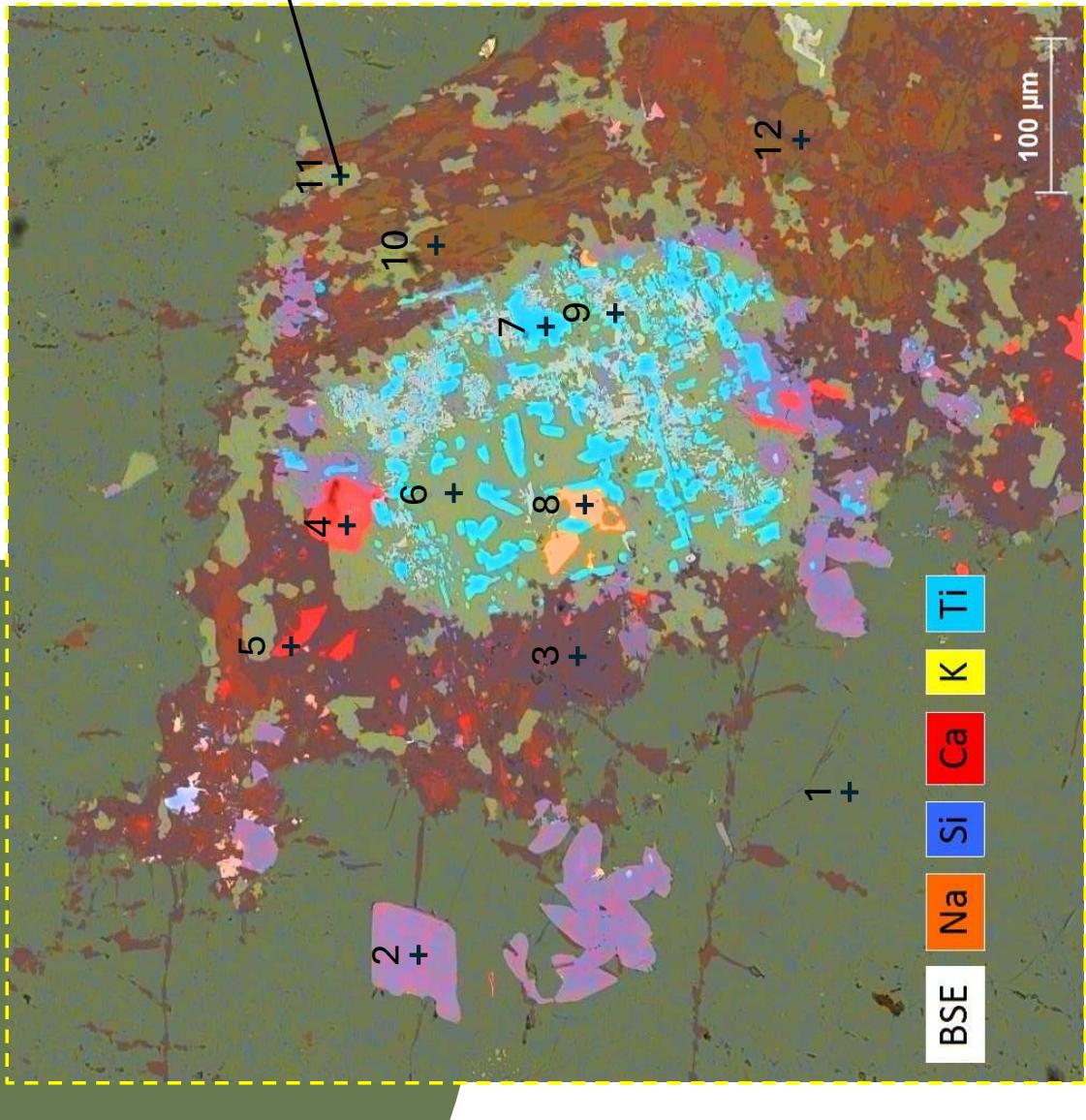


# KMC FOTO A3



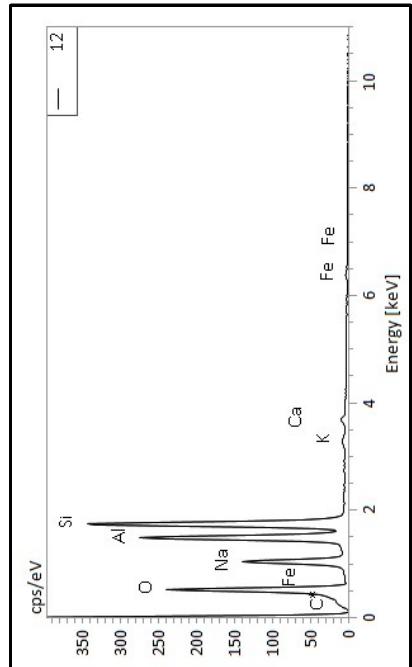
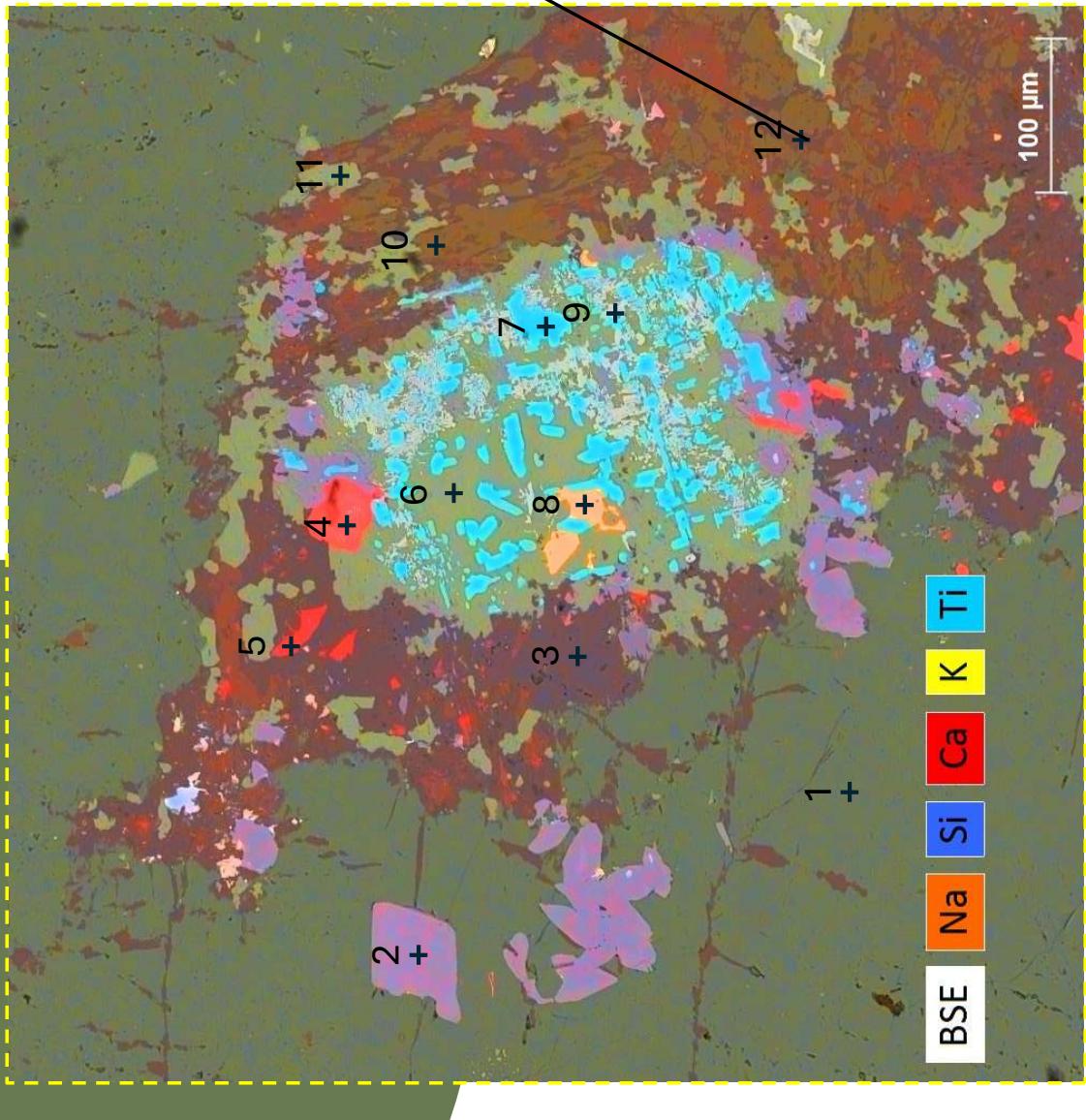
| Mineral  | Fórmula   |
|----------|---|
| Nefelina | $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_16$ |

# KMC FOTO A3

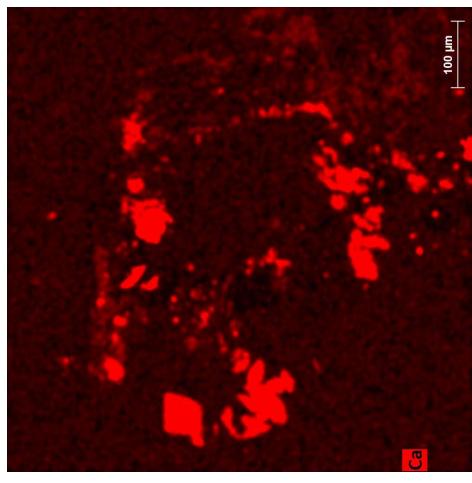
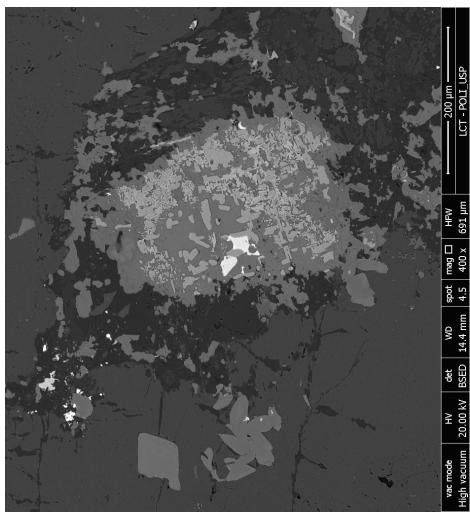
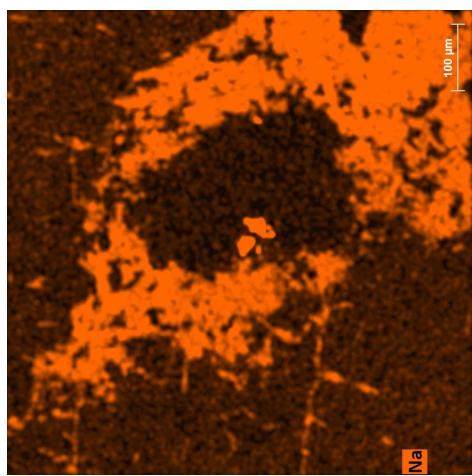
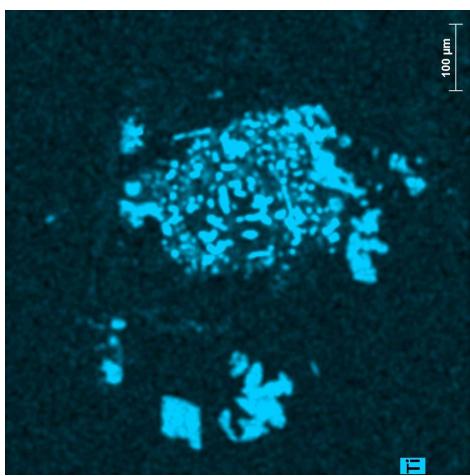
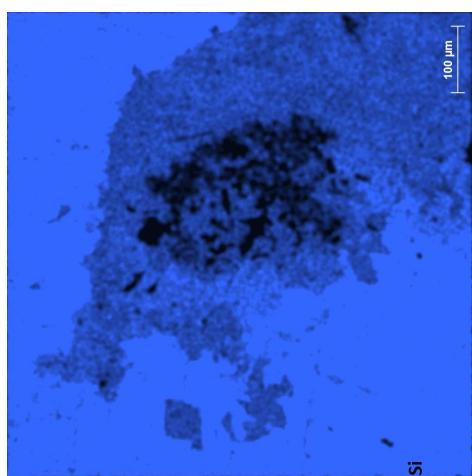
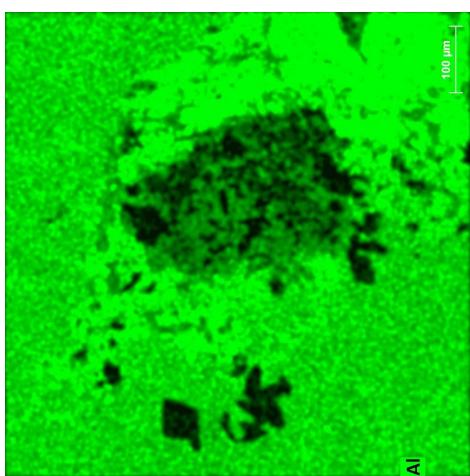
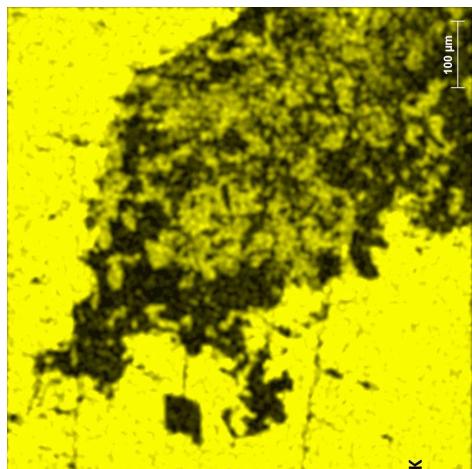
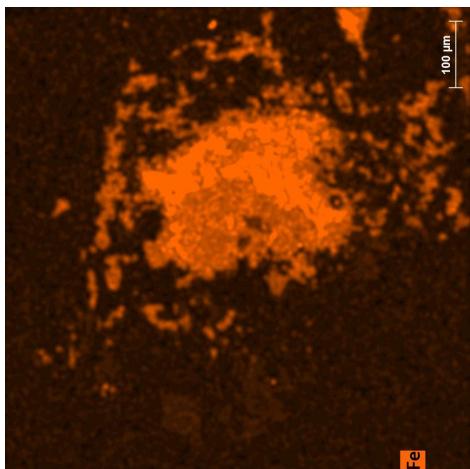


| Mineral | Fórmula                          |
|---------|----------------------------------|
| Biotita | $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_10)(F,OH)_2$ |

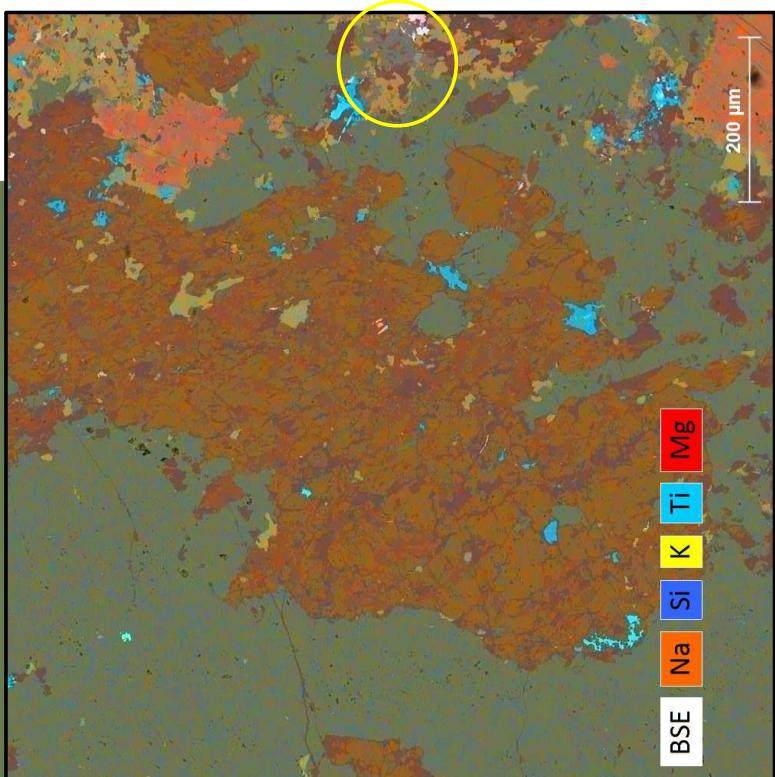
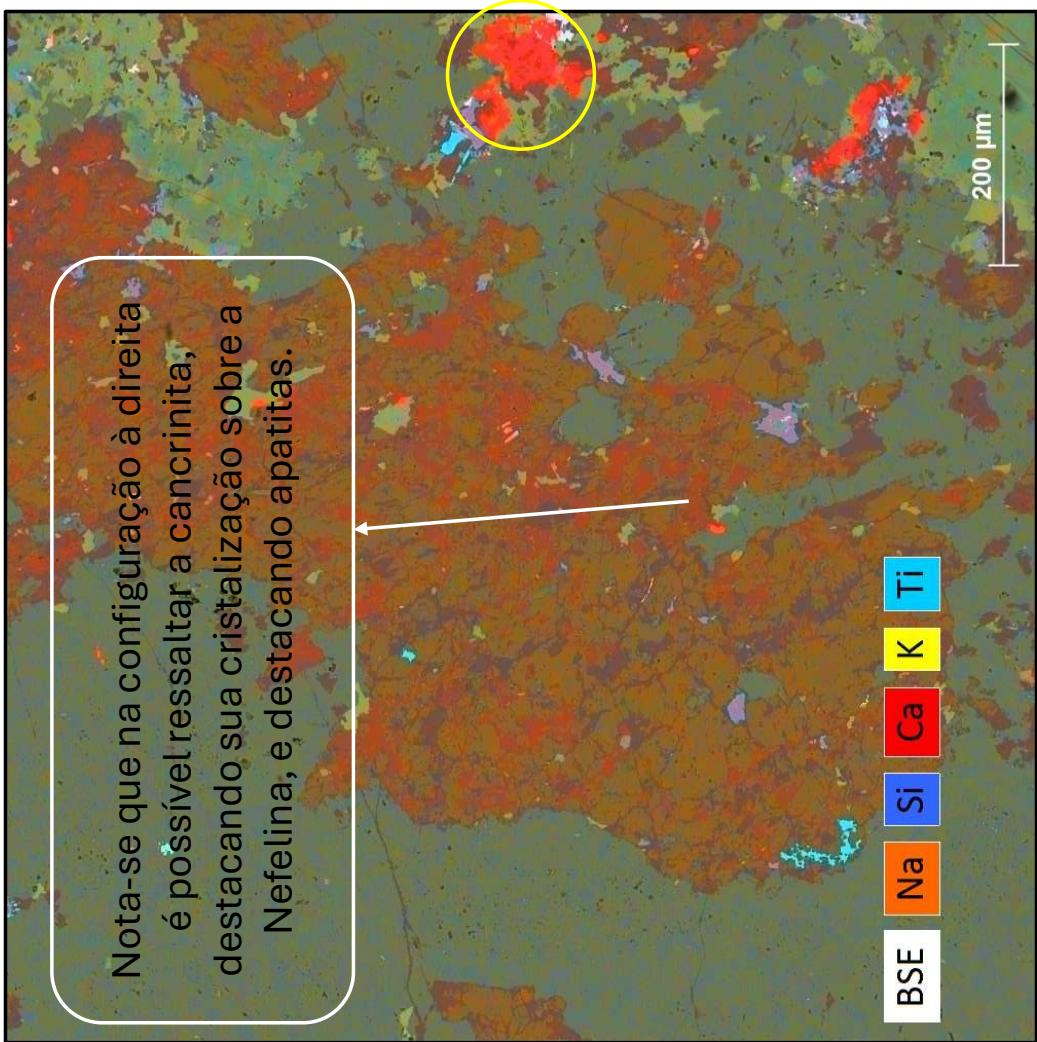
# KMC FOTO A3

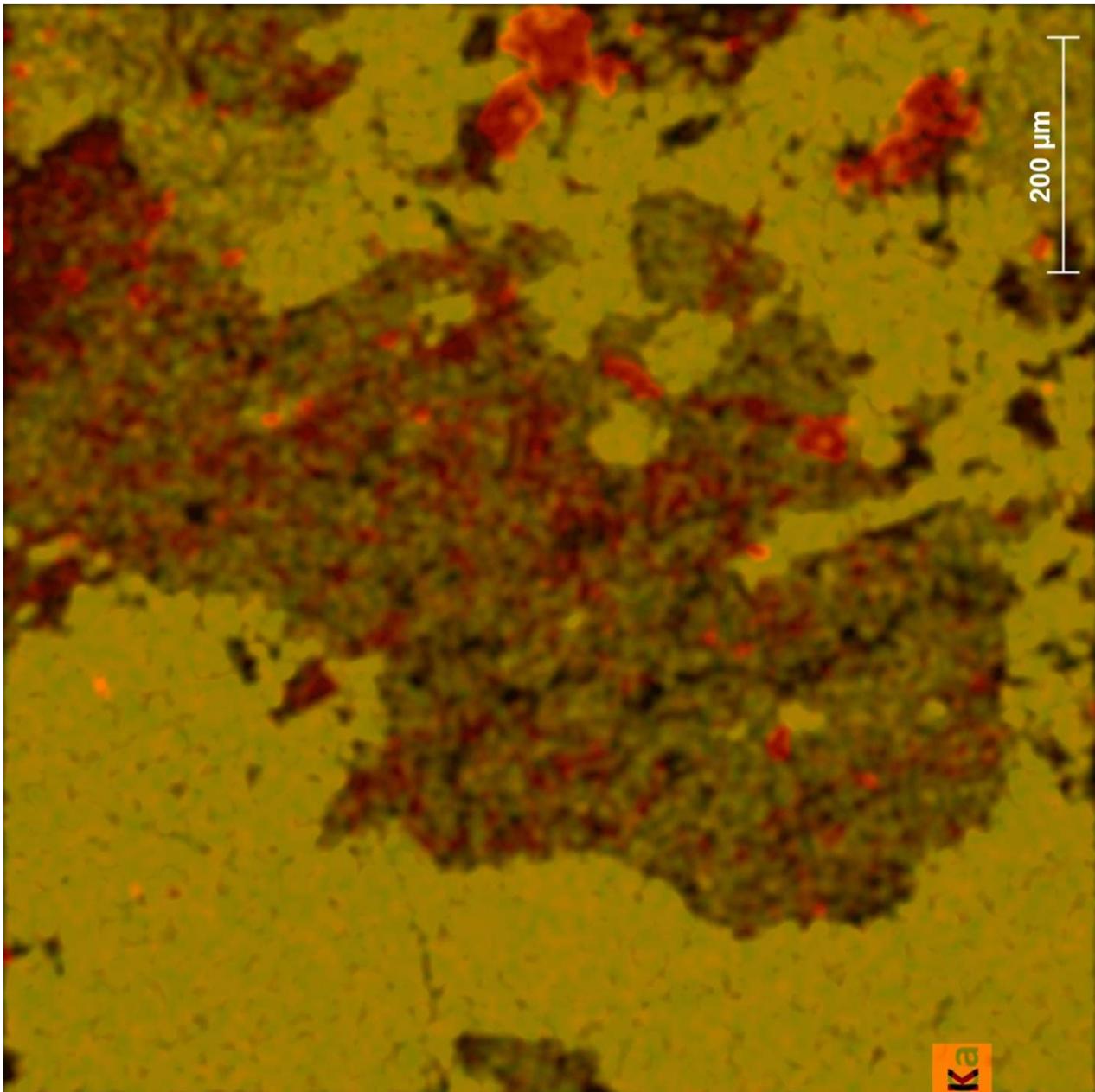


| Mineral  | Fórmula  |
|----------|--|
| Nefelina | Na <sub>3</sub> KAl <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>16</sub> |



## KMC FOTO B

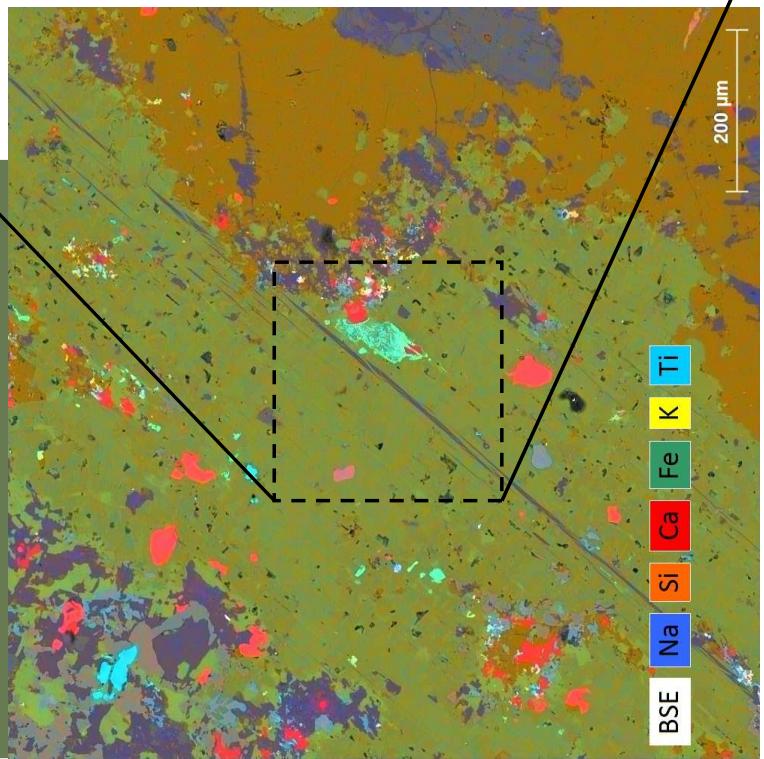
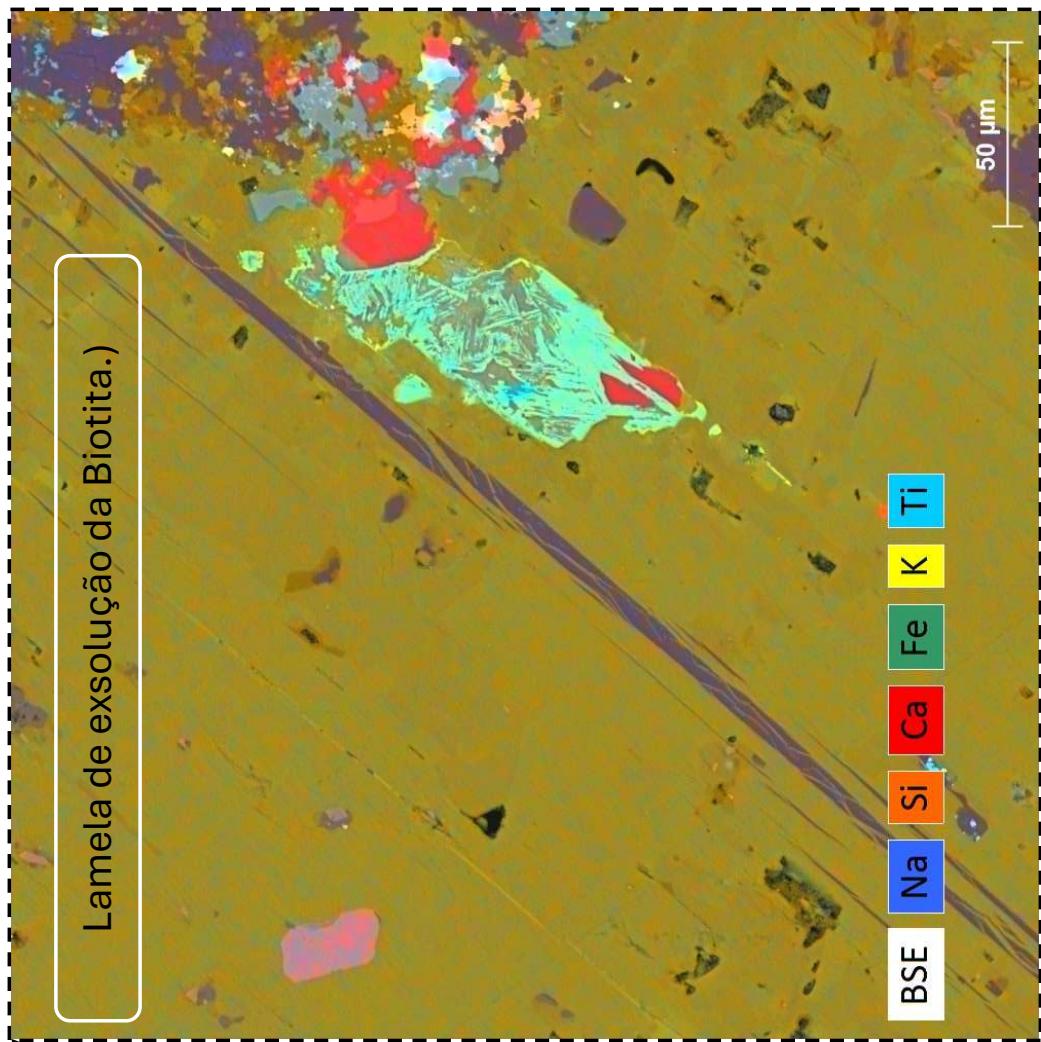


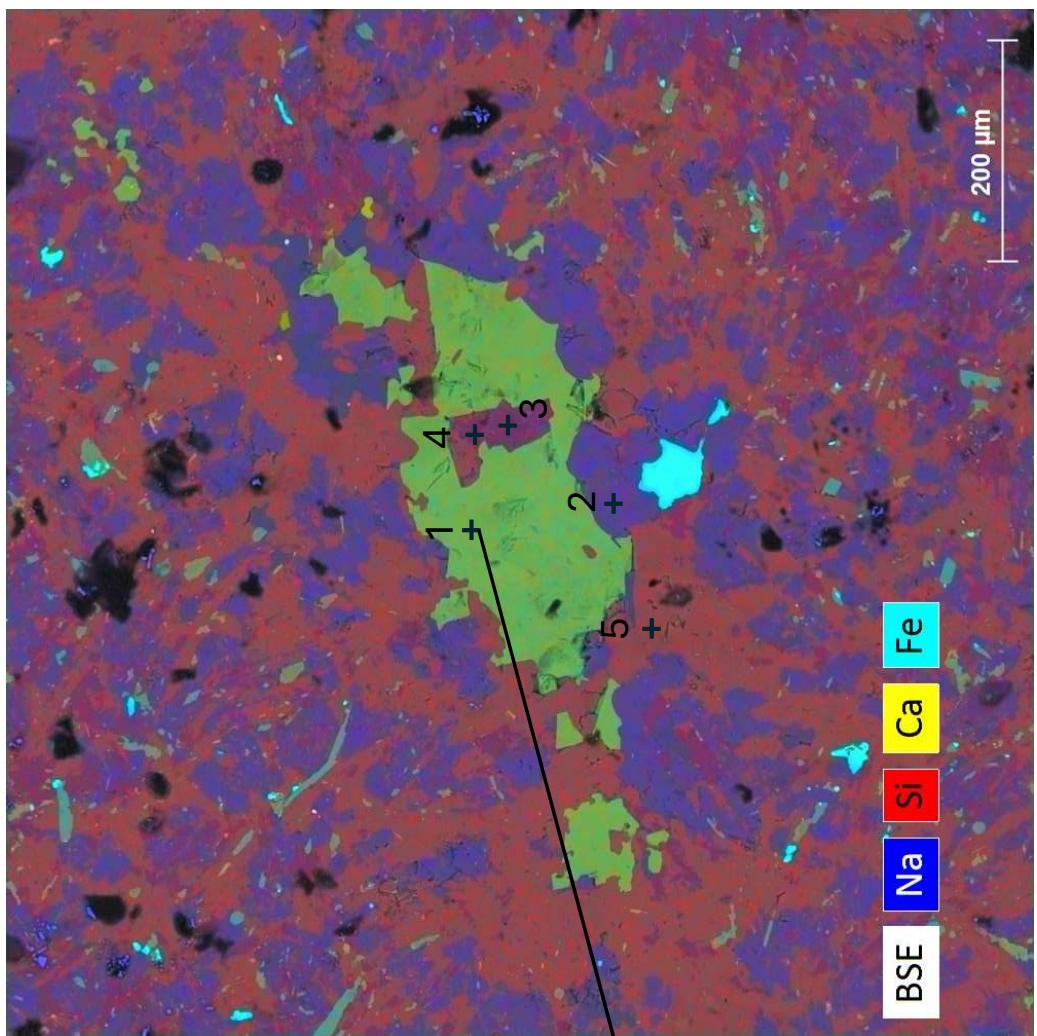


## KMC FOTO B

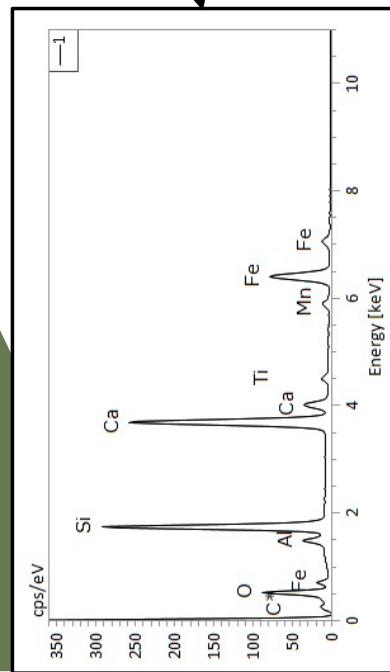
Sobreposição de (K)+(Ca). Nota-se que o Ca ajuda a delimitar as áreas que são formadas cancrinita sobre a Nefelina.

KMC  
FOTO C

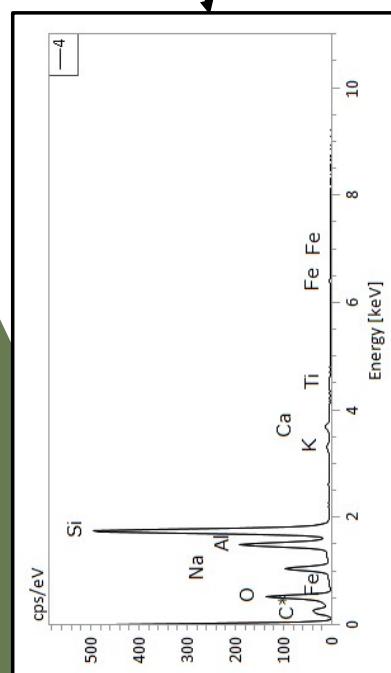
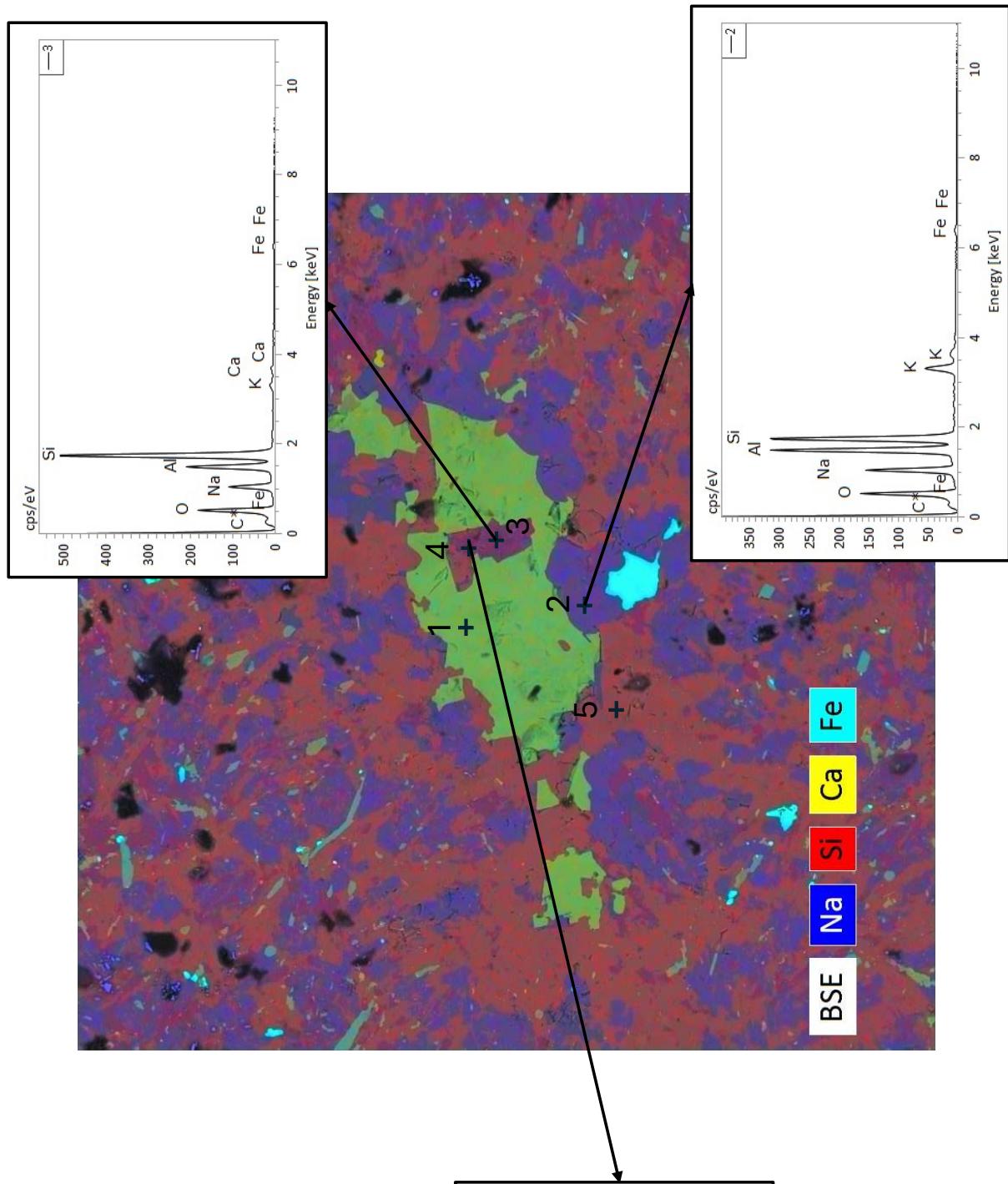


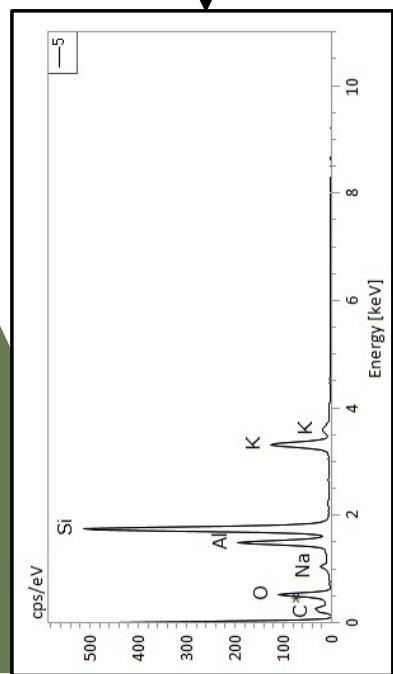
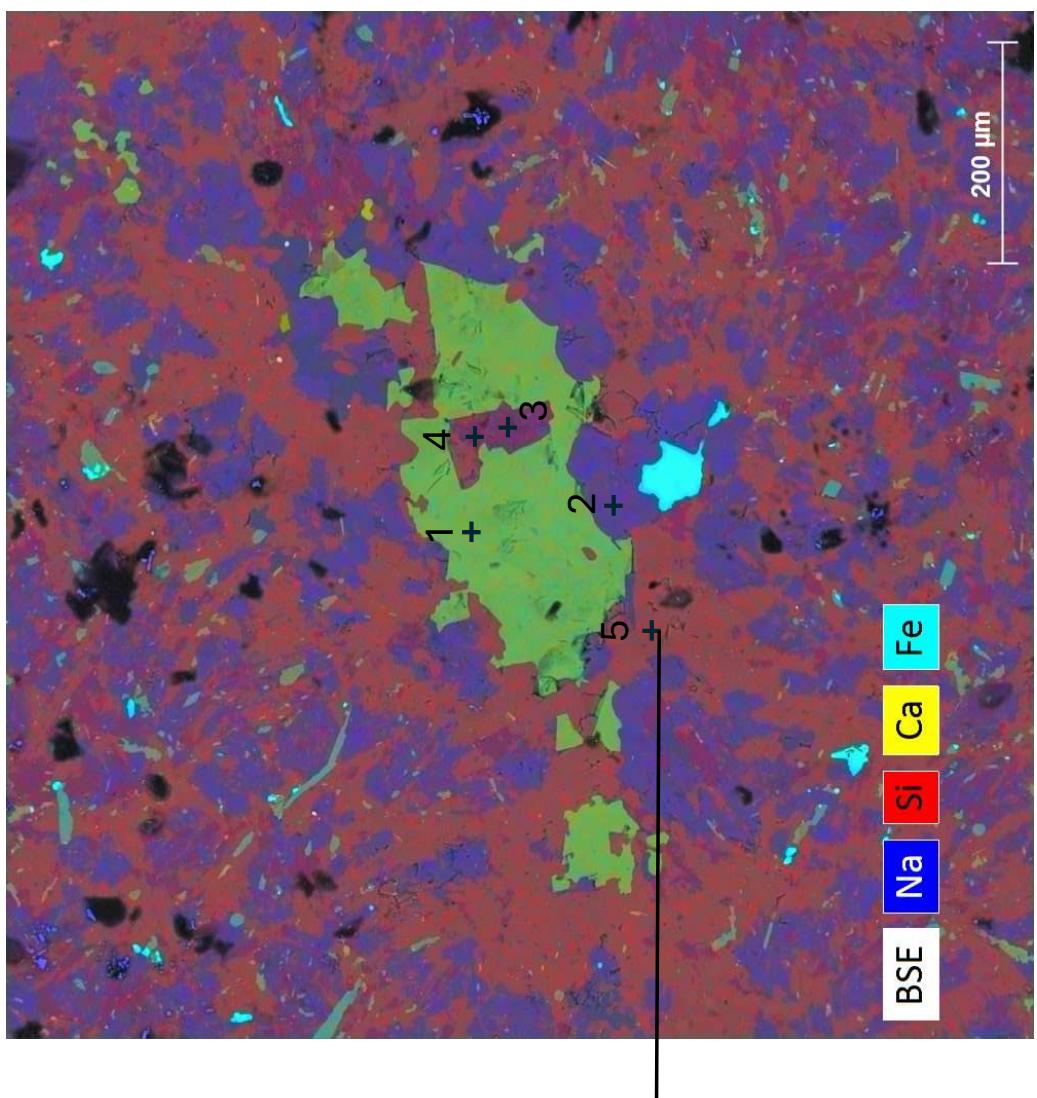


MY-01  
FOTO A



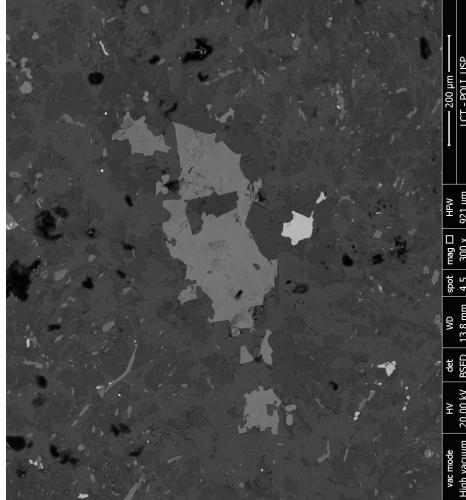
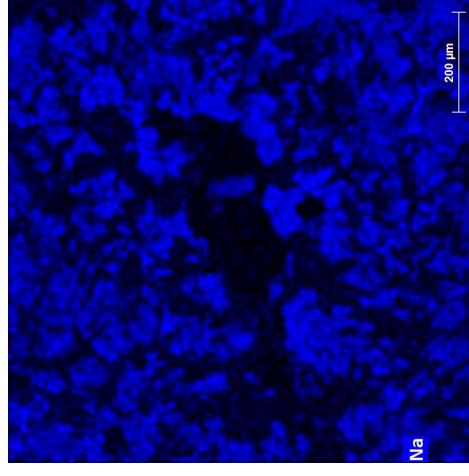
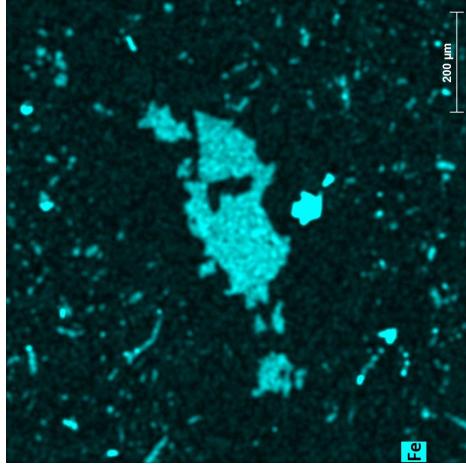
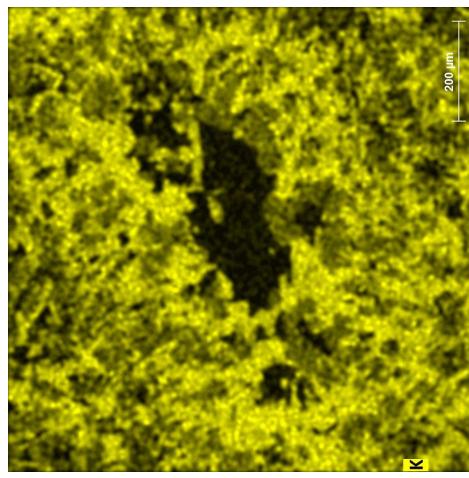
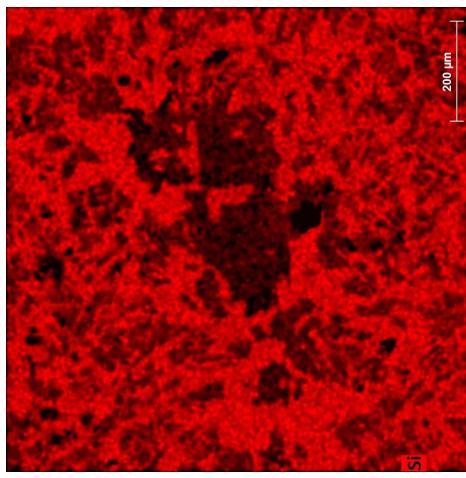
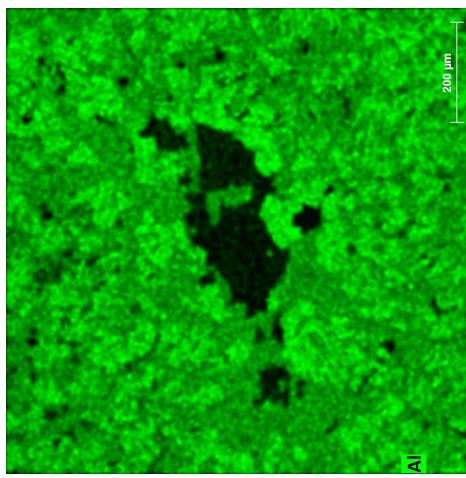
| Mineral              | Fórmula                                    |
|----------------------|--|
| Granada<br>Andradita | $(\text{Ca})_3(\text{Fe})_2(\text{SiO}_4)$ |

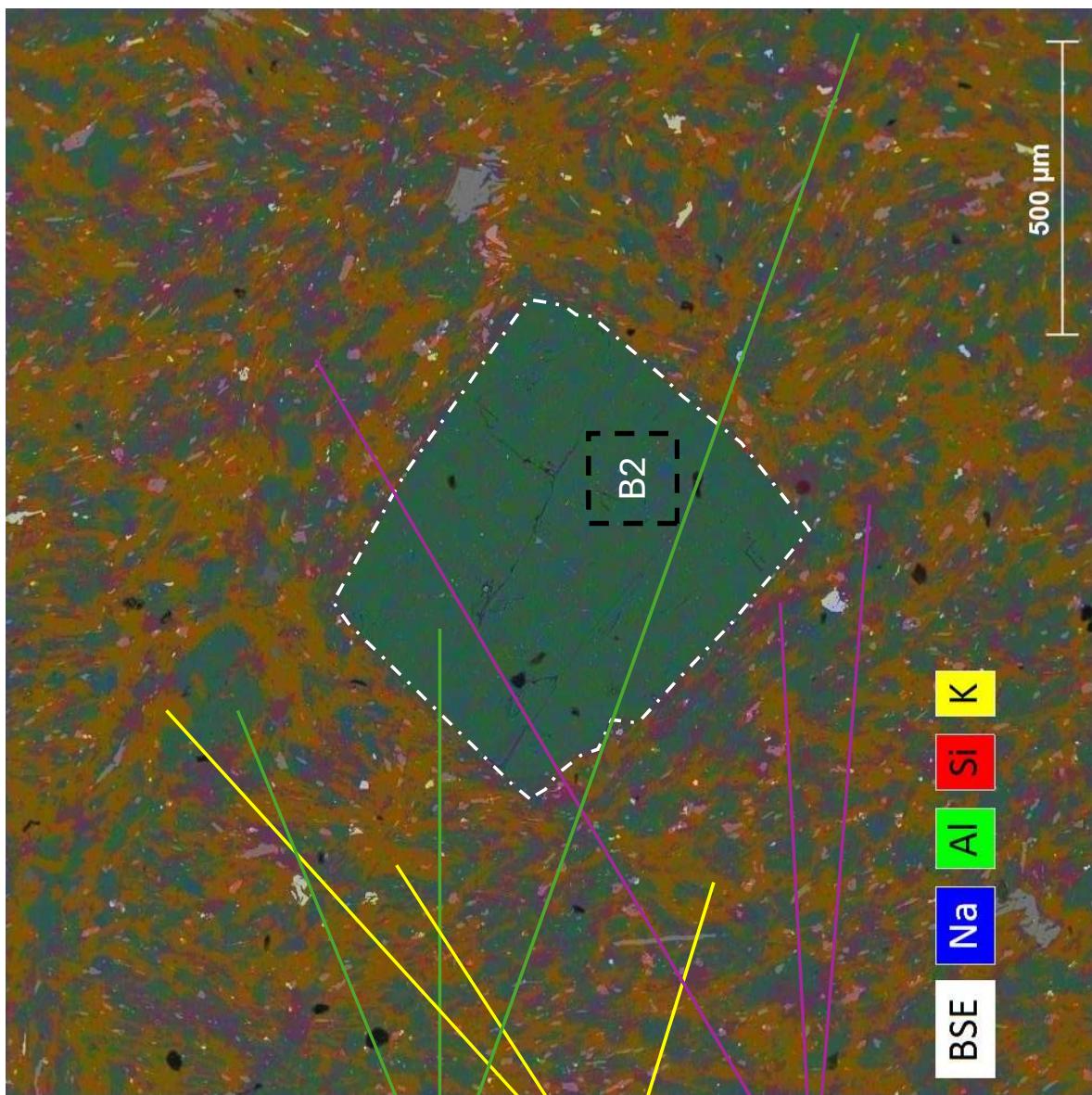




|            |                                   |
|------------|-----------------------------------|
| Mineral    | Fórmula                           |
| Ortoclásio | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> |

MY-01  
FOTO A1

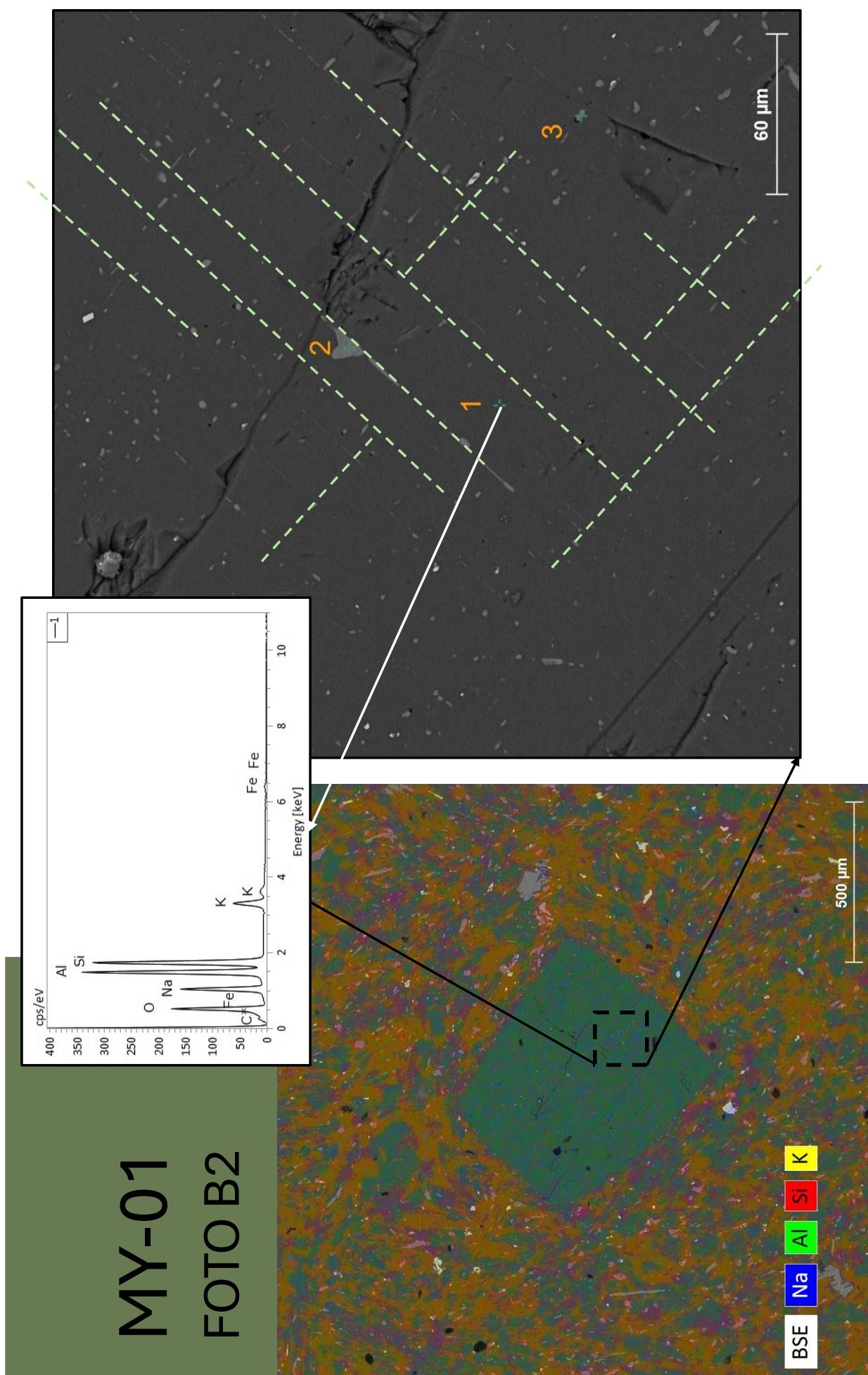




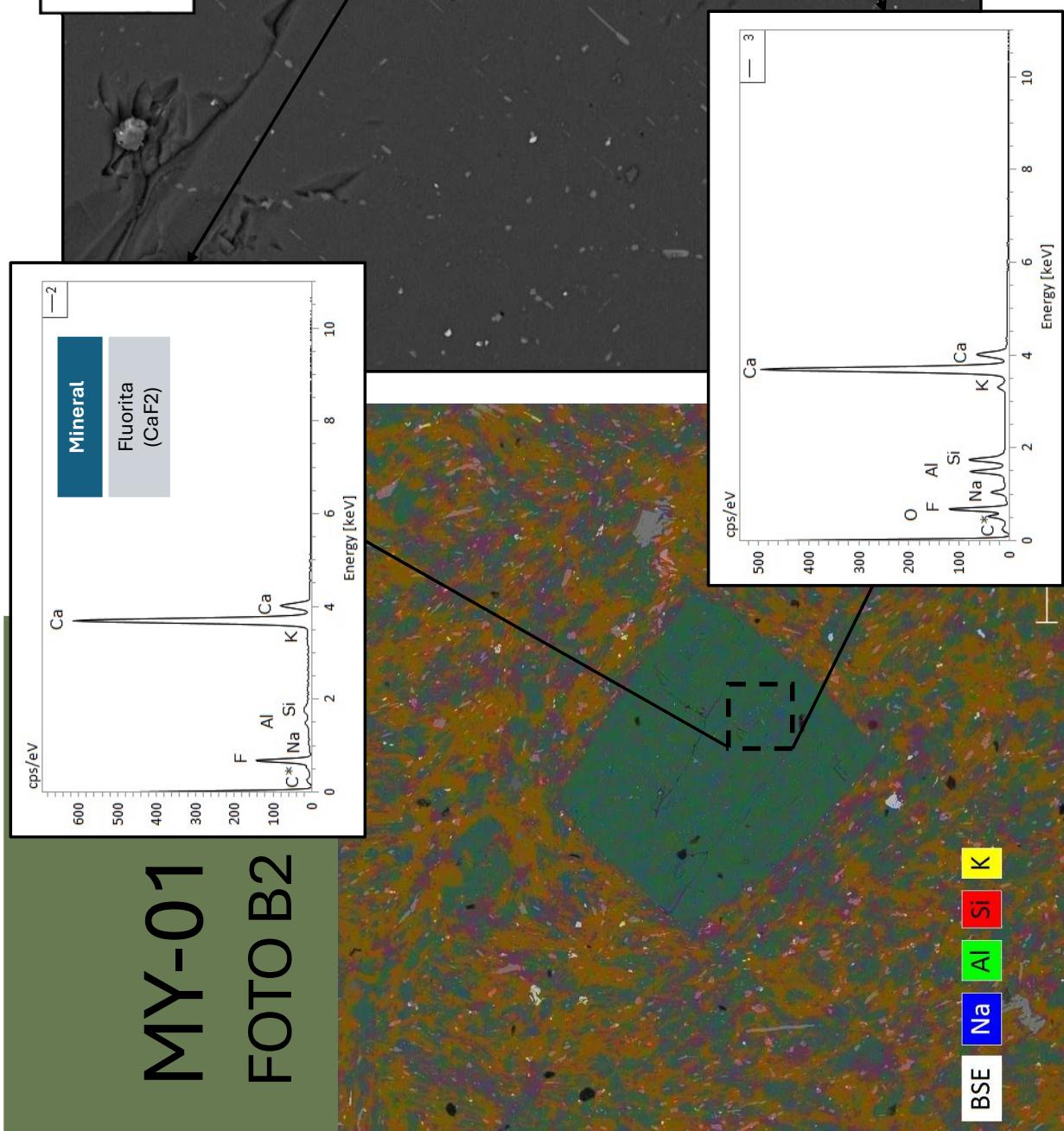
MY-01  
FOTO B1

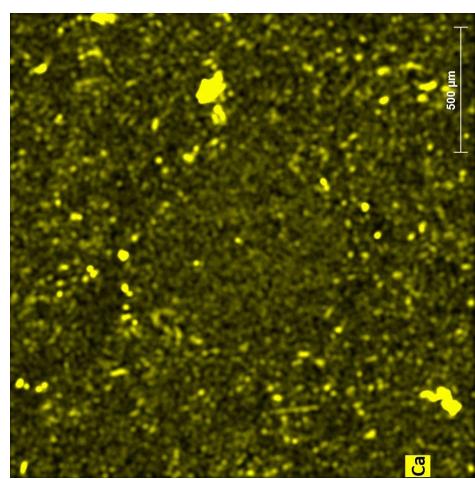
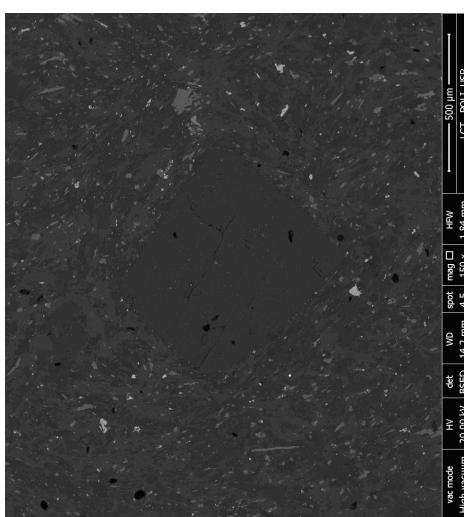
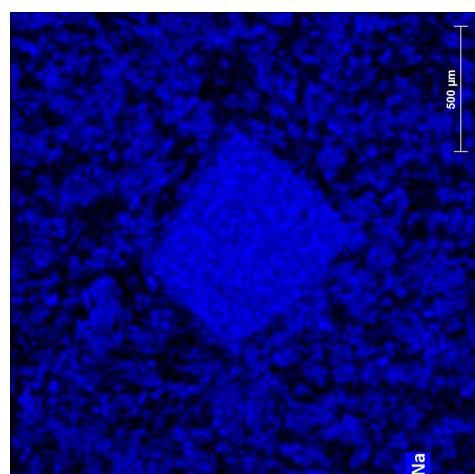
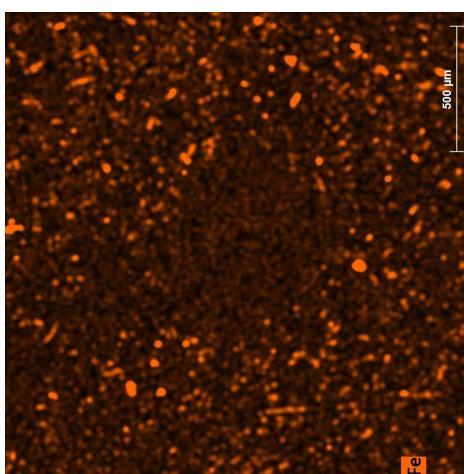
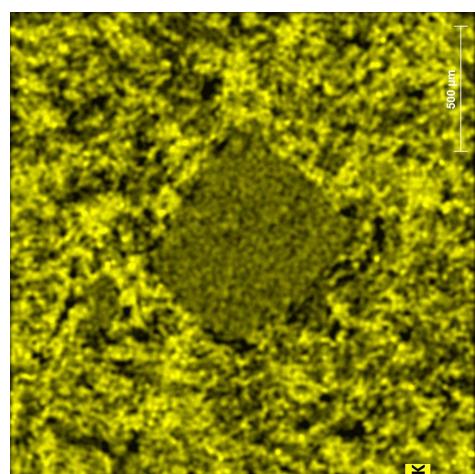
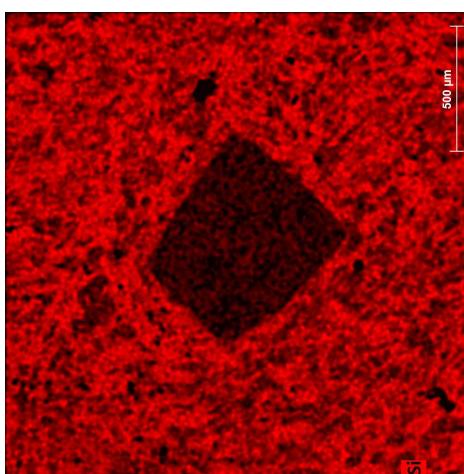
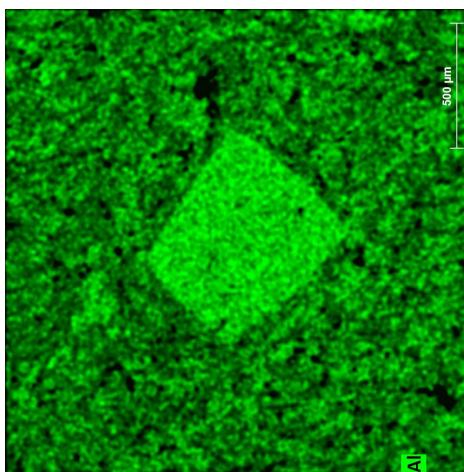
| Mineral              | Fórmula   |
|----------------------|---|
| Nefelina (verde)     | $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_16$                     |
| Ortoclásio (amarelo) | $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  |
| Plagioclásio (oxo)   | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$<br>$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |

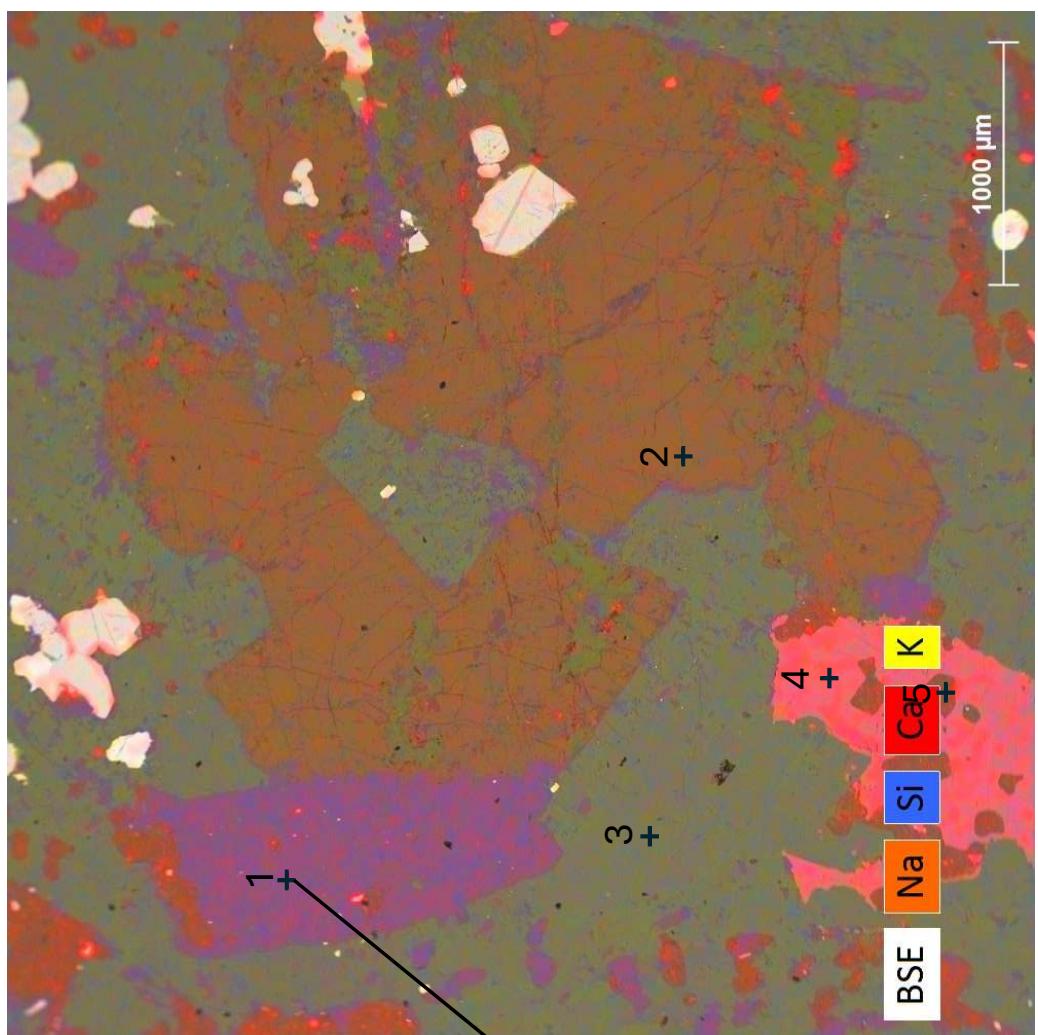




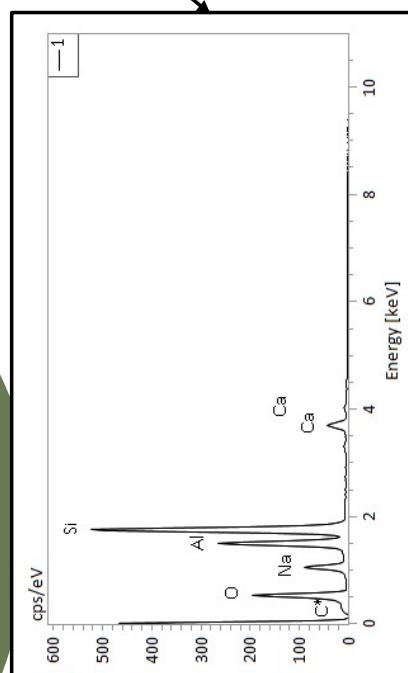
Fica evidente que a alteração da Nefelina possui um controle cristalográfico. Estas alterações na superfície mineral são preenchidas por Fluorita ( $\text{CaF}_2$ ).



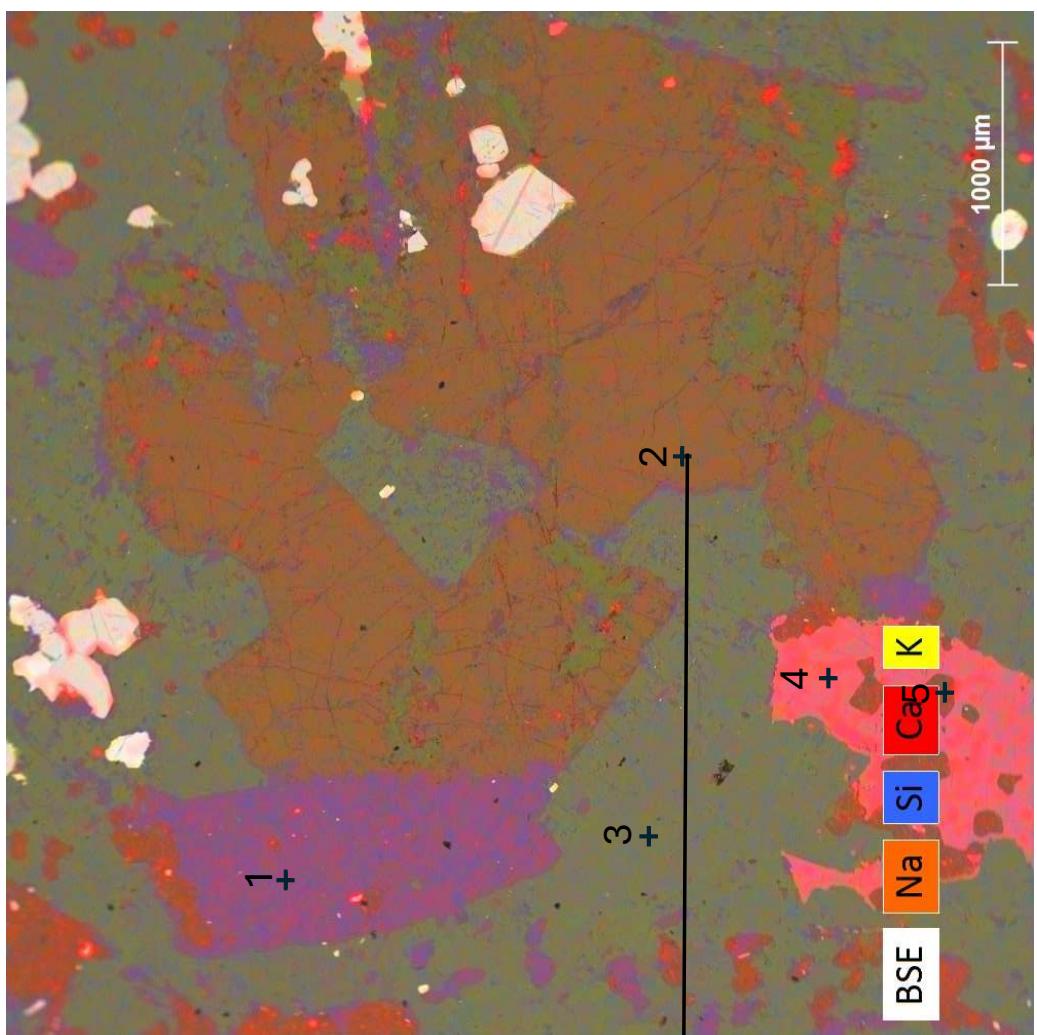




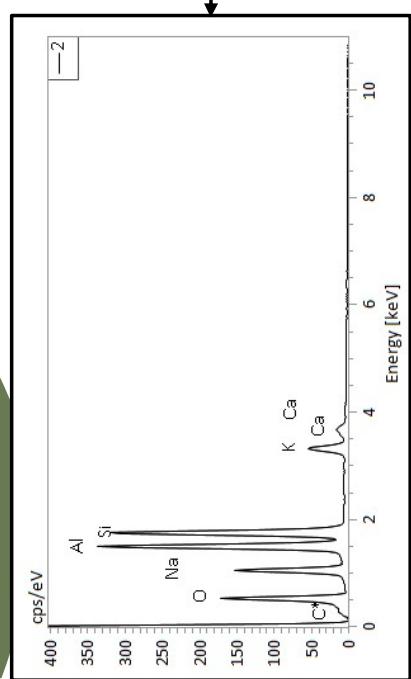
**MY-04**  
**FOTO A**



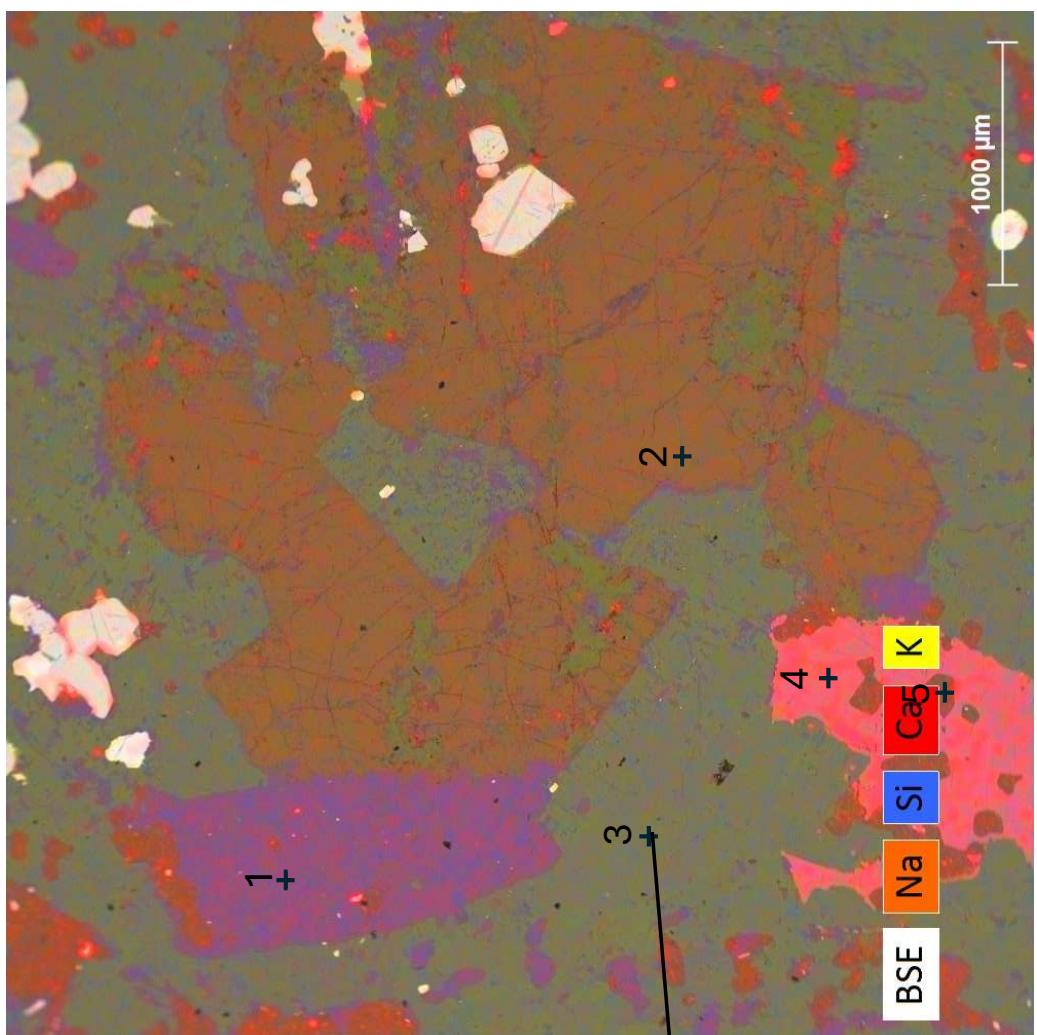
| Mineral                | Fórmula   |
|------------------------|---|
| Plagioclásio<br>(roxo) | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$<br>$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |



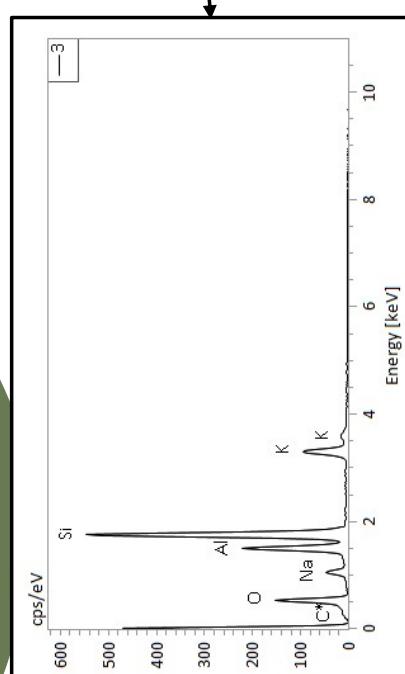
**MY-04**  
**FOTO A**



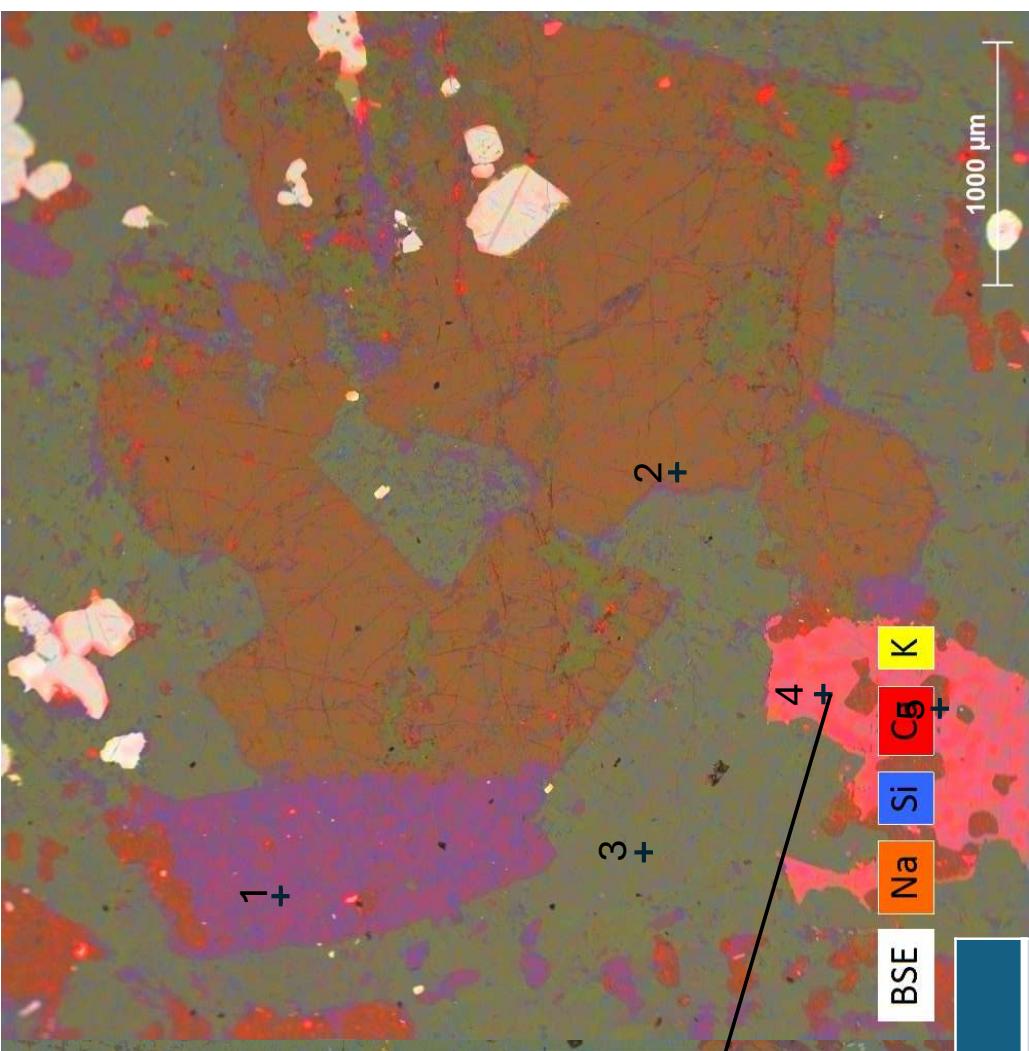
| Mineral          | Fórmula   |
|------------------|---|
| Nefelina (verde) | $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_16$ |



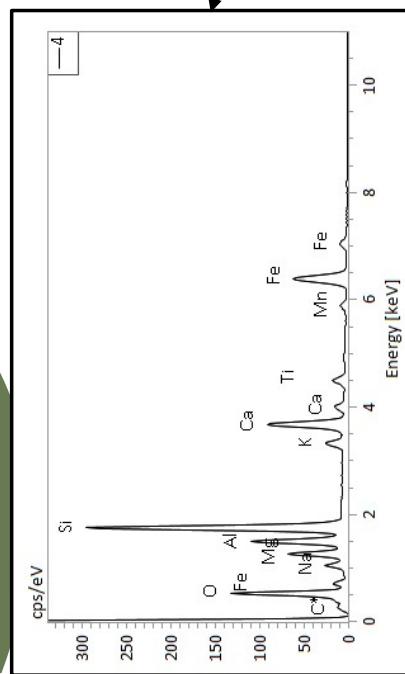
**MY-04**  
**FOTO A**



|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| <b>Mineral</b>        | <b>Fórmula</b>                    |
| Ortoclásio<br>(verde) | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> |



**MY-04**  
**FOTO A**

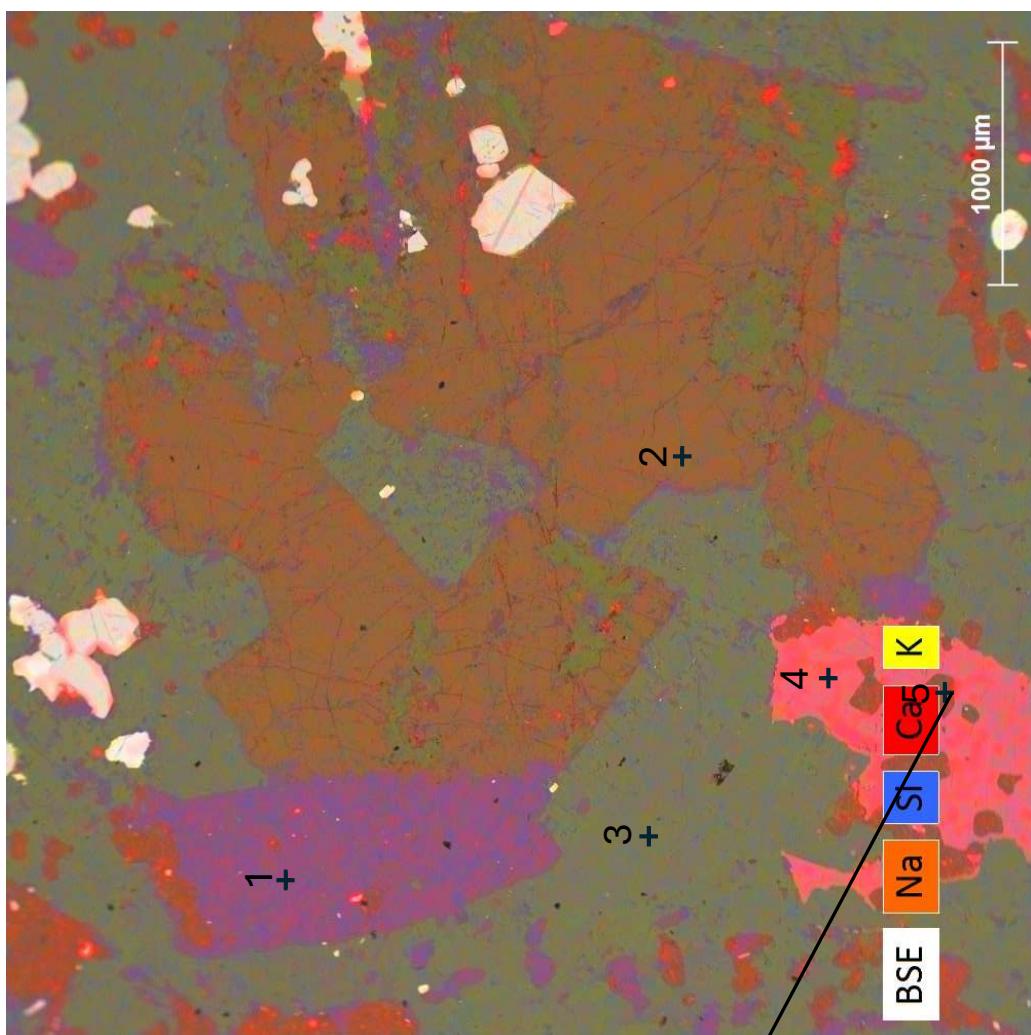


**Mineral**

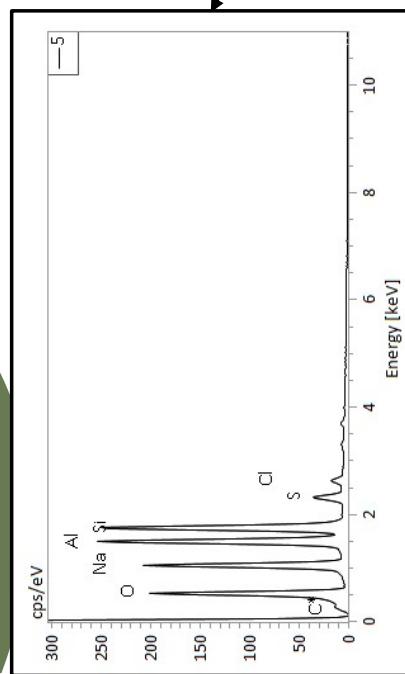
Hornblenda

**Fórmula**

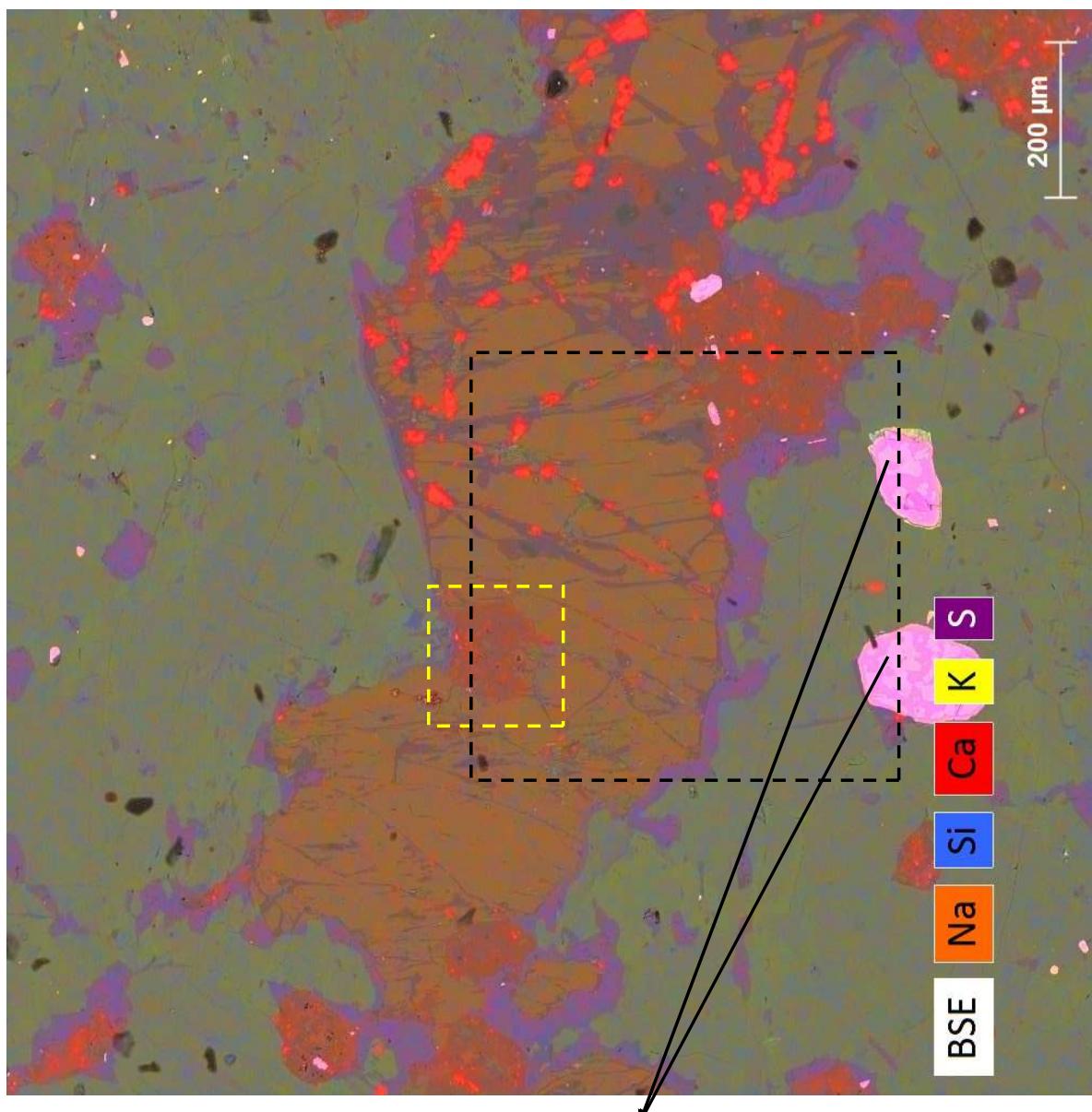
$(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$



**MY-04**  
**FOTO A**

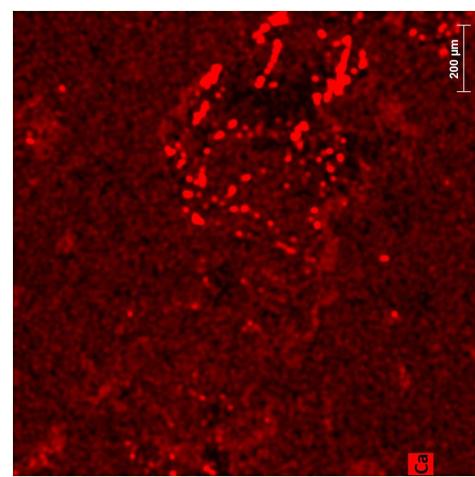
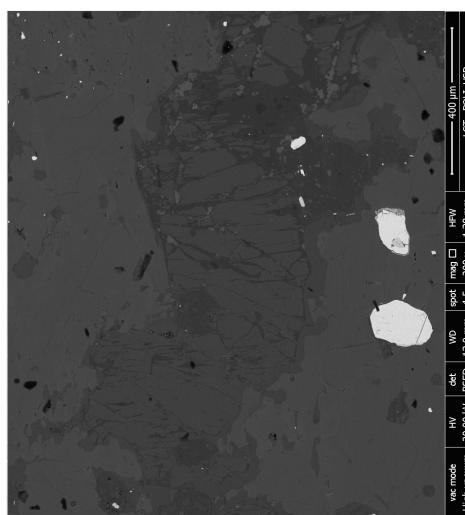
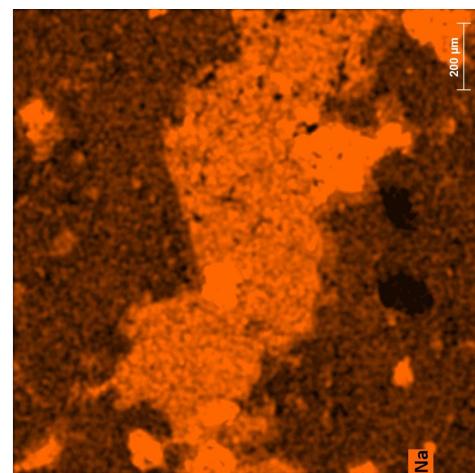
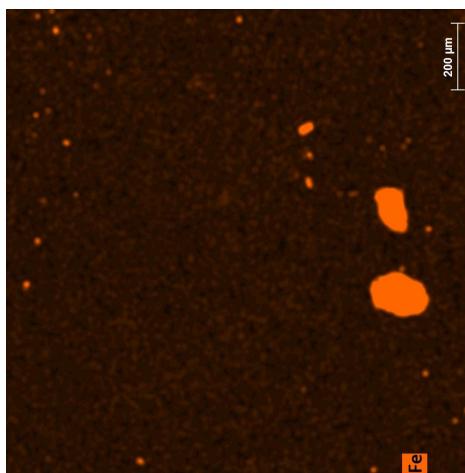
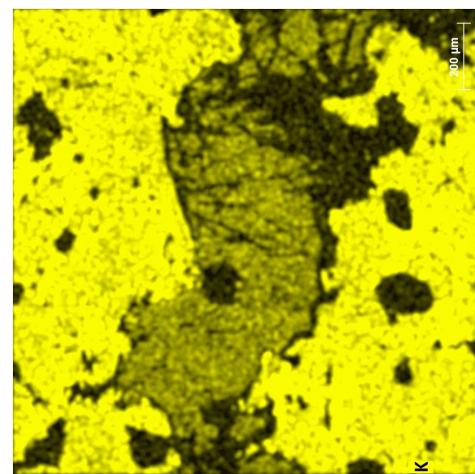
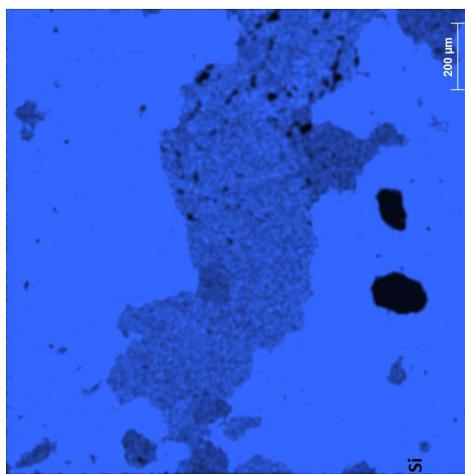
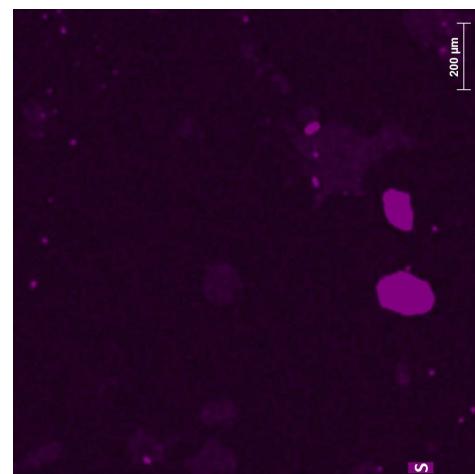
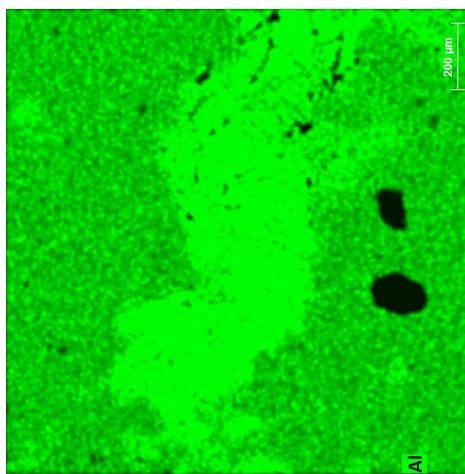


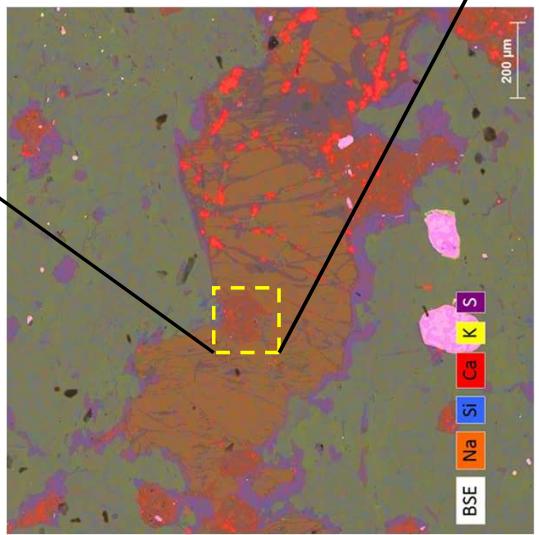
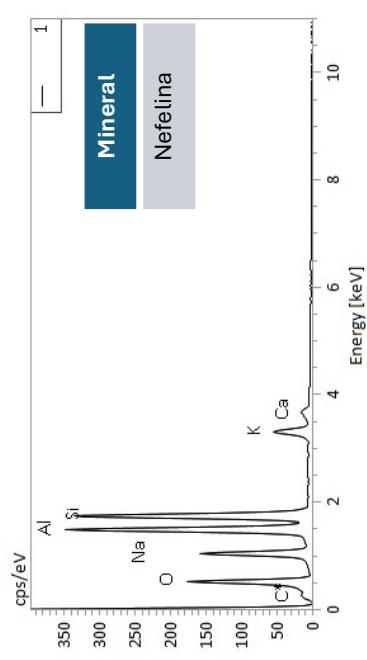
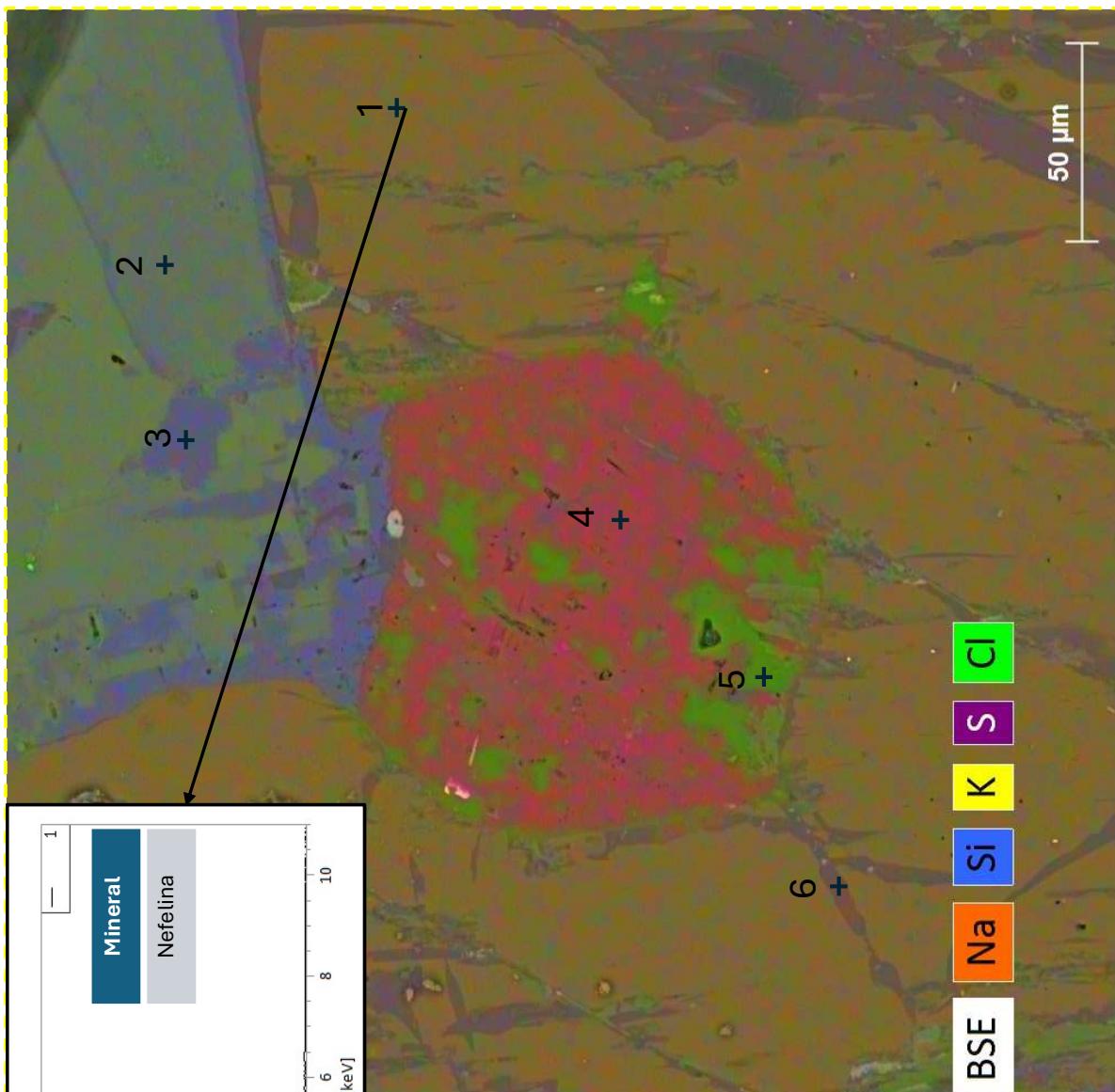
| Mineral  | Fórmula  |
|----------|--|
| Sodalita | $(\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{Cl}, \text{SO}_4))$ |

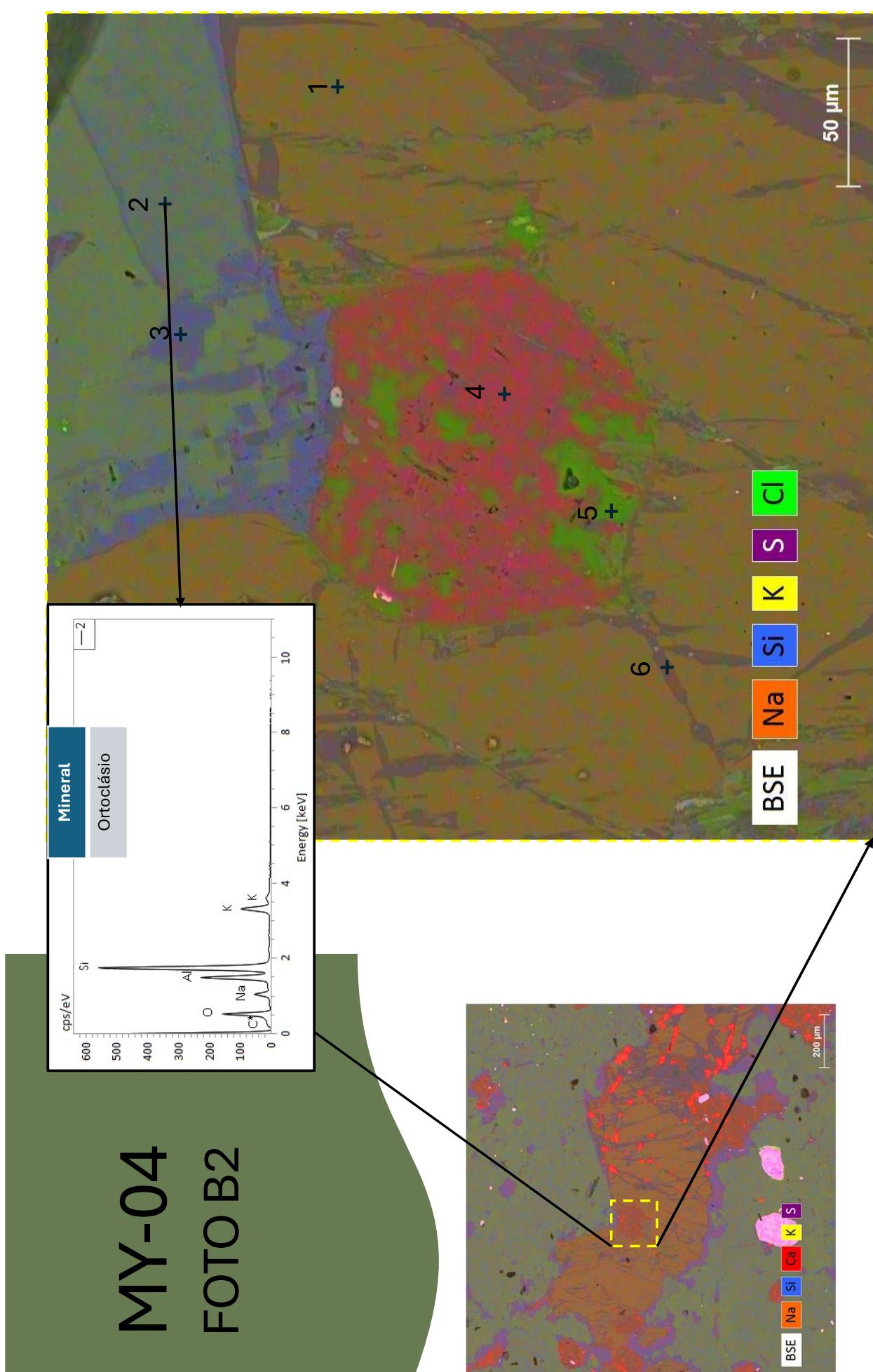


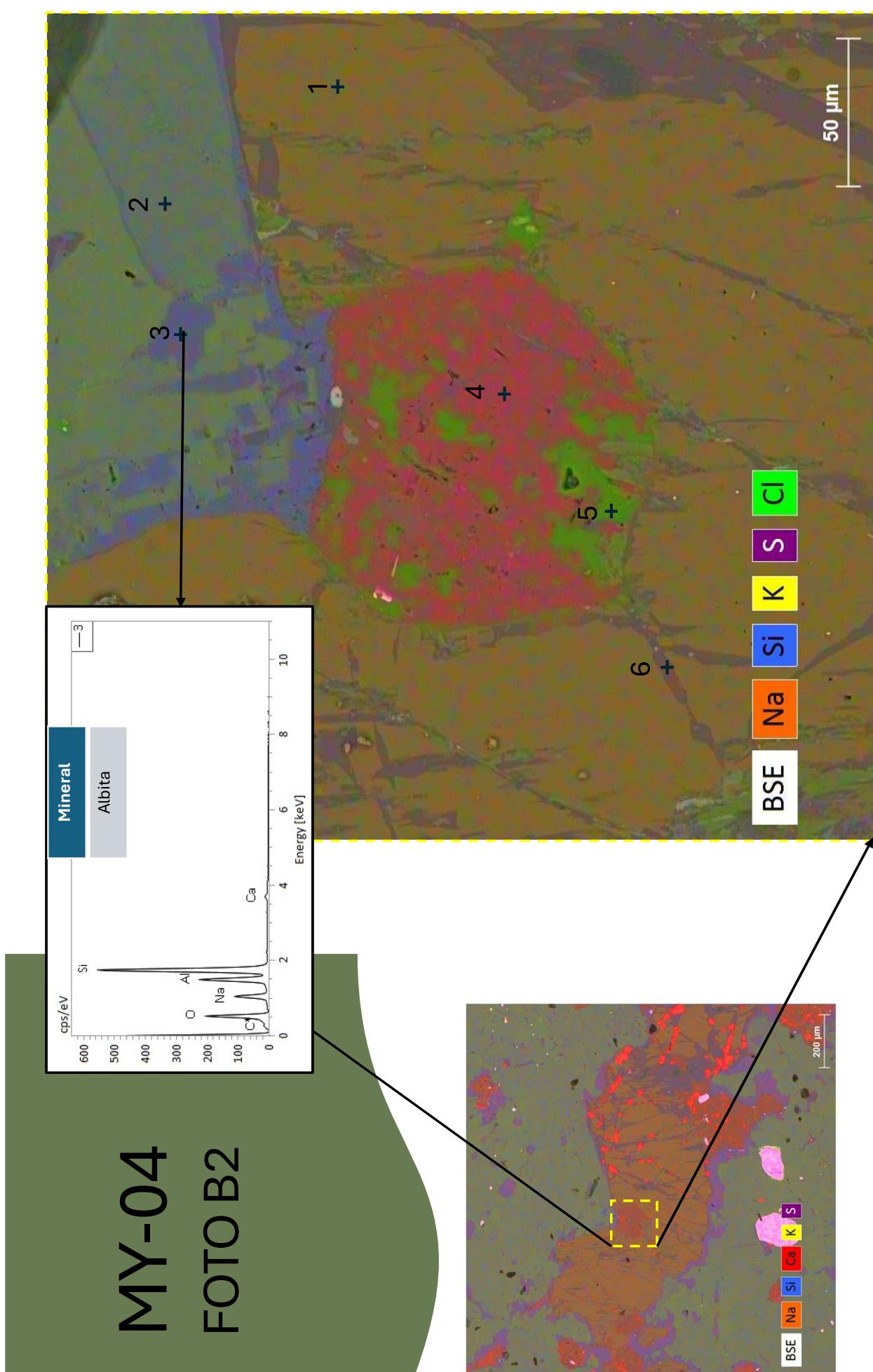
MY-04  
FOTO B1

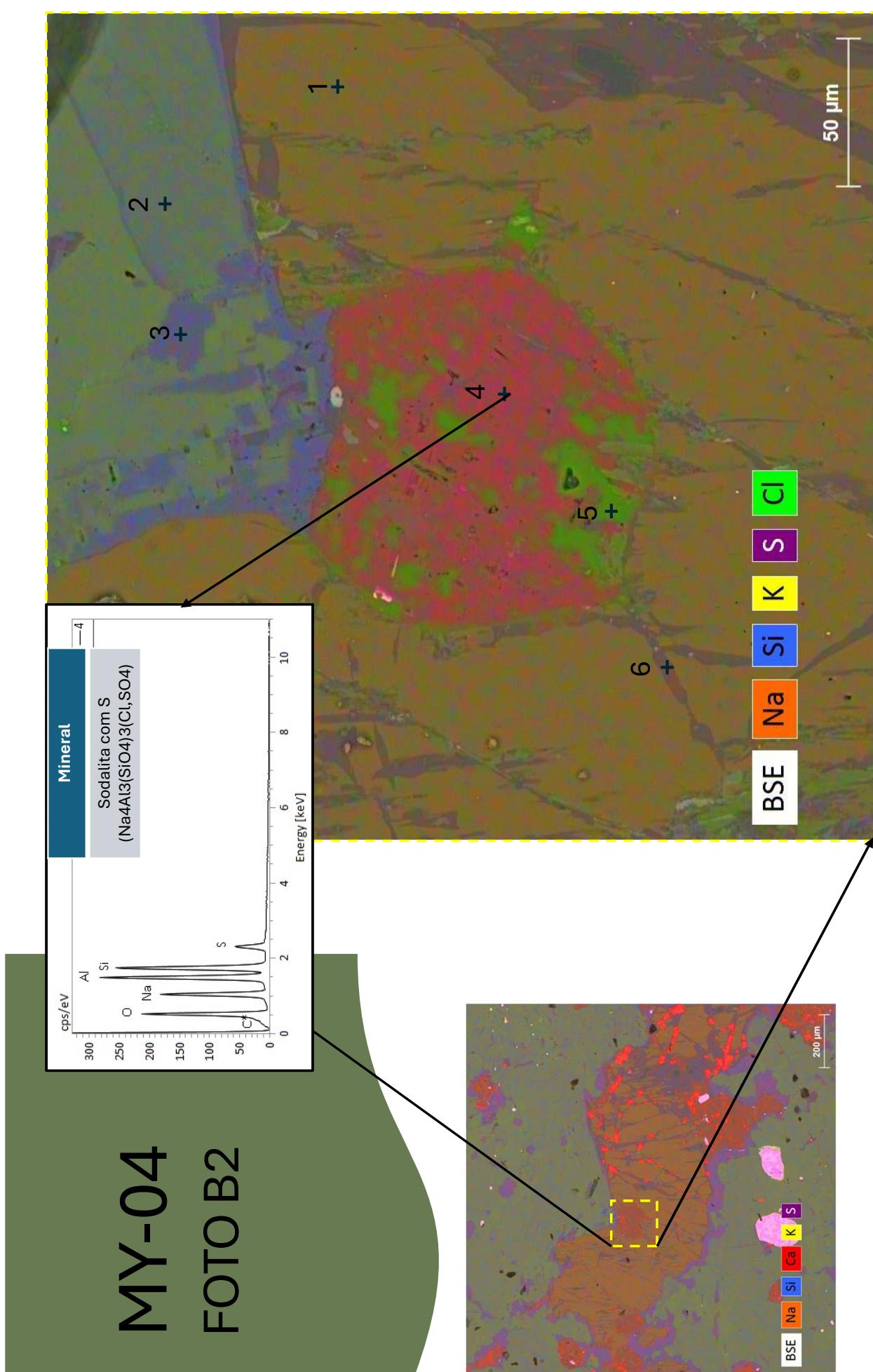
| Mineral | Fórmula          |
|---------|------------------|
| Pirita  | FeS <sub>2</sub> |

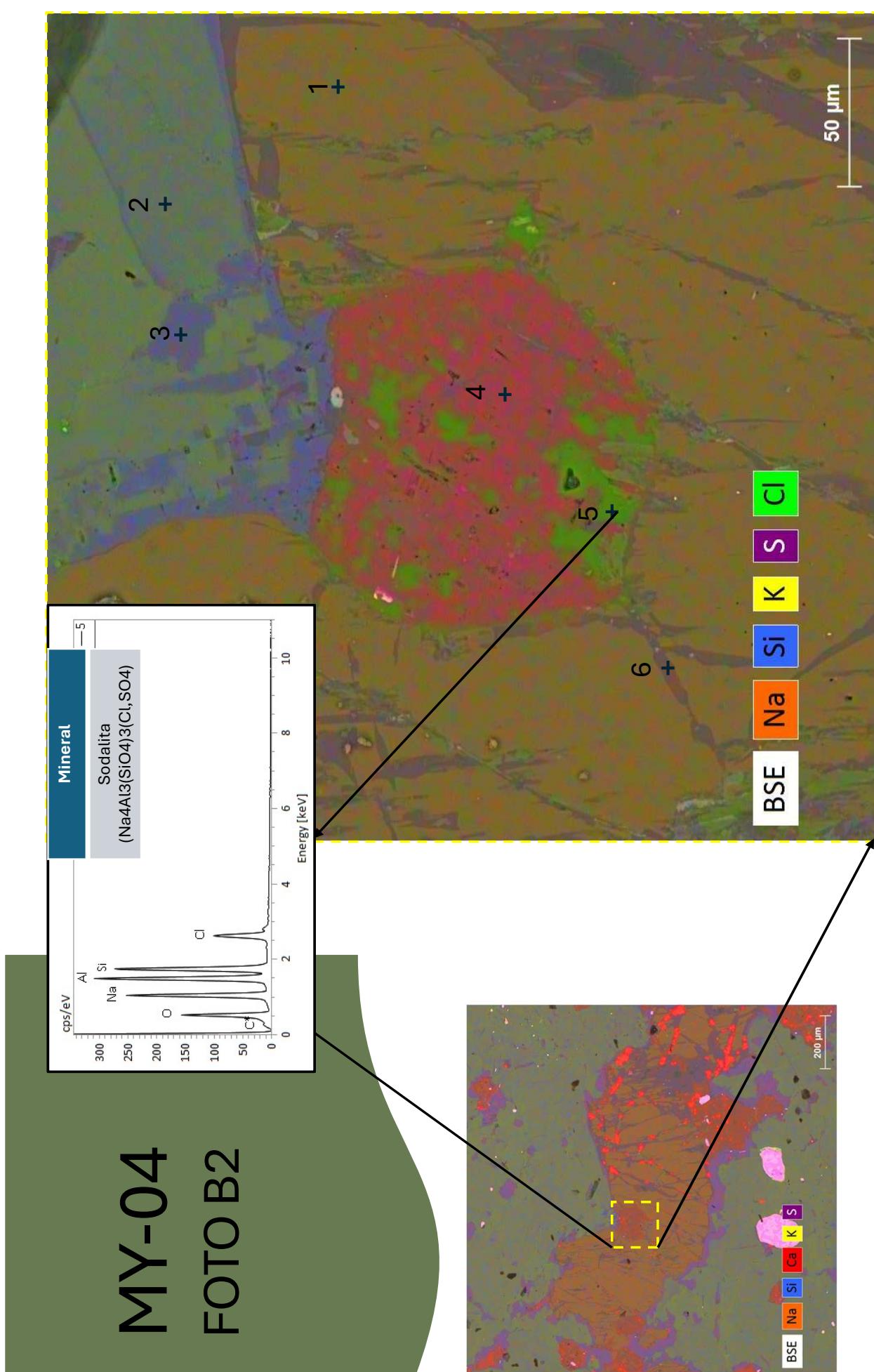


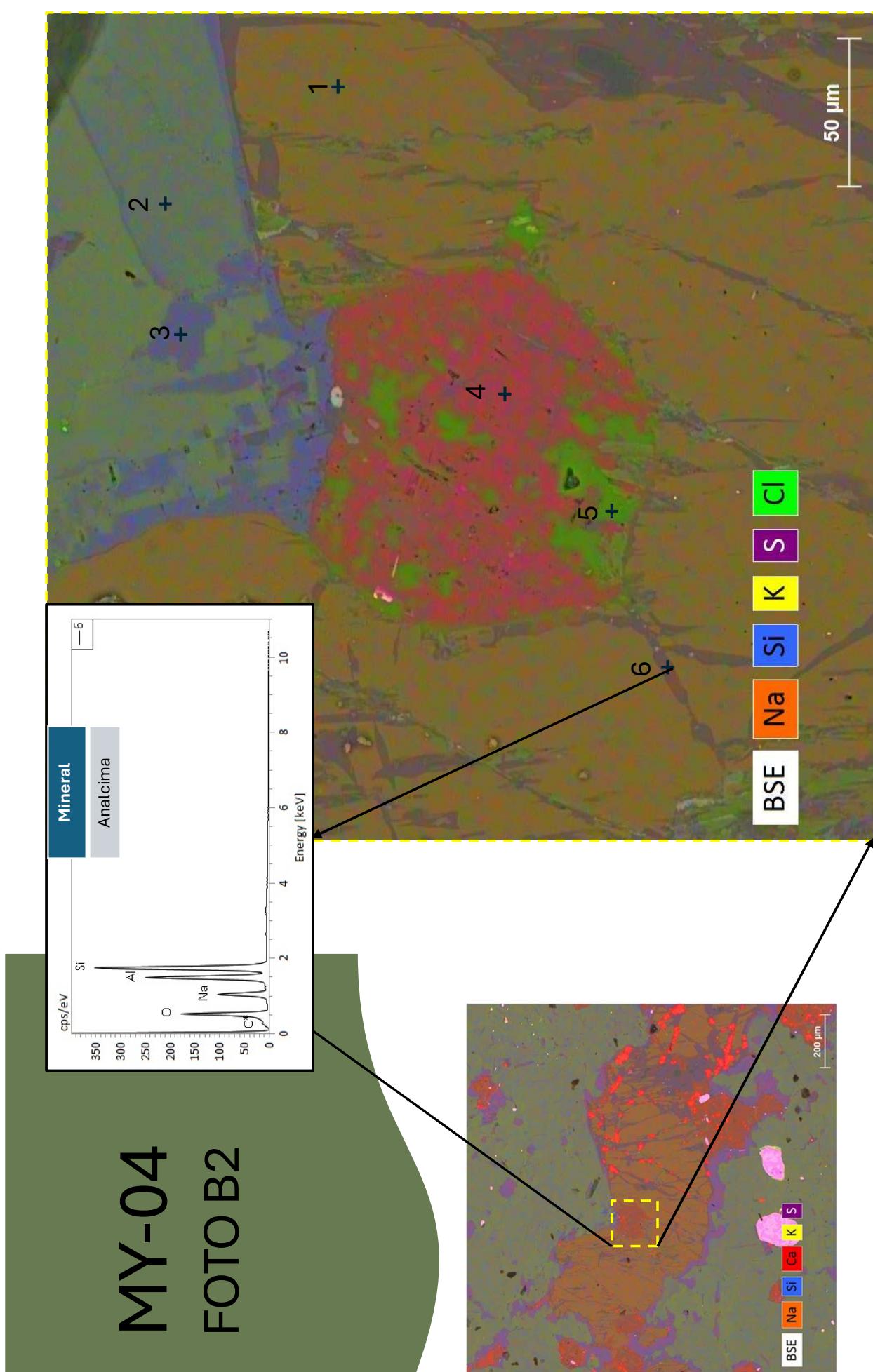






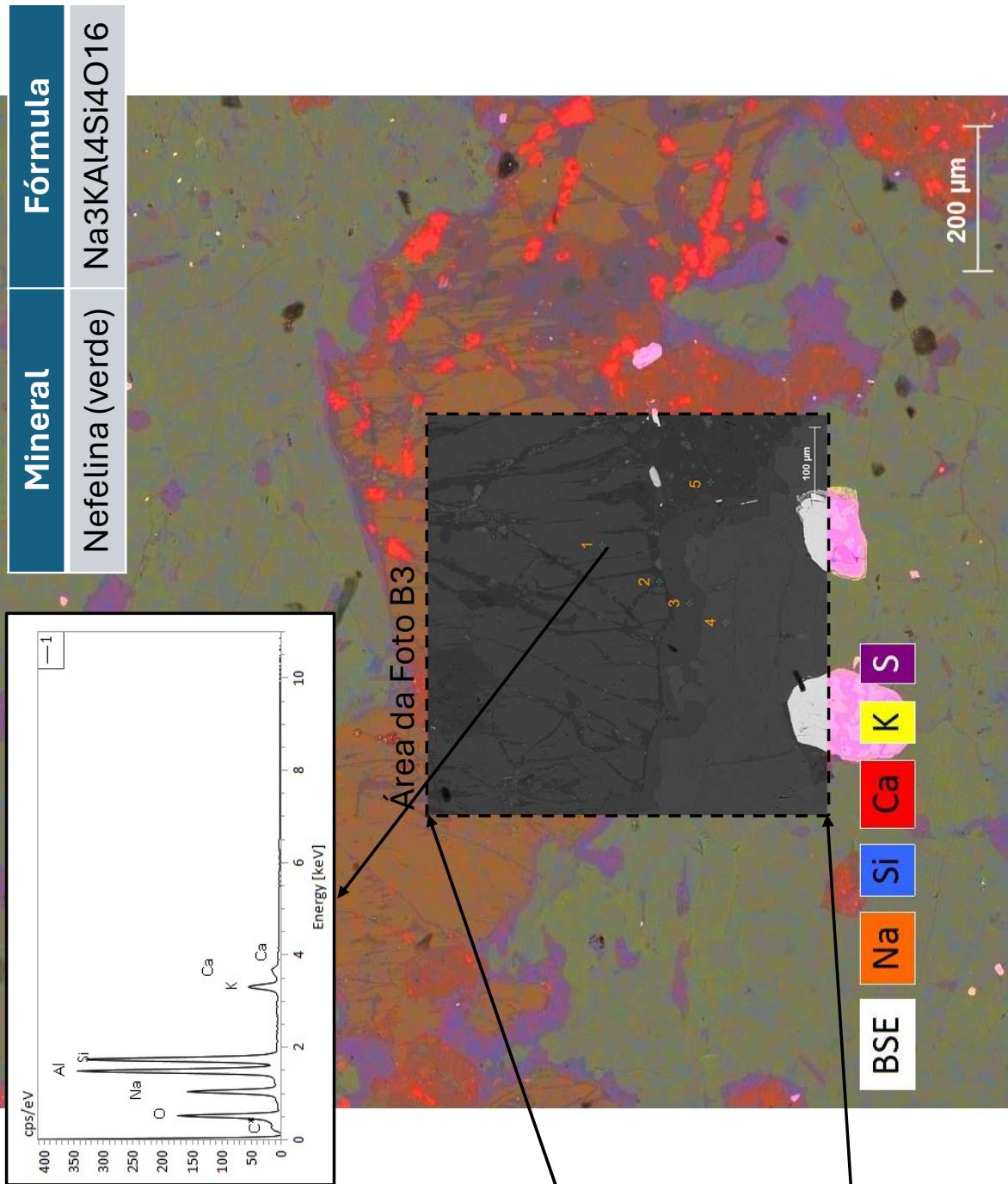






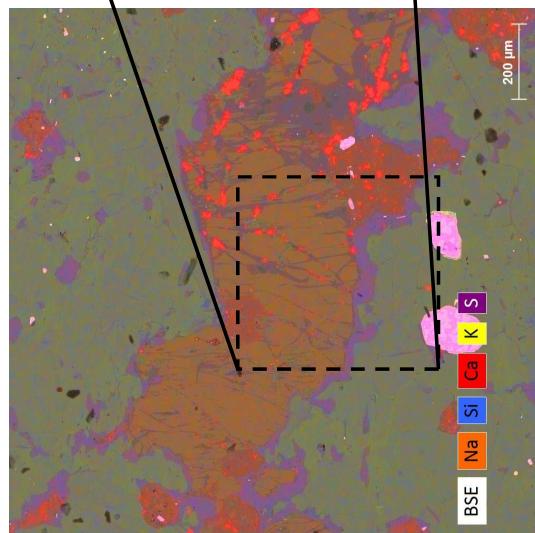
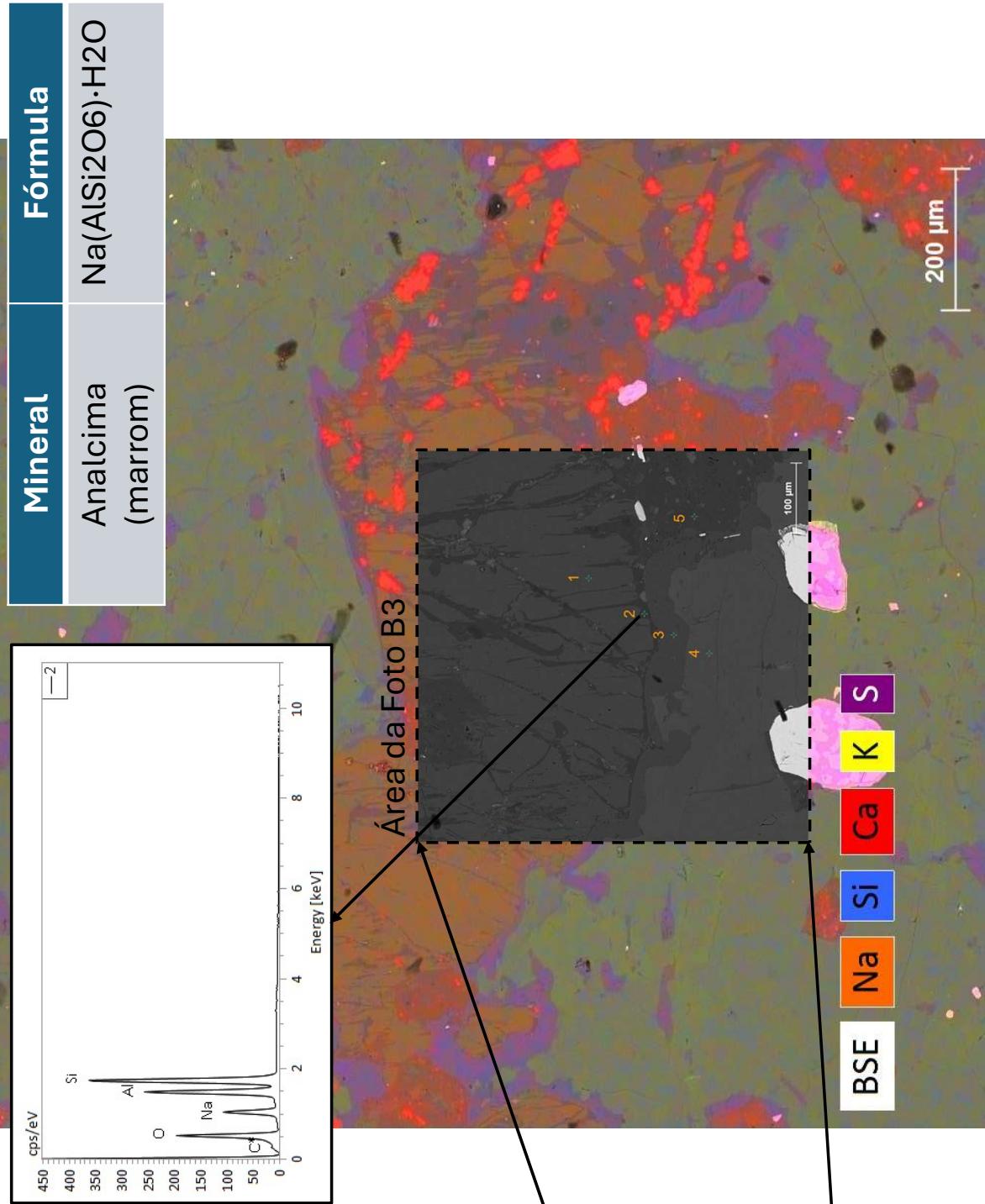
# MY-04

## FOTO B3



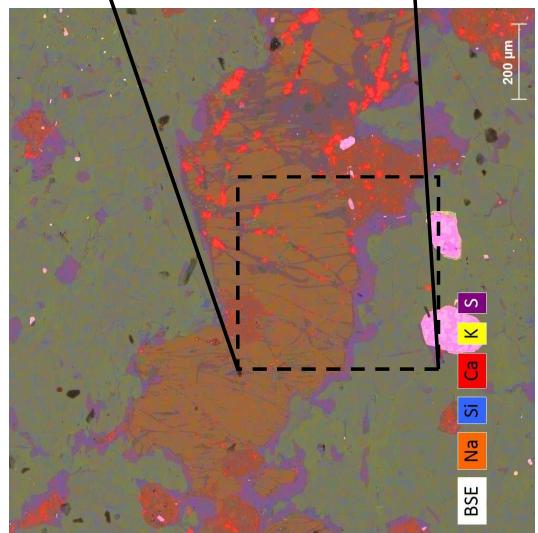
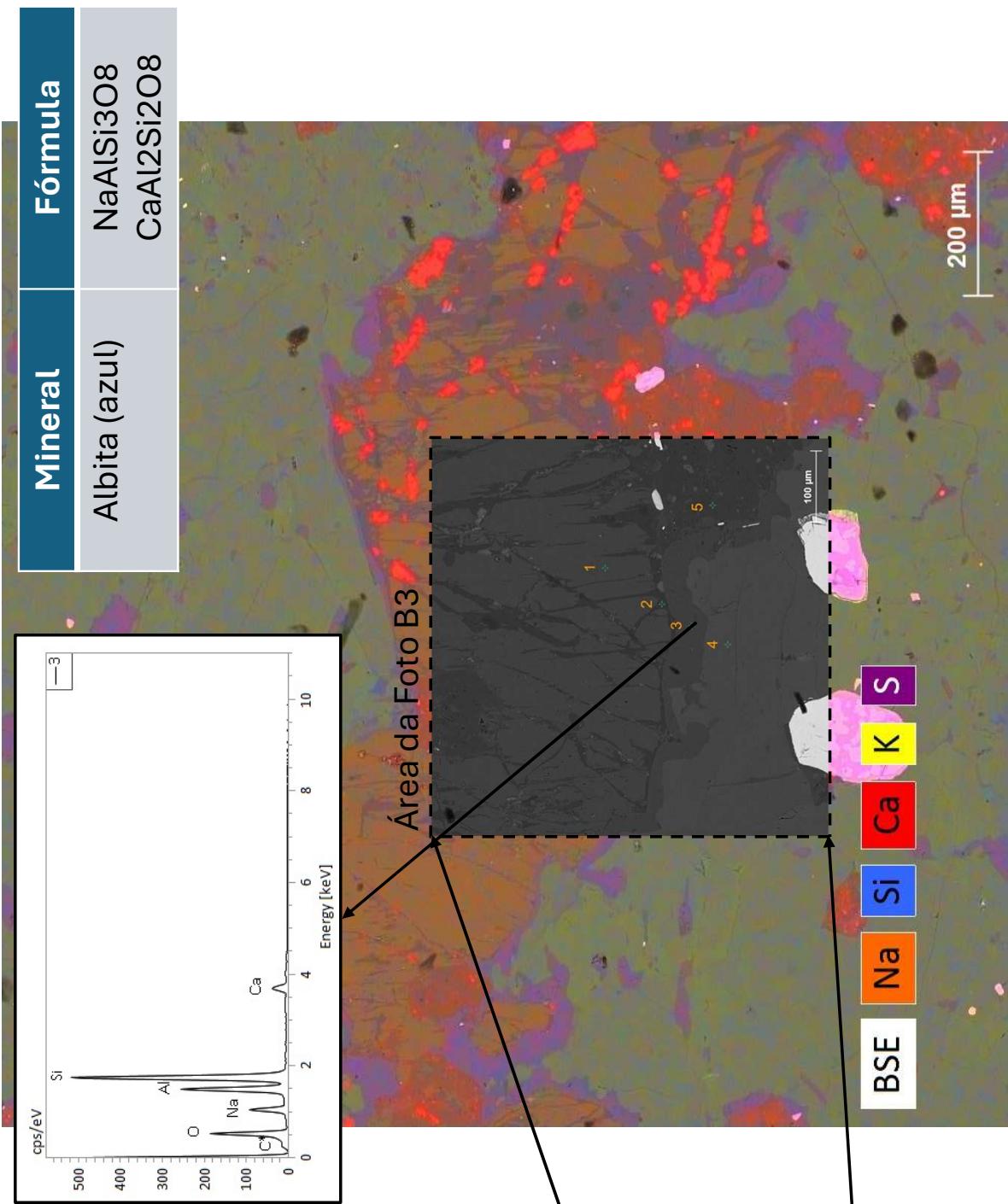
# MY-04

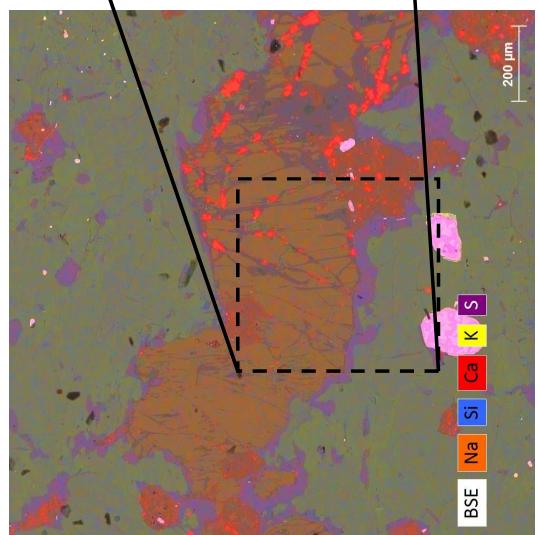
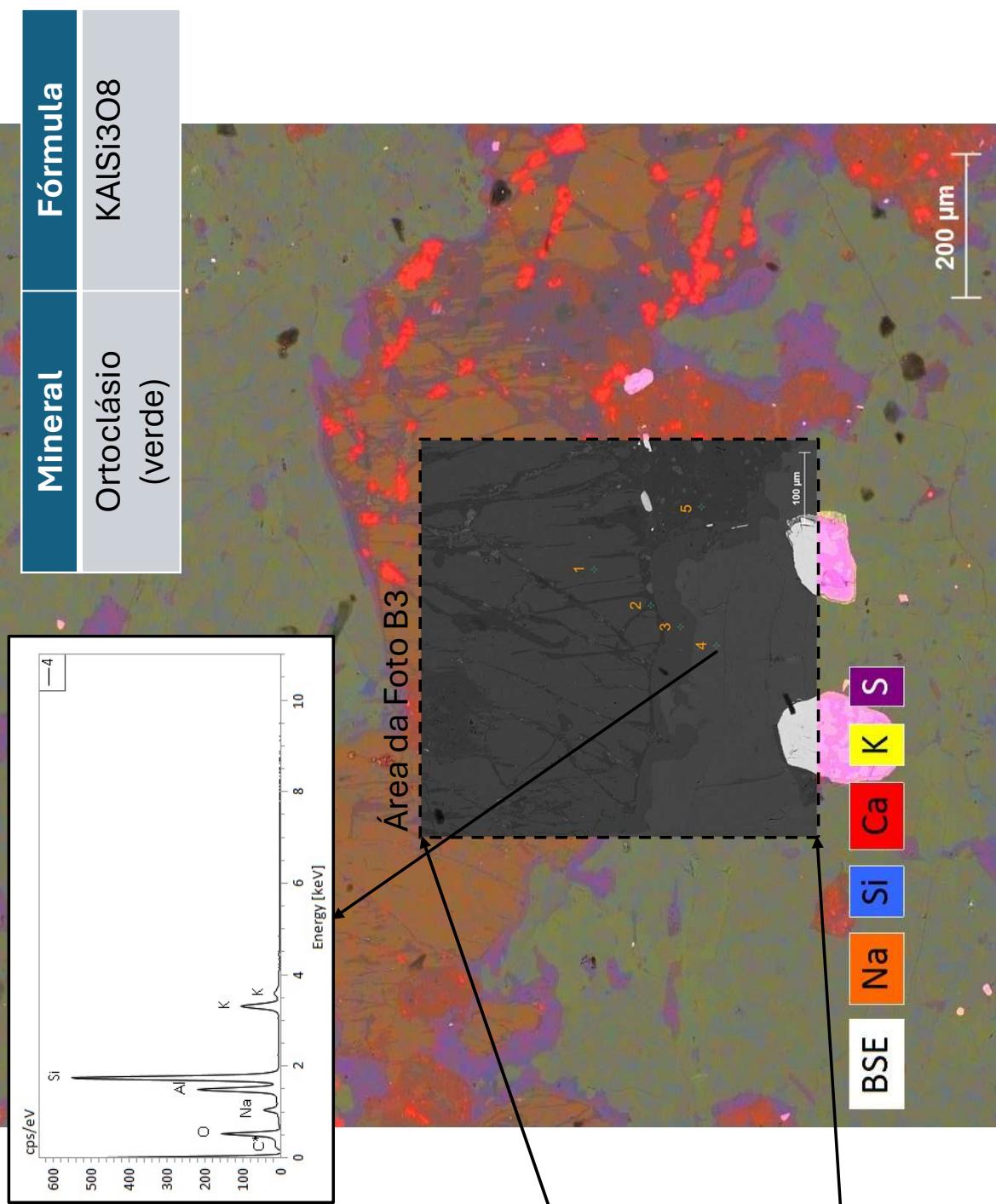
## FOTO B3



# MY-04

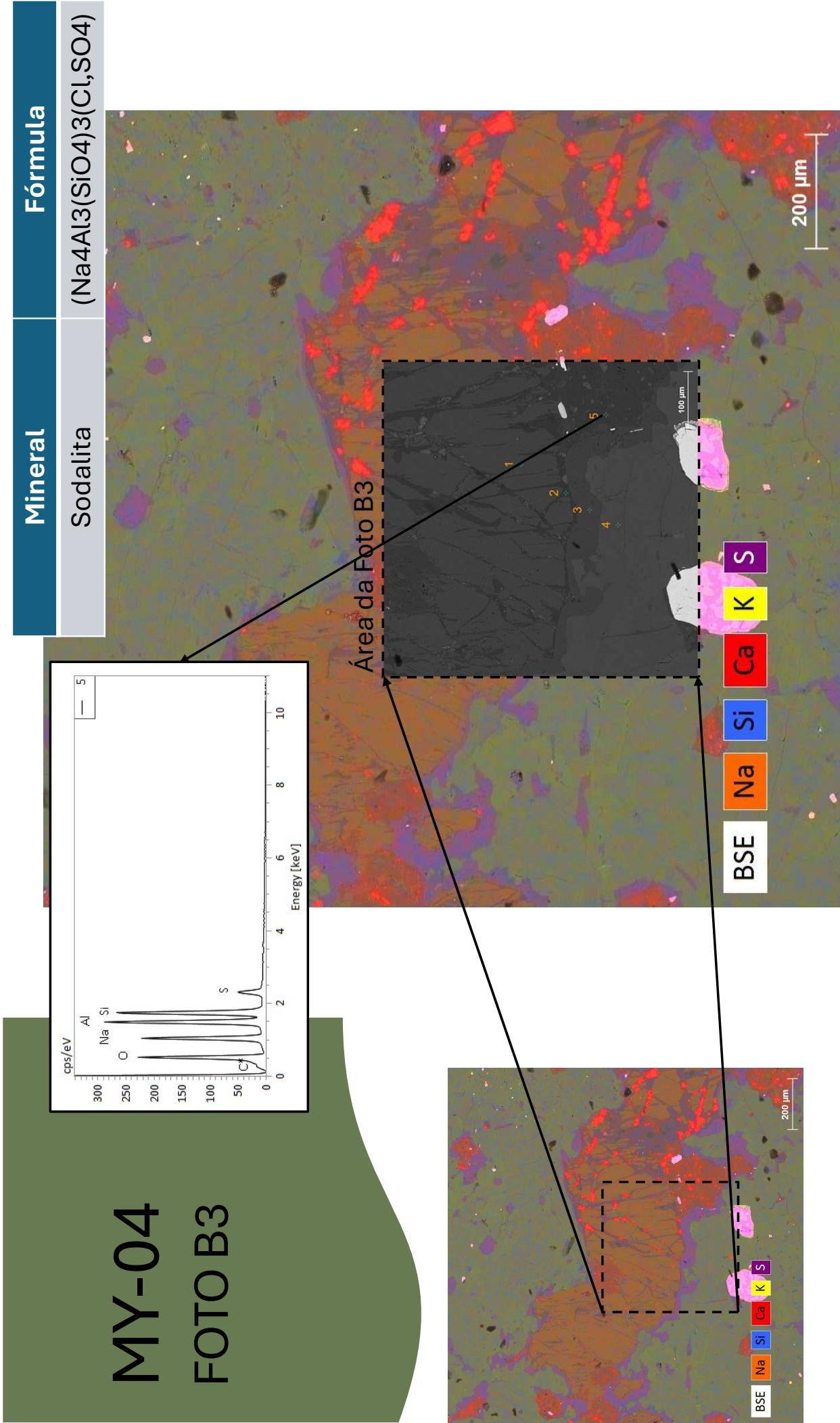
## FOTO B3

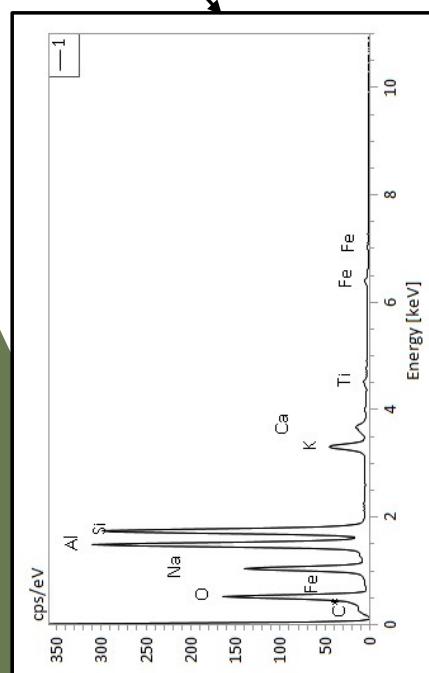
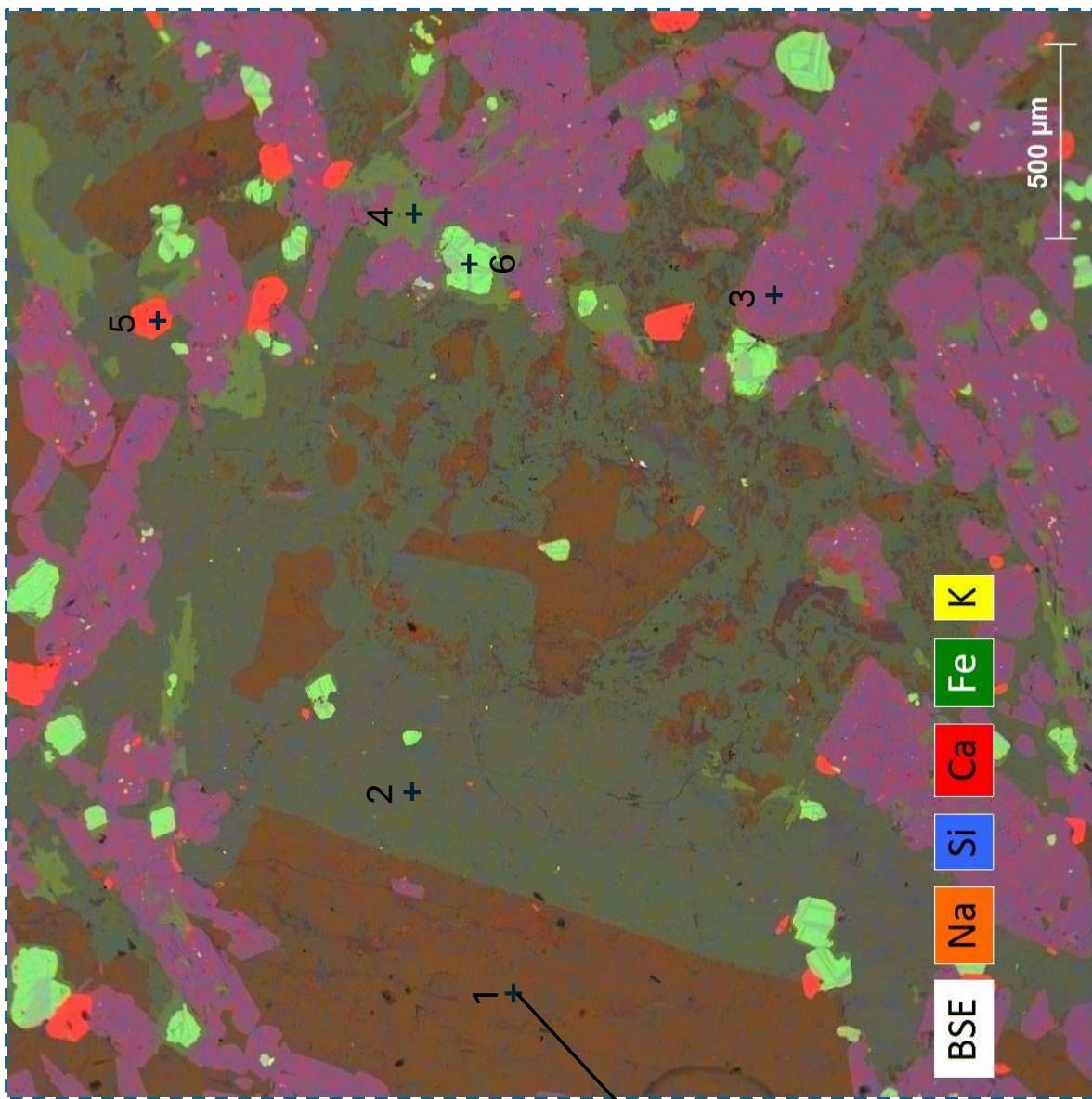


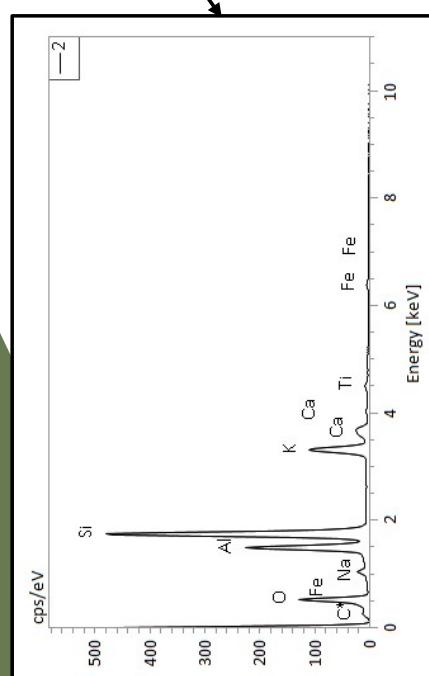
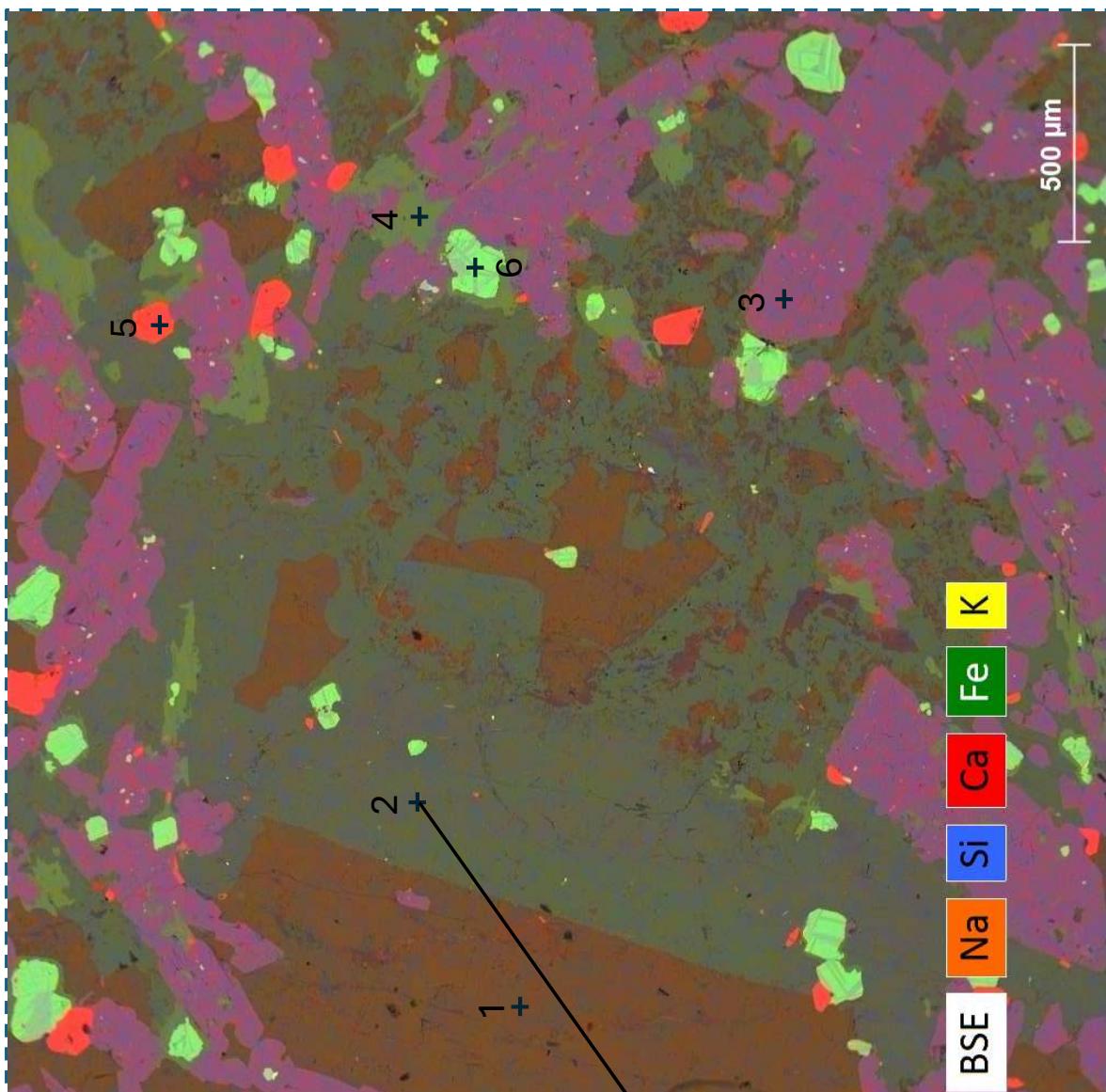


# MY-04

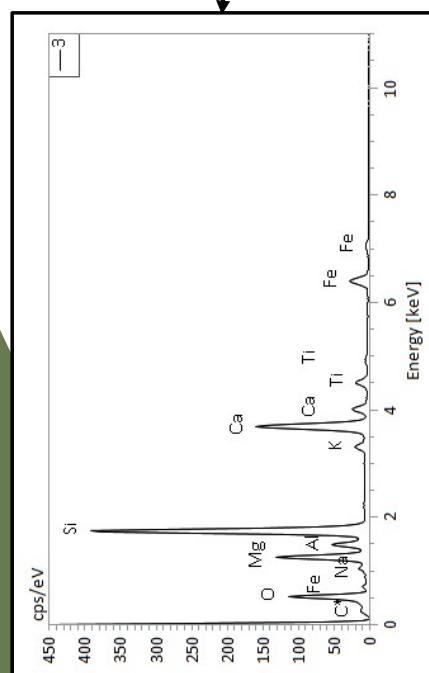
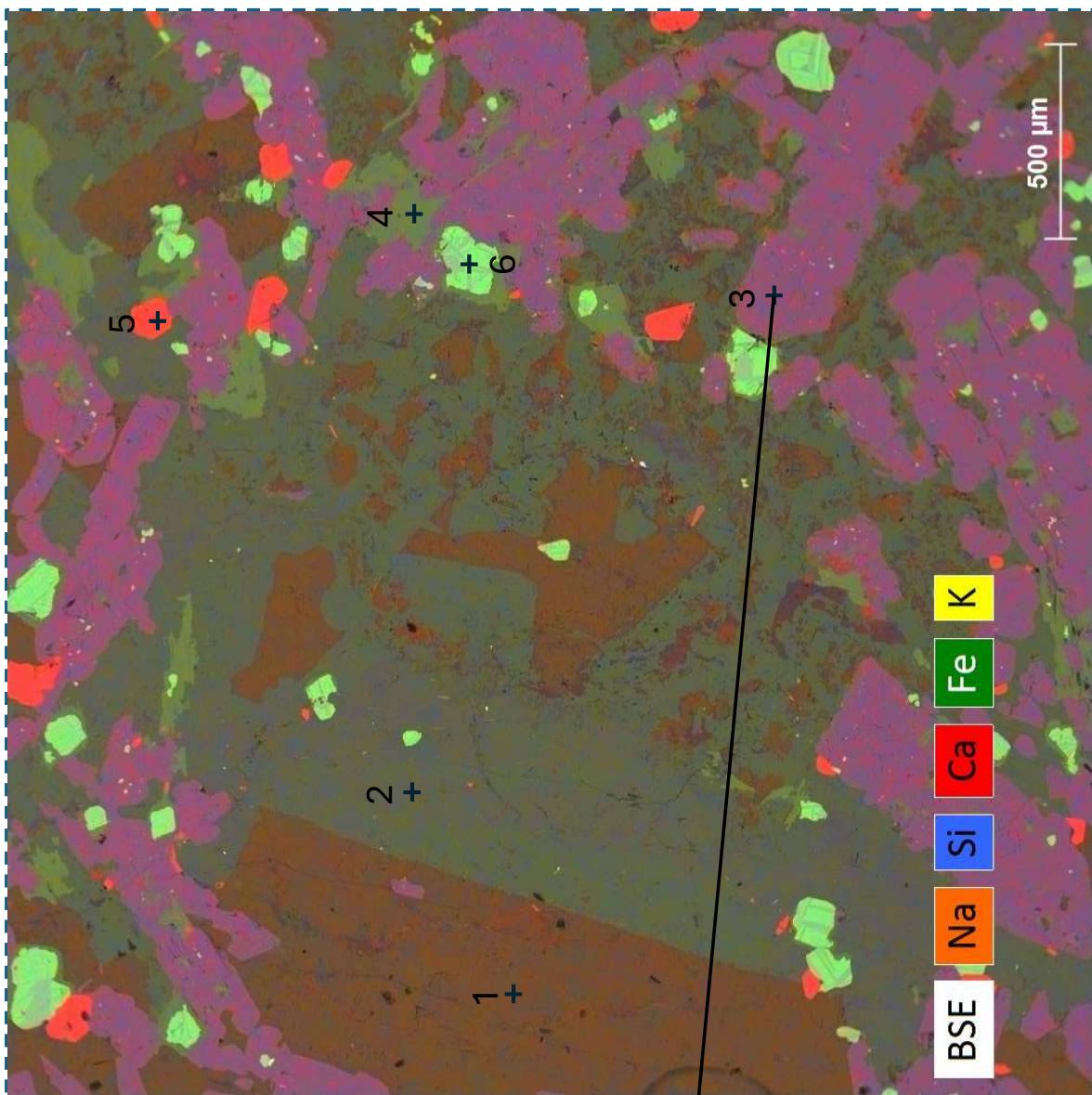
## FOTO B3



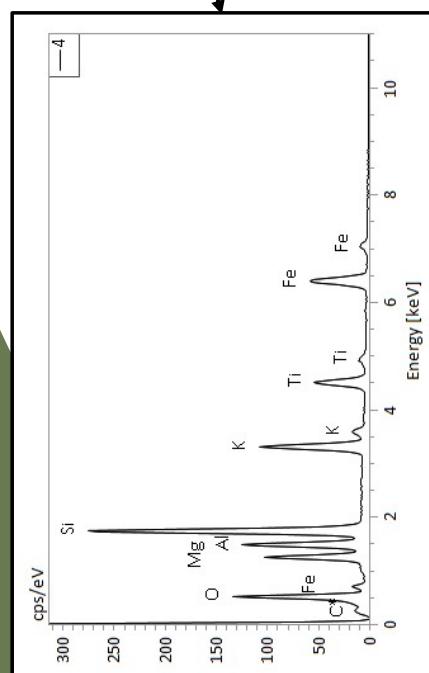
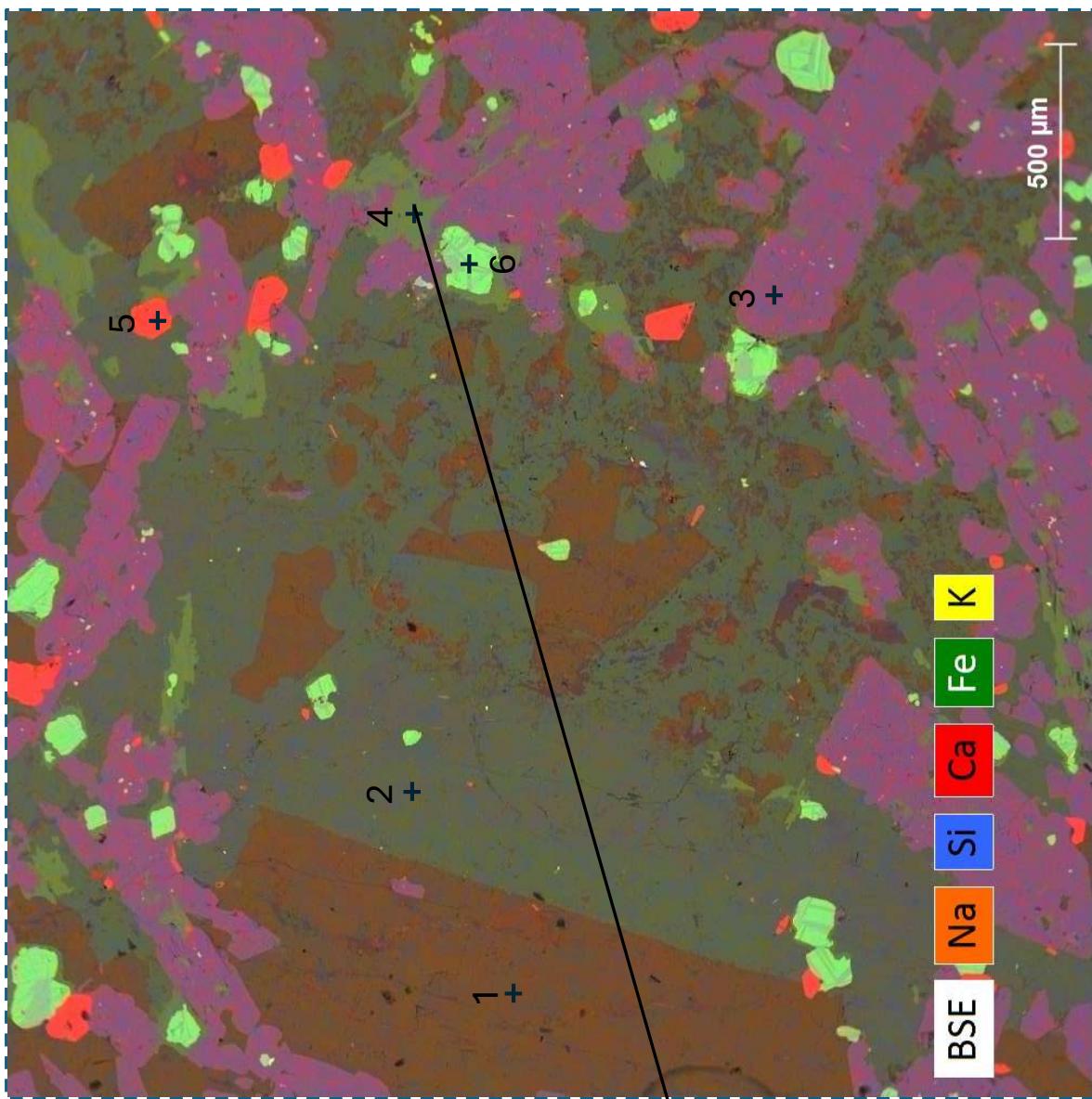




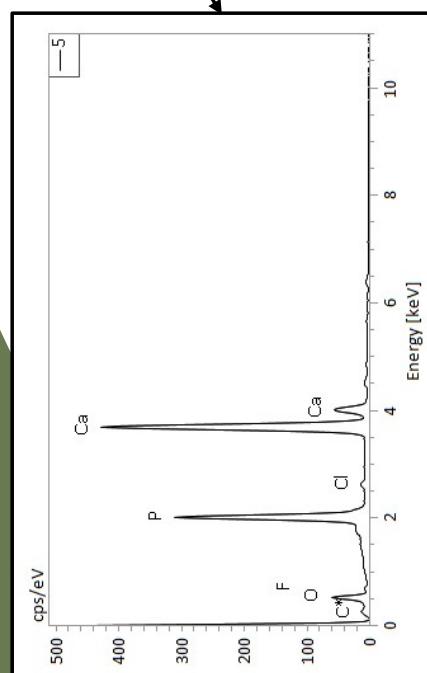
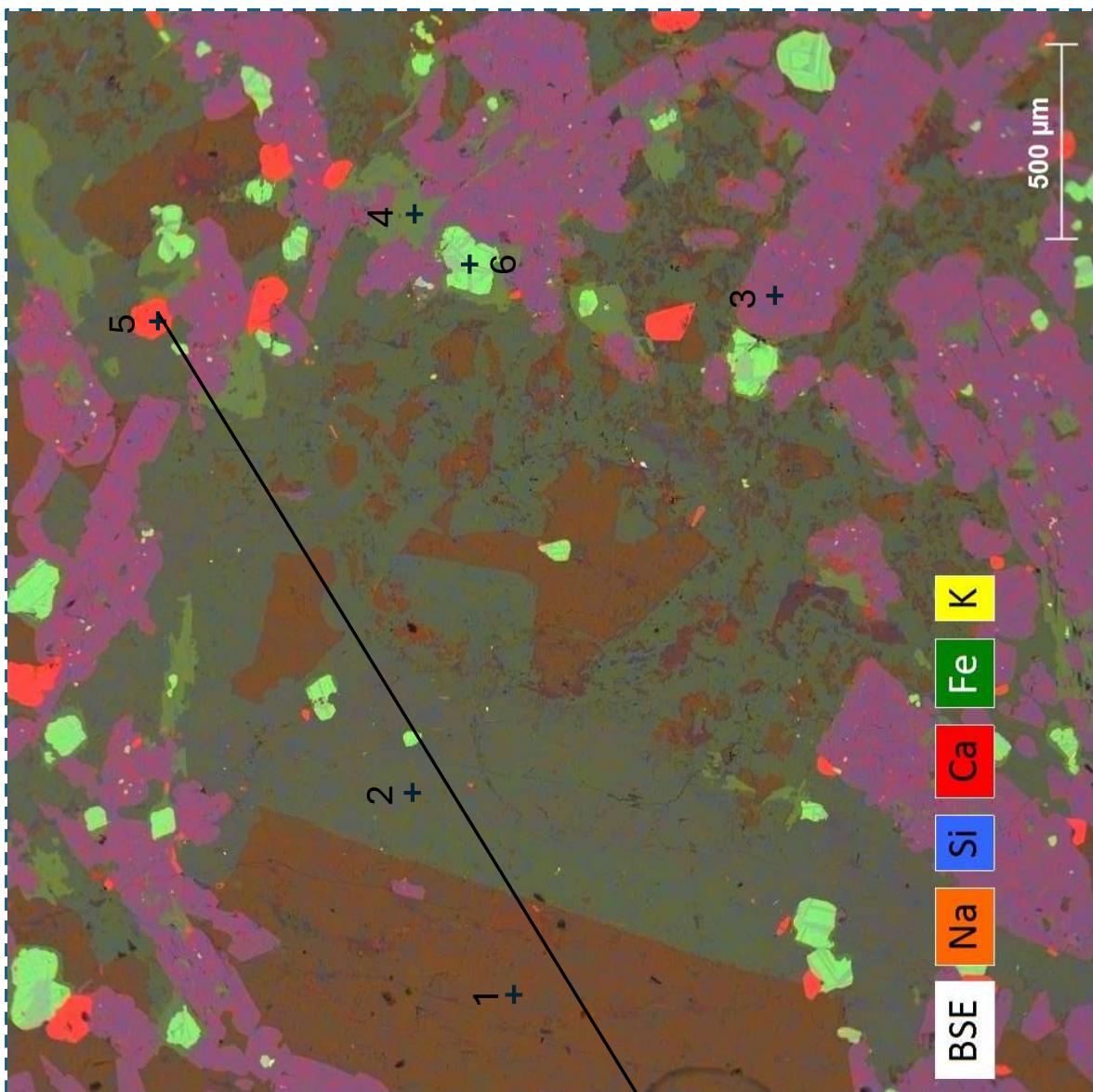
| Mineral    | Fórmula                           |
|------------|-----------------------------------|
| Ortoclásio | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> |



| Mineral | Fórmula  |
|---------|--|
| Augita  | $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ |



| Mineral | Fórmula   |
|---------|---|
| Biotita | $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$ |



| Mineral | Fórmula  |
|---------|--|
| Apatita | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ |

