



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA DE
CONCENTRADOS DE BATEIA DA REGIÃO CENTRO LESTE DA BACIA
RIO DO JEQUITINHONHA PARA PROSPECÇÃO DE LÍTIO**

Lucas Didacio Souza Brito

MONOGRAFIA nº 504

Ouro Preto, fevereiro 2024

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA DE
CONCENTRADOS DE BATEIA DA REGIÃO CENTRO LESTE DA
BACIA RIO DO JEQUITINHONHA PARA PROSPECÇÃO DE LÍTIO**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo M. S. Sampaio

Vice Chefe

Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves

MONOGRAFIA

Nº 504

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA DE CONCENTRADOS DE BATEIA DA REGIÃO CENTRO LESTE DA BACIA RIO DO JEQUITINHONHA PARA PROSPECÇÃO DE LÍTIO

Lucas Didácio Souza Brito

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Mariangela Garcia Praça Leite

Co-Orientador

Dr. Cassiano Costa e Castro

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/2.

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B862c Brito, Lucas Didacio Souza.

Caracterização mineralógica e geoquímica de concentrados de bateia da região centro leste da Bacia Rio do Jequitinhonha para prospecção de lítio. [manuscrito] / Lucas Didacio Souza Brito. - 2024.

66 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite.

Coorientador: Dr. Cassiano Costa e Castro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Pesquisa mineral. 2. Pegmatitos. 3. Sedimentos fluviais. 4. Lítio - Espodumenio. I. Leite, Mariangela Garcia Praça. II. Castro, Cassiano Costa e. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 552.322

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Didácio Souza Brito

Caracterização mineralógica e geoquímica de concentrados de bateia da região Centro Leste da Bacia Rio do Jequitinhonha para prospecção de lítio

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro geólogo

Aprovada em 15 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr. Cassiano Costa e Castro (Co-Orientador) - SGB-CPRM
Me. Flávia Compassi da Costa - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Edison Tazava - Universidade Federal de Ouro Preto

Filipe Giovanini Varejão, presidente do Colegiado de Engenharia Geológica, após aprovação da versão final pelos orientadores, autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Filipe Giovanini Varejão, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA GEOLÓGICA**, em 19/02/2024, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0669362** e o código CRC **634F7DA5**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, a professora Dra. Mariangela Garcia e Dr. Cassiano Castro, pela orientação valiosa, apoio incansável e pelo conhecimento que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigado pai por tudo que tem feito por mim e obrigado mãe por cuidar de tudo ai de cima, seu filho se formou. Sem vocês nada disso seria possível, sou feliz por ser o reflexo de vocês. Obrigado à minha família pelo seu apoio.

Agradeço a Bárbara Kattah, por todo companheirismo e suporte nessa etapa final do curso, sem seu amor, paciência e presença, com certeza essa jornada seria mais árdua ainda.

Às minhas amigadas que fiz durante essa jornada, que me apoiaram nos momentos difíceis e celebraram comigo nos momentos de conquista, meu sincero agradecimento. Seu apoio foi fundamental para manter minha motivação ao longo deste processo. Em especial a todos moradores que convivi da Republica Alfa 27, e aos amigos que sempre levarei comigo, Victor Andrade, Natan, Juliana, Charlysson, Caio Zamora, Julia, Pedro Lucas, Ana Clara, Caio Andrade, Luis Carlos, Fernando, Eduardo e Nicole, uma honra ter vocês comigo.

Gostaria de agradecer a equipe da GGM da CSN Mineração Casa de Pedra por todos ensinamentos e pela vivência nessa etapa final, em especial ao Derick, João, Rodrigo Lordão, Gustavo, Danilo, Petterson, Gilvana, Edson e todos os outros que também contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

Agradeço a SGB CPRM pelo apoio nessa pesquisa, disponibilizando a amostras e laboratórios para que pudesse ser possível o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos os participantes da pesquisa, cujas contribuições foram essenciais para a realização deste estudo. Agradeço a UFOP e seu departamento de Geologia pelo ensino de qualidade e todos os profissionais exemplares que pude admirar durante a graduação.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1. Apresentação	1
1.2. Localização.....	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Justificativa.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Lítio	4
2.2 A exploração de lítio	4
2.3 Pegmatitos	6
2.3.1 Principais minerais formadores de pegmatitos.....	9
2.4 Pegmatitos ricos em lítio	11
2.4.1 Principais minerais explotados para obtenção de lítio em pegmatitos LCT	12
CONTEXTO GEOLÓGICO.....	14
3.1. Orógeno Araçuai	15
3.2. Formação Salinas	15
3.3. Supersuíte G4	16
3.4. Campo Pegmatítico Itinga.....	18
MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1. Aquisição de dados e escolha das amostras	19
4.2. Análises laboratoriais	21
4.3. Análise com MEV-EDS	26
4.4. Análises de DRX.....	27
4.5. Análises e interpretação dos resultados.....	28
RESULTADOS.....	29
5.1 Espodumênio.....	29
5.2 Andaluzita	31
5.3 Petalita.....	34
5.4 Turmalina	35
5.5 Granada	38
5.6 Crisoberilo.....	40
5.7 Cassiterita.....	40
5.8 Scheelita	42
5.9 Xenotímio.....	43

5.10	Gahnita	44
5.11	Estaurolita	45
5.12	Apatita.....	46
5.13	Silimanita.....	46
5.14	Limonita.....	47
5.15	Ilmenita	48
5.16	Monazita	49
5.17	Proporção dos minerais por amostra	50
5.18	Possíveis áreas fonte dos minerais identificados	52
DISCUSSÕES.....		55
CONCLUSÕES		58
REFERÊNCIAS.....		59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização e acesso aos municípios deste trabalho, partindo da capital mineira. Modificado de: Google Maps.....	2
Figura 2.1 - Localização dos principais depósitos de lítio no mundo (Kesler <i>et al.</i> 2012). As cruzes azuis representam as salmouras e os quadrados vermelhos os pegmatitos.....	5
Figura 3.1 - Mapa litológico do Orógeno Araçuaí com delimitação da folha Itaobim do projeto Lítio (SGB – CPRM 2016) em vermelho, modificado de: Pedrosa-Soares A.C., (2022). Grafita (Sul da Bahia e Nordeste de Minas Gerais) e Lítio (Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG): Livro de campo de curso promovido pela ADIMB.....	14
Figura 3. 1 - Mapa litológico do da região do Campo Pegmatítico de Itinga (Borborema 2023).....	17
Figura 4. 1 - Fluxograma de metodologia aplicada na pesquisa.	19
Figura 4. 2 - Mapa litológico 1:100.000 da folha de Itaobim com a localização das amostras analisadas nesta pesquisa (Modificado de SGB - CPRM 2010).	20
Figura 4. 3 - A) Imagem do processo de separação magnética utilizando o imã de mão. B e C) Separação magnética utilizando o Frantz. D) Frações magnéticas de uma das amostras de concentrado de bateia estudada.	22
Figura 4. 4 - A) B) e C) Imagens do processo de separação em meio denso com o bromofórmio e D) grãos separados pelo bromofórmio, que apresentaram densidades superiores a 2.89g/cm ³	23
Figura 4. 5 - Imagens do processo de catação e registro dos grãos em lupa binocular. A) Grãos de minerais dispostos na placa, vistos pela lupa binocular. B) Grãos de minerais dispostos na placa sem o aumento da lupa. C) Lupa binocular com a câmera acoplada para registros fotográficos dos minerais.....	25
Figura 4. 6 - Imagens da pastilha com os grãos colados em fita de carbono.	26
Figura 5.1 - Imagem dos grãos de espodumênio em escala em lupa e sob o MEV, demarcado em vermelho a porção do grão de espodumênio analisado.....	28
Figura 5.2 - Difratoograma por Raios-x do grão de espodumênio.....	29
Figura 5.3 - Imagem dos grãos de andaluzita em aumento de 0.7X e 1.0X com fundo escuro.....	30
Figura 5.4 - Imagem dos grãos de andaluzita em MEV.....	30
Figura 5.5 - Difratoograma por raio-x das amostras CM001 (No 0726/23), CM002 (No 0123/23) e CM007 (No 0731/23) de andaluzita.....	31

Figura 5.6 - Imagem dos grãos de petalita em aumento de 1.5X.....	32
Figura 5.7 - Imagens dos grãos de petalita em MEV-EDS.....	33
Figura 5.8 - Imagem dos grãos de turmalina separados, em aumento de 3X.....	33
Figura 5.9 - Imagem dos grãos de turmalina no MEV.....	34
Figura 5.10 - Imagem das inclusões encontradas nos grãos de turmalina observadas no MEV.....	35
Figura 5.11 - Difratoograma de um dos grãos de turmalina (CM009).	35
Figura 5.12 - Imagem dos grãos de granada almandina em aumento de 1.5X	36
Figura 5.13 - Imagem das inclusões encontradas nos grãos de granada no MEV.....	36
Figura 5.14 - Imagem dos grãos de granada subedrico/euedrico em MEV.....	37
Figura 5.15 - Difratoograma de um dos grãos de granada (CM003).....	38
Figura 5.16 - Difratoogramas dos grãos de crisoberilo das amostras CM004 e CM005.....	39
Figura 5.17 - Imagem dos grãos de cassiterita em aumento de 4.5X.....	39
Figura 5.18 - Imagem dos grãos de cassiterita em MEV.....	40
Figura 5.19 - Imagem dos grãos de scheelita em aumento de 4.5X, com luz comum e fluorescente.....	40
Figura 5.20 - Imagens dos grãos de scheelita no MEV.....	41
Figura 5.21 - Imagens dos grãos de xenotímio em aumento de 4.5X e de um deles no MEV.....	41
Figura 5.22 - Imagem do grão de gahnita em aumento de 4.5X e no MEV.....	42
Figura 5.23 - Imagem dos grãos de estaurolita em aumento de 2X.....	43
Figura 5.24 - Imagens dos grãos de estaurolita no MEV.....	43
Figura 5.25 - Imagens dos grãos de apatita em aumento de 4.5X e a morfologia de um deles no MEV.....	44
Figura 5.26 - Imagens dos grãos de silimanita em lupa, aumento de 2X.....	45
Figura 5.27 - Imagens dos grãos de silimanita no MEV.....	45
Figura 5.28 - Imagens dos grãos de limonita em lupa com aumento de 1.5X e de um deles no MEV	46
Figura 5.29 - Imagens dos grãos de ilmenita em lupa com aumento de 3X e do maior deles no MEV.....	47
Figura 5.30 - Imagens do grão de monazita em lupa com aumento de 4.5X e no MEV.....	47

Figura 5.31 - Mapa dos concentrados de lítio e as sub-bacias do rio Jequitinhonha. (Modificado de SGB - CPRM 2010)	50
Figura 5.32 - Mapa dos concentrados e as sub-bacias do rio Jequitinhonha. (Modificado de SGB - CPRM 2010)	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Quadro de amostras com peso dos materiais por separação magnética.....	27
Quadro 5.2: Resultados químicos das análises no grão de espodumênio no MEV-EDS.....	28
Quadro 5.3: Resultados químicos das análises nos grãos de andaluzita em MEV-EDS.....	30
Quadro 5.4: Resultados químicos das análises nos grãos de petalita em MEV-EDS.....	32
Quadro 5.5: Resultados químicos das análises nos grãos de turmalina em MEV-EDS.....	34
Quadro 5.6: Resultados químicos das análises nos grãos de granada em MEV-EDS.....	37
Quadro 5.7: Resultados químicos das análises nos grãos de cassiterita em MEV-EDS.....	40
Quadro 5.8: Resultados químicos das análises nos grãos de scheelita em MEV-EDS.....	41
Quadro 5.9: Resultados químicos das análises de dois grãos de xenotímio no MEV-EDS.....	42
Quadro 5.10: Resultados químicos das análises nos grãos de gahnita em MEV-EDS.....	42
Quadro 5.11: Resultados químicos das análises dos grãos de estauroлита no MEV-EDS.....	43
Quadro 5.12: Resultados químicos das análises nos grãos de apatita em MEV-EDS.....	44
Quadro 5.13: Resultados químicos das análises nos grãos de silimanita em MEV-EDS.....	45
Quadro 5.14: Resultados químicos da análise do grão de limonita no MEV-EDS.....	46
Quadro 5.15: Resultados químicos da análise nos grãos de ilmenita pelo MEV-EDS.....	47
Quadro 5.16: Resultado químicos da análise nos grãos de monazita no MEV-EDS.....	48
Quadro 5.17: Proporção dos minerais pesados presentes em cada amostra.....	49

Resumo

Nas últimas duas décadas, a cadeia de exploração e produção de lítio tem experimentado um crescimento exponencial, aumentando a urgência da descoberta de novos depósitos. Uma abordagem fundamental na exploração mineral de uma bacia hidrográfica é a análise de seus sedimentos fluviais, incluindo a concentração de minerais por meio de bateia. Nesse contexto, o propósito deste estudo foi dar continuidade à pesquisa prospectiva em uma região reconhecida como detentora das maiores reservas potenciais de lítio do país - o Vale do Jequitinhonha. O objetivo central foi caracterizar a mineralogia e química mineral dos concentrados de bateia de dez amostras coletadas em drenagens da região de Itaobim (MG), centro-leste da bacia do rio Jequitinhonha, com um foco específico nos minerais litiníferos. Para alcançar o objetivo, uma série de atividades foram executadas: (i) Recuperação das amostras do acervo da Litoteca Regional de Caeté (SGB - CPRM); (ii) Preparação das amostras, incluindo peneiramento e pesagem; (iii) Separação dos minerais tanto em meio denso usando bromofórmio como por separação eletromagnética através do uso do equipamento Frantz; (iv) Identificação e descrição de minerais sob lupa binocular; (v) Caracterização da mineralogia por difratometria de raios-X; (vi) Descrição morfológica dos minerais sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) e (vii) Caracterização da química mineral com o auxílio de um MEV acoplado a um EDS (espectrômetro por energia dispersiva). Foram identificados 16 diferentes minerais, sendo dois litiníferos (espodumênio e petalita), estes reconhecidos em três das amostras. Destaque também para o xenotímio, caracterizado em uma das amostras, mineral de ítrio, possivelmente associado aos pegmatitos NYF, que ainda não havia sido descrito na região de estudo. Além disso, a avaliação espacial da distribuição dos demais minerais encontrados nas amostras não só corrobora a probabilidade de existirem pegmatitos NYF na região como aponta uma nova área de exploração onde nenhum pegmatito foi descrito até o momento. Os resultados obtidos mostraram que os concentrados de bateia quando analisados por técnicas tradicionais aliadas a técnicas mais modernas podem contribuir de forma efetiva para um melhor entendimento da geologia regional e para a exploração mineral.

Palavras-chave: pegmatitos, espodumênio, Araçuaí, pesquisa mineral, depósitos, sedimentos fluviais

Abstract

Over the last two decades, the exploration chain and lithium production has experienced exponential growth, increasing the urgency of discovering new deposits. A fundamental approach in mineral exploration of a watershed is the analysis of its fluvial sediments, including mineral concentration through panning. In this context, the purpose of this study was to continue prospective research in a region recognized as holder of the country's largest potential lithium reserves - the Jequitinhonha Valley. The central objective was to characterize the mineralogy and mineral chemistry of panning concentrates from ten samples collected in drainages of Itaobim region (MG), central-east of Jequitinhonha River basin, with a specific focus on lithium-bearing minerals. To achieve this objective, a series of activities were executed: (i) Recovery of samples from the collection of Regional Lithotheca of Caeté (SGB - CPRM); (ii) Sample preparation, including sieving and weighing; (iii) Mineral separation both in dense medium using bromoform and by electromagnetic separation through the use of Frantz equipment; (iv) Identification and description of minerals under a binocular microscope; (v) Mineralogy characterization by X-ray diffractometry; (vi) Morphological description of minerals under a scanning electron microscope (SEM) and (vii) Mineral chemistry characterization with the assistance of an SEM linked to an EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Sixteen different minerals were identified, with two lithium-bearing minerals (spodumene and petalite) recognized in three of the samples. Also emphasis to xenotime, characterized in one of the samples, a yttrium mineral, possibly associated with NYF pegmatites, which had not yet been described in the study region. Furthermore, the spatial evaluation of the distribution of the other minerals found in the samples not only corroborates the probability of NYF pegmatites existing in the region but also points to a new exploration area where no pegmatite has been described to date. The results obtained showed that panning concentrates, when analyzed by traditional techniques associated with more modern techniques, can contribute effectively to a better understanding of regional geology and mineral exploration.

Keywords: pegmatites, spodumene, Araçuaí, mineral research, deposits, fluvial sediments

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O lítio é considerado um dos elementos químicos estratégicos mais importantes para o avanço tecnológico das indústrias no século XXI (Gruber *et al.* 2011; Kesler *et al.* 2012; -Brasil 2021). Devido às suas características físico-químicas, em especial à sua boa condução, é muito utilizado na fabricação de baterias (Snyder *et al.* 2009; Schumann, 1988). Assim, acompanhando a evolução tecnológica dos aparelhos eletrônicos, carros elétricos, dentre outras novas tecnologias, a demanda pelo lítio é crescente, sendo alvo de investimentos em todo o mundo (Tahil, 2007; Yaksic e Tilton 2009; Gruber *et al.* 2011). A América do Sul, incluindo o Brasil, detém reservas em abundância destes recursos naturais, tornando o continente importante estrategicamente para a comercialização do lítio (Rodrigues e Padula 2017; USGS 2023). Segundo a USGS (2023), o Brasil produziu, em 2022 2.200 t, com reservas estimadas de 250.000 t.

Essa alta demanda pelo lítio faz com que aumente a busca por reservas desses recursos, incluindo os estudos geológicos acerca de novas áreas litíferas (Abe 2010). A região leste da bacia do Jequitinhonha vem apresentando potencial para o lítio devido ao seu contexto geológico, marcado pelo Distrito Pegmatítico de Araçuaí (Sá 1977), pertencente à chamada Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Paiva 1946; Pedrosa-Soares *et al.* 2011). Segundo Chaves e Dias (2022), a Companhia Brasileira de Lítio (CBL) explora espodumênio na Mina da Cachoeira (desde 1991) e a Sigma Lithium Mineração está dando início à exploração dos pegmatitos Xuxa e Barreiro (da antiga Arqueana Minérios e Metais).

O mapeamento geoquímico de sedimentos de corrente é um dos métodos mais utilizados na geoquímica de exploração, sendo sua confiabilidade preditiva evidenciada há muito tempo (Fletcher 1997). A importância dos sedimentos de corrente em campanhas de mapeamento geoquímico se deve especialmente, à complexidade genética desse material, considerados representativos da geologia a montante do ponto de amostragem na bacia hidrográfica (Spadoni *et al.* 2004). Isto torna os sedimentos aluvionares, em especial os concentrados de bateia, ideais

para uma exploração mineral regional e de baixo custo (Doherty *et al.* 2023). O uso da técnica dos concentrados pesados para prospecção de pegmatitos de lítio é interessante pois assim é possível compreender o conjunto dos minerais encontrados e realizar uma proporção mais assertiva dos minerais de lítio e caracterizar o tipo de pegmatito de interesse. Além de associar os minerais que ocorrem em conjunto dos minerais de lítio do local de prospecção, como o rubídio e o céσιο para avaliar o potencial do pegmatito (Paes *et al.* 2023).

Neste contexto, o presente trabalho objetivou a caracterização mineralógica e química de concentrados de bateia da região centro leste da bacia do rio Jequitinhonha para a prospecção de lítio, mais detalhadamente nos municípios de Itaobim, Itinga e Araçuaí (Distrito Pegmatítico de Araçuaí - DPA). Buscou-se definir os minerais presentes nos concentrados, dando um enfoque maior aos minerais litiníferos.

1.2. Localização

A área de estudo está localizada nos municípios de Araçuaí, Itinga e Itaobim, situados no médio vale da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, região nordeste do estado de Minas Gerais (figura 1.1).

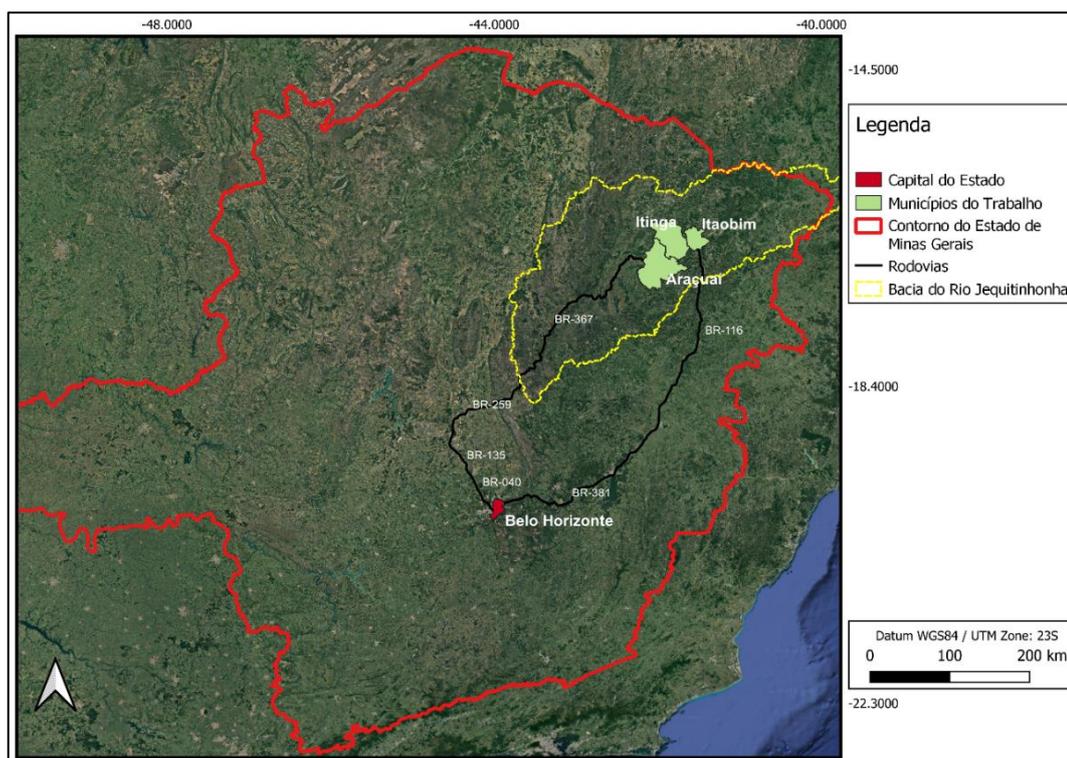


Figura 1.1: Mapa de localização e acesso aos municípios deste trabalho, partindo da capital mineira (Modificado de GoogleMaps).

A distância da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, até Araçuaí é de cerca de 678 km, 670 km até Itinga e 604 km até a cidade de Itaobim. As vias de acesso aos municípios incluem as rodovias BR-381, BR-367 e BR-116, passando pela cidade de Governador Valadares. O trajeto também pode ser feito pelas rodovias BR-040, BR-135 e BR-367, passando pela cidade de Curvelo próximo à rodovia BR-259 (figura 1.1).

1.3. Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo principal identificar os minerais (mineralogia e química mineral) presentes nos concentrados de bateia de pequenas drenagens (2ª ordem em sua maioria; *sensu* Strahler 1952; 1957), localizadas nos municípios de Araçuaí, Itinga e Itaobim.

1.4. Justificativa

Em função da demanda mundial crescente por minerais de lítio, que deverá se expandir ainda mais nas próximas décadas devido à sua utilização em produtos de alta tecnologia (Braga e Sampaio 2008), o Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos – CPPI, em sua Resolução CPPI Nº 126, de 10 de junho de 2020 (Brasil 2020), listou os bens minerais que podem habilitar um projeto de investimento em mineração para receber tratamento prioritário no âmbito do governo. Dentre eles está o lítio, indispensável nas baterias de celulares e carros elétricos (Chaves e Dias 2022). A SGB - CPRM (Serviço Geológico do Brasil), parceira nesta pesquisa, realizou campanhas e amostragem de sedimentos fluviais em todo território de Minas Gerais (coletados entre 2003 e 2004), incluindo concentrados de bateia. Essas amostras, armazenadas no Laboratório de Análise Mineral da Rede LAMIN-Caeté (SGB - CPRM), ainda não foram devidamente estudadas.

O melhor entendimento da composição mineral qualitativa e quantitativa dessas amostras trará não só uma utilidade prática no campo técnico/industrial, como contribuirá para um melhor entendimento da gênese desses minerais (Stendal e Theobald, 1994). Os resultados vão indicar quais os minerais estão presentes nos concentrados, sua química mineral e porcentagem em peso. Como alguns desses minerais podem ser farejadores da mineralização de lítio, novas mineralizações podem ser identificadas (Doherty *et al.* 2023). Com isso, outros estudos poderão ser iniciados a partir desses dados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lítio

Representado no quadro periódica pelo símbolo Li, com número atômico 3 e massa atômica de 6,939, o lítio é um elemento químico que pertence ao grupo 1 e ao segundo período, sendo um dos elementos menos densos com cerca de 0,5 g/cm³. Classificado como metal, o lítio é um excelente condutor de eletricidade, mole e altamente reativo, sendo o primeiro elemento do grupo dos metais alcalinos (De la Hoz e Martinez 2013)

Relativamente raro, o lítio tem sua abundância na crosta terrestre na ordem de 0,004% (Braga e Sampaio 2008), com um teor médio de 12ppm (Alecrim 1982). Apesar disso, o lítio tem muitos usos importantes na indústria, incluindo na produção de baterias recarregáveis, que são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, como *smartphones e laptops* (Rodrigues e Padula 2017). O lítio também entra na produção de medicamentos para transtornos bipolares, lubrificantes, ligas metálicas e em reatores nucleares (Braga e França 2013). Além disso, devido à sua alta reatividade, o lítio é usado como agente redutor em muitas reações químicas (Braga e Sampaio 2008).

2.2 A exploração de lítio

Os maiores produtores de lítio em 2022, segundo a USGS (2023), foram a Austrália (61.000 t), Argentina (6.200 t), Chile (39.000 t) e China (19.000 t). O Brasil (1.700 t em 2021 e 2.200 t em 2022; 16% e 17% aproximadamente da produção mundial, respectivamente) está incluído no conjunto de produtores de menor expressão, juntamente com Portugal, Estados Unidos, Canadá e Zimbábue (USGS 2023).

Atualmente, a obtenção do lítio advém principalmente de duas fontes: salmouras alcalinas ou salares (lagos ricos em sais, incluindo depósitos evaporíticos) e rochas pegmatíticas (Salomão 2020). Enquanto a exploração de salmouras se dá principalmente na Argentina, Chile

e China, a Austrália e o Brasil extraem seu lítio de minas em pegmatitos (USGS 2023). A figura 2.1 traz a localização dos principais depósitos de lítio e seus diferentes tipos.

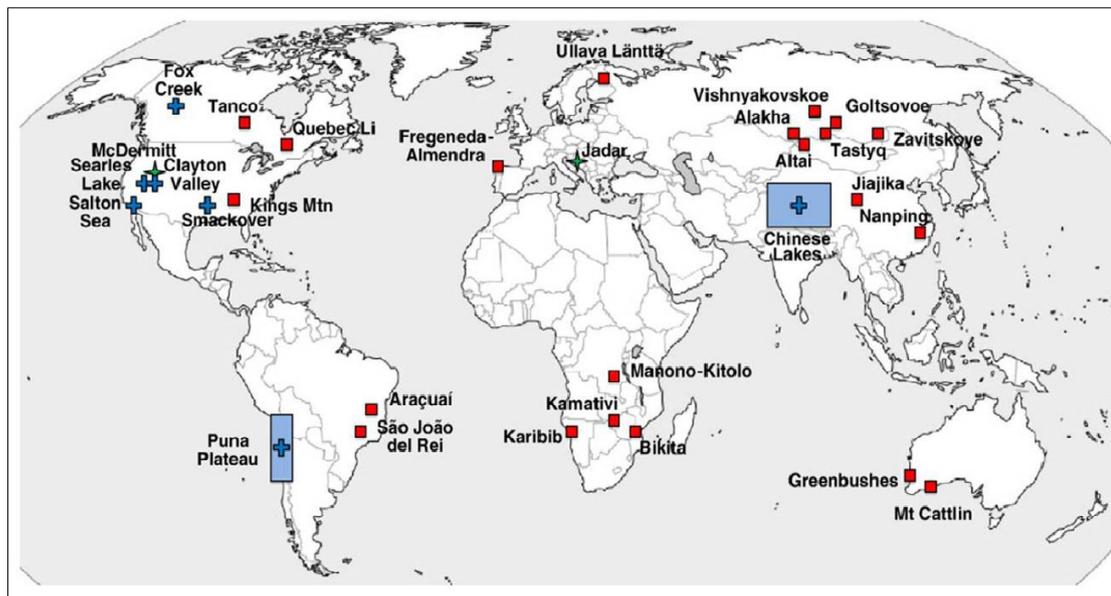


Figura 2.1 – Localização dos principais depósitos de lítio no mundo (Kesler *et al.* 2012). As cruzes azuis representam as salmouras e os quadrados vermelhos os pegmatitos.

Conforme mencionado por Flexer *et al.* (2018), aproximadamente 70% do lítio recuperado provém de salmouras, sistemas complexos que apresentam uma variação de concentração de sólidos dissolvidos totais entre 170 e 330 g L⁻¹. Os depósitos de lítio em salmouras ou salares são encontrados em bacias de drenagem endorreicas (Mendoza *et al.* 2015); na América do Sul, a maioria está geograficamente confinada ao segmento sudoeste da Bolívia – noroeste da Argentina – nordeste do Chile (entre 20° e 27° S), uma área informalmente chamada de “Triângulo do Lítio” (Grosjean *et al.* 2012; López e Salvi 2021). Esses depósitos se formaram por meio da retenção dos sais em suas bacias de drenagem, derivados de do intemperismo de rochas relacionadas à atividade vulcânica (Sarchi *et al.* 2023). A alta taxa de evaporação solar (Strecker *et al.* 2007), superior à taxa de precipitação, resulta em um enriquecimento dos elementos contidos nos evaporitos, como magnésio, sódio, potássio, lítio, iodo e boro, que são mantidos por mais de um milhão de anos (Braga e Sampaio 2008; López 2017; López e Salvi 2021).

O método predominante de extração de lítio a partir dessas salmouras é baseado na concentração por evaporação e precipitação de carbonato de lítio - o agente de precipitação mais amplamente utilizado - ou aluminato de lítio (Kogel 2006). Em comparação com os

processos de extração de minerais que contêm lítio, essa abordagem de extração se mostra mais econômica, apresentando um custo operacional reduzido em torno de 30% a 50% (Abe 2010).

Quando associado a pegmatitos, normalmente ligado a silicatos de alumínio, potássio, sódio e ferro, e pode ser encontrado em mais de 130 tipos de minerais, localizados em aproximadamente 1.000 depósitos desse tipo em todo o mundo (Kesler *et al.* 2012; Jiankang *et al.* 2015).

2.3 Pegmatitos

De acordo com Kemp (1924), o nome pegmatito foi proposto por Ababe Hauy em 1822, com objetivo de determinar a intercrescência dos grãos de quartzo e ortoclásio. O termo significa “amarrado ou estrutura cimentada” e deriva do grego e se refere aos cristais de quartzo que são retidos no feldspato como matriz (Kemp 1924). London (2008) caracteriza os pegmatitos como rochas ígneas e com composição granítica, porém diferenciados pelo tamanho dos seus grãos mais grossos.

Durante as décadas de 1970 e 1980, o modelo de gênese proposto por Richard Jahns era amplamente aceito (Simmons e Webber 2008). Esse modelo (Jahns 1955; 1982) defendia a ideia de que os pegmatitos evoluíam a partir de materiais graníticos residuais fundidos, compostos por vapor de água e materiais silicáticos em estado líquido. O modelo enfatiza a interação entre as fases fundidas e o vapor que resultava nas texturas dos pegmatitos. A transição do granito para o pegmatito, de acordo com o modelo de Jahns e Burnham (1969), ocorria no ponto de saturação do fluido H₂O. Adicionalmente, o modelo sugere que os pegmatitos se cristalizam a partir de sua borda em direção ao interior, o que é suportado por diversos fatores, incluindo estudos de geotermometria e a textura das estruturas em forma de pente, com cristais em formato de cunha orientados perpendicularmente às margens dos pegmatitos (Jahns e Burnham 1969). Nesse modelo, corpos menos diferenciados se situariam mais próximos ao granito. Essa diferenciação pode ser relacionada com a estabilidade termal da composição do magma (Černý 1991)

A formação de pegmatitos em crosta rasa ocorre por processos não equilibrados em uma ampla faixa de temperatura e pressão (Thomas *et al.* 2006). Segundo estes autores, as concentrações e a composição dos voláteis, incluindo a água, são os fatores mais importantes do sistema, pois afetam propriedades importantes do magma como pressão, viscosidade e difusividade. São essas propriedades que vão definir características importantes dos pegmatitos,

como por exemplo o tamanho dos minerais. O tamanho dos cristais não está relacionado à taxa de resfriamento do magma (Phelps *et al.* 2020). O crescimento dos grãos dos pegmatitos é diferente do desenvolvimento do tamanho dos grãos dos granitos que sofrem grandes influências pelo seu tempo de resfriamento do magma. Para Phelps *et al.* (2020), a água apresenta um maior impacto direto na formação dos pegmatitos pois diminui a taxa de viscosidade do fluido magmático, facilitando a sua percolação e então permitindo uma cristalização de grãos maiores em temperaturas mais baixas.

Ainda que grande porção dos pegmatitos tenha composição bastante semelhante à dos minerais observados nos granitos, os de maior interesse possuem minerais mais raros, como é o caso dos pegmatitos litiníferos (Dana e Hurlbut 1981). Há uma sequência da cristalização de minerais nesses pegmatitos, definida pelo tempo de geração, caracterizado primeiramente pela microclina e o quartzo e pequenas porcentagens de granada e turmalina preta. Em seguida, há uma substituição destes minerais e ocorrem a albita, lepidolita, berilo, espodumênio, turmalina gemológica, além de minerais mais raros como a columbita, monazita e alguns minerais de urânio (Klein e Dutrow 2012).

Para melhor entendimento, alguns autores tentaram determinar as classificações dos pegmatitos, por exemplo Landes (1933) classificou os pegmatitos pela sua composição mineralógica global, definindo-os como pegmatitos ácidos, básicos e intermediários. Os pegmatitos ácidos sendo constituídos por minerais raros de lítio, rubídio, berílio, céσιο, tântalo, nióbio e terras raras, além do quartzo, micas e feldspatos alcalinos. Os pegmatitos básicos, de natureza máfica, constituídos por minerais como piroxênio, olivina e plagioclásio cálcico, enquanto os pegmatitos intermediários são aqueles que apresentam mineralogia comum aos ácidos e básicos. Cameron *et al.* (1949) dividiram os pegmatitos em homogêneos e heterogêneos, sendo o primeiro definido como pegmatitos que possuem textura uniforme, enquanto os pegmatitos heterogêneos apresentam diversificado grau de diferenciação mineralógica e por apresentarem estrutura zonada definida pela assembleia mineral e textural.

Há também a classificação definida pela geoquímica, elaborada por Ginsburg *et al.* (1979; 1984), na qual os pegmatitos se dividem em quatro ambientes crustais de formação (quatro classes), são eles:

- pegmatitos abissais - de ambientes de alto grau metamórfico, são corpos autóctones e localmente enriquecidos em tório, urânio, molibdênio, zircônio, nióbio e ETR;

- pegmatitos moscovíticos - de ambientes de metamorfismo barrowiano de alta pressão e encaixados em micaxistos (Winkler 1977), apresentam como minerais principais muscovita e feldspato potássico e como acessórios minerais ricos em lítio, urânio, berílio, tântalo e elementos terras raras (ETR).
- pegmatitos enriquecidos de elementos raros - de metamorfismo do tipo abukuma, ocorrem encaixados em rochas de fácies xisto verde e anfibolito; e
- pegmatitos miarolíticos - de ambientes epizonais a subvulcânicos, encaixados em rochas de baixo grau metamórfico.

Modificando a classificação de Ginsburg *et al.* (1979; 1984), Černý, (1991) e Černý e Ercit (2005) reclassificaram os pegmatitos enriquecidos de elementos raros, os subdividindo em três famílias

- pegmatitos NYF (nióbio, ítrio e flúor) - apresentam composição ácida, são enriquecidos em nióbio, ítrio e flúor e são provenientes dos granitos interiores e de origem anorogênica (London 2008);
- pegmatitos LCT (lítio-césio-tântalo) - possuem os granitos tipo-S em sua família, e apresentem um enriquecimento de lítio, césio e tântalo, proveniente das fusões de rochas metassedimentares (London 2008),
- pegmatitos mistos - apresentam composição mista, com características dos pegmatitos NYF e LCT.

Wise *et al.* 2022 propuseram uma nova classificação para os pegmatitos os dividindo em 3 grandes grupos definido por sua assembleia mineral, onde cada grupo era separado por sua associação mineral dos acessórios geradores das rochas. O grupo 1 normalmente enriquecido em Li, Cs, Rb, Be, Ga, Ta e Sn e acessórios de Nb, P, F e B, tendo sido subdividido em três tipos como berilo e fosfato, espodumênio e petalita e lepidolita e elbaíta. O grupo 2 apresenta comumente uma composição de K-feldspatos e quartzo, e como acessórios o grupo possui magnetita, hyalita, titanita, helvita, fluorita, epídoto e zircão. O grupo 3 dos pegmatitos de natureza peraluminosos e são compostos de quartzo, plagioclásio e K-feldspatos, e tem os acessórios como biotita, granada, muscovita e turmalina, além de poderem apresentar silimanita, cianita e andaluzita associados crisoberilo e berilo e também dumortierita, werdingnita, grandidierita e boralsilita. E esses grupos são divididos por sua genética magmática, magmas residuais de magmatismo granítico e produtos direto de anatexia (Wise *et al.* 2022).

2.3.1 Principais minerais encontrados em pegmatitos

2.3.1.1 Quartzo (SiO₂)

De hábito prismático, o quartzo é caracterizado por suas fraturas conchoidais, brilho vítreo e incolor, impurezas podem alterar sua cor (Schumann 1988). Considerado um dos minerais de compostos químicos mais puros, com porções quase igualadas de Si e O, o quartzo é um dos minerais mais comuns e abundantes no planeta (Dana e Hurlbut 1981). O quartzo em pegmatitos pode atingir tamanhos decimétricos a métricos dentro das cavidades pela solidificação do magma (London 2008). Segundo Guzzo (2008), sua cristalização ocorre após a solidificação dos feldspatos e silicatos hidratados a uma temperatura por volta de 1000°C (Černý 1991).

2.3.1.2 Feldspatos (K, Na, Ca) (Si, Al)₄ O₈

Os feldspatos podem ocorrer como ortoclásio e também como o plagioclásio (Dana e Hurlbut 1981), de coloração branca a cinza majoritariamente, apresentam dureza 6 na escala de mohs e brilho vítreo (Klein e Dutrow 2012). Os ortoclásicos, podem se apresentar como cristais romboédricos, tabulares e prismáticos, enquanto o plagioclásio pode ser encontrado em hábitos tabulares e prismáticos (Schumann 1988). Os feldspatos se cristalizam em altas temperaturas, por volta de 1000°C (Guzzo 2008), sendo importantes para estudar a evolução da cristalização do pegmatito, por se apresentar em todas as suas zonas (Barbosa 2021), além de gerar também juntamente com o quartzo e as micas um isolante térmico que permite a cristalização de grandes cristais (Černý 1991).

2.3.1.1 Granada (Mg⁺², Fe⁺², Mn⁺²)₃Al₂Si₃O₁₂Ca₃(Fe⁺³, Al⁺³, Cr⁺³)₂Si₃O₁₂

A granada pertence ao grupo dos silicatos, de hábito dodecaédrico, fratura conchoidal e brilho vítreo (Dana e Hurlbut 1981). Suas propriedades físicas e sua diversidade de cores são determinadas por sua composição química, com as principais variações de subespécies devida aos elementos chamados "chave" (Klein e Dutrow 2012): o magnésio para o piropo, o ferro para a almandina, manganês para a essartita, e o cálcio para grossulária, andradita e uvarovita. Ocorre em rochas metamórficas de médio-alto grau, granitos e pegmatíticos (Schumann 1988). A granada é considerada como parte da mineralogia acessória nos pegmatitos e se forma na zona intermediária dos pegmatitos juntamente com a turmalina Schorl, em meio a cristalização dos feldspatos, com o aumento de voláteis. (Souza 1999)

2.3.1.4 Turmalina (Na, Ca)(Fe⁺², Mg, Li, Al)₃(Al,Fe⁺³)₆(Si₆O₁₈)(Bo₃)₃OH₃(F, O, OH)

Mineral hexagonal, comumente em cristais prismáticos e estriado em seu eixo vertical, de brilho vítreo a resinoso (Schumann 1988). Apresenta como características diagnósticas seus triângulos arredondados e fraturas conchoidais (Pellant e Pellant 2021). A turmalina é um mineral composto principalmente por boro, alumínio e silício. É considerado o único mineral gemológico que pode ocorrer em todas tonalidades e cores, além de cristais multicoloridos (Dana e Hurlbut 1981). A turmalina pode ser considerada um mineral comum, com ocorrências registradas em diversos locais do planeta (Schumann 1988). Há algumas localidades com grandes depósitos, em países como Brasil, no estado de Minas Gerais e Bahia, Moçambique, Namíbia e Madagascar (Klein e Dutrow 2012). A turmalina nos pegmatitos ocorre quando há um aumento de voláteis, comumente presente na zona intermediária dos pegmatitos, sua cristalização é concomitante à solidificação das granadas (Souza 1999).

2.3.1.5 Muscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂)

Mineral monoclinico, comumente tabular; apresenta clivagem perfeita que caracteriza suas placas muito finas em forma de folhas flexíveis e de fácil deslocamento (Schumann 1988). A muscovita possui brilho vítreo a sedoso, é incolor e transparente, exceto quando se apresenta em blocos espessos e translúcidos, onde traz tons acastanhado a esverdeado (Pellant e Pellant 2021). A sua principal ocorrência é associada a quartzos e feldspatos, nos granitos e pegmatitos graníticos (Klein e Dutrow 2012), que variam de concordantes a discordantes em relação às rochas encaixantes, como xistos e gnaisses. (Černý 1991).

2.3.1.6 Biotita (K(Mg, Fe)₃(AlSi₃O₁₀)(OH)₂)

A biotita é um mineral monoclinico, geralmente de forma irregular e foliada, com clivagem perfeita e folhas flexíveis (Schumann 1988). De coloração comumente marrom e preta, possui pleocroísmo em tons de marrom ou verde, dependendo de sua composição (Pellant e Pellant 2021). Além de serem formadas em diversos ambientes geológicos, são geralmente encontradas em rochas ígneas como pegmatitos graníticos a peridotitos, e podem também ocorrer em rochas metamórficas (Klein e Dutrow 2012). As biotitas, assim como as turmalinas negras e as granadas, ocorrem como minerais acessórios nos pegmatitos, devido ao aumento dos voláteis durante a cristalização do magma (Barbosa 2021).

2.3.1.7 Berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_8$)

O berilo ocorre como cristais hexagonais transparentes, de hábito prismático e brilho vítreo (Pellant e Pellant 2021). É comumente diagnosticado por suas cores, que são determinantes para diferenciar suas variedades (Schumann 1988). A ocorrência do berilo é comum em rochas graníticas e em pegmatitos ricos em Be. O berilo verde é aquele com maior valorização de mercado, a esmeralda. O berilo azul também apresenta um alto valor, conhecido como água-marinha. Há outras variedades de berilo, como a morganita de coloração rosa, o heliodoro de cores amareladas e a goshenita que é incolor (Klein e Dutrow 2012). O berilo assim como o espodumênio é solidificado na zona intermediária, devido ao enriquecimento dos elementos saturados das micas, quartzos, feldspatos e da água e dos voláteis. (Barbosa 2021)

2.3.1.8 Andaluzita (Al_2SiO_5)

A andaluzita possui brilho vítreo, transparente a translúcida, com coloração branca a castanho avermelhado, dependendo de sua pureza (Klein e Dutrow 2012). É um mineral ortorrômbico, marcada pelos seus prismas quase quadrados e sua dureza acima de 7. Comumente em paragênese com a cordierita, micas e a granada, a andaluzita é formada geralmente em zonas de contato de intrusões ígneas com rochas ricas em alumínio (Pellant e Pellant 2021). Nos pegmatitos a andaluzita pode ser formar a partir da fusão parcial de material pelítico no meio da crosta superior, quando há condições de saturação de água no magma (Clarke *et al.* 2005).

2.4 Pegmatitos ricos em lítio

Segundo Grew (2020), os minerais contendo Li ocorrem principalmente em pegmatitos graníticos LCT (lítio-césio-tântalo). Os pegmatitos LCT são, em graus variados, peraluminosos, ou seja, sedimentares (S), ígneos (I) ou mistos tipo S + I (Černý 1991; Černý e Ercit 2005). A natureza peraluminosa desses pegmatitos é determinada pela a presença de muscovita, turmalina, granada e por vezes andaluzita, gahnita e topázio (Černý 1991)

Durante os estágios iniciais da cristalização do magma, o lítio é concentrado no magma residual (Braga e Sampaio 2008). A gênese dos pegmatitos LCT, no entanto, ainda não foi totalmente esclarecida. Se por um lado, muitos pesquisadores os consideram típicos para configurações de espessamento crustal, com subducção e colisão continental (Grew 2020), outros cientistas defendem a necessidade de rochas geradoras ricas em mica que tenham não

tenham sido fundidas, independente do regime tectônico (Černý *et al.* 2012). Os pegmatitos LCT, além do lítio, céσιο e tântalo apresentam também enriquecimento em outros elementos como berílio, boro, flúor, estanho, rubídio, gálio, háfnio e manganês. (Černý e Ercit 2005; Schulz *et al.* 2017).

A presença da assinatura de lítio nesta família de pegmatitos é evidenciada pela presença de minerais como o espodumênio e a petalita, e, de forma menos frequente, de amblygonita-montebrazita e lepidolita (Dias 2015). O lítio abundante nos pegmatitos LCT ocorre derivado da fusão parcial envolvida nos processos de formações dos pegmatitos. Durante a fusão térmica das micas, o lítio assim como céσιο e tântalo são concentrados nos pegmatitos, favorecidos pela sua incompatibilidade nas reações das micas, tornando-os como residuais do processo (Barbosa 2021).

2.4.1 Principais minerais explotados para obtenção de lítio em pegmatitos LCT

2.4.1.1 Espodumênio (LiAl(Si₂O₆))

O espodumênio é um dos principais minerais de lítio. Este inossilicato da família dos piroxênios é responsável por mais de 50% da produção mundial (Braga e Sampaio 2008). De coloração variando entre branca, incolor, amarela castanha e verde, o espodumênio possui brilho vítreo e são comumente tabulares (Schumann 1988). O mineral apresenta dureza entre 6 e 7, além de densidade de 3,15 g/cm³ (Klein e Dutrow 2012).

O espodumênio de variedade transparente é utilizado como gema, principalmente com as duas variações como a kunzita de coloração comumente lilás e a hiddenita com coloração verde (Dana e Hurlbut 1981). As gemas do espodumênio são caracterizadas pelo seu pleocroísmo intenso (IBGM 2009). Černý (1991) cita que a partir dos processos hidrotermais com soluções de Fe, Cr e Mn, as cores das variedades gemológicas são determinadas enquanto cristalizam nas cavidades dos pegmatitos.

A extração do lítio a partir do espodumênio envolve um processo de beneficiamento que inclui trituração, moagem, flotação e calcinação. O lítio é então extraído do concentrado calcinado por meio de processos hidrometalúrgicos, como a lixiviação com ácido sulfúrico (Vargas *et al.* 2012).

2.4.1.2 Petalita ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$)

A petalita se trata de um silicato de lítio considerado raro, e ainda que seja um mineral menos comum do que o espodumênio, é uma importante fonte de lítio e explorada em alguns locais ao redor do mundo como Austrália, Canadá, Zimbábue e Portugal (Roskill 2006). A petalita apresenta hábito tabular, coloração branca a incolor, geralmente translúcida e possui fraturas conchoidais (Dana e Hurlbut 1981). A densidade da petalita é de $2,41 \text{ g/cm}^3$ (Klein e Dutrow 2012).

A petalita é encontrada em rochas ígneas e metamórficas, geralmente de alta temperatura, associada ao quartzo, feldspatos e outros minerais de lítio (Klein e Hurlbut 1985). Além de seu uso na produção de lítio, a petalita é usada na fabricação de cerâmica, vidro e como um fundente em processos metalúrgicos.

2.4.1.3 Lepidolita ($\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si}, \text{Rb})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$)

A lepidolita é um filossilicato complexo, que contém lítio em sua estrutura cristalina, juntamente com outros elementos como alumínio, silício e potássio (Klein e Hurlbut 1985). Este silicato apresenta coloração branca a rosa e possui hábitos que variam desde maciços a agregados folheados e agregados botroidais (Dana e Hurlbut 1981). A lepidolita que é encontrada geralmente em veios pegmatíticos associados a outros minerais de lítio apresenta densidade de $2,90 \text{ g/cm}^3$, clivagem perfeita e sua dureza varia entre 2,5 e $3,5 \text{ g/cm}^3$ (Klein e Dutrow 2012).

Além de sua importância como fonte de lítio, a lepidolita, como a petalita, é também usada na fabricação de cerâmica e vidro e como um mineral de decoração (Braga e Sampaio 2008). A cor roxa da lepidolita é muito apreciada pelos colecionadores de minerais (Klein e Dutrow 2012)

CAPÍTULO 3

CONTEXTO GEOLÓGICO

A região de estudo está localizada no chamado “Distrito Pegmatítico de Araçuaí” (DPA), situado dentro do contexto do Orógeno Araçuaí (figura 3.1; Pedrosa Soares *et al.* 2001). O DPA tem como principais litologias os granitos (supersuíte granítica G4) e xistos (Formação Salinas). Os granitos apresentam formas de corpos discordantes da orientação dos xistos, comumente arredondados, de granulação média e textura majoritariamente equigranular, por vezes porfirítica devido aos cristais idiomórficos de microclima (Sá e Svisero 1976). Já os xistos possuem granulação fina e são constituídos por quartzo e biotita, além de minerais acessórios representados por granada e andaluzita (Pedrosa Soares *et al.* 1987; Dias 2015).

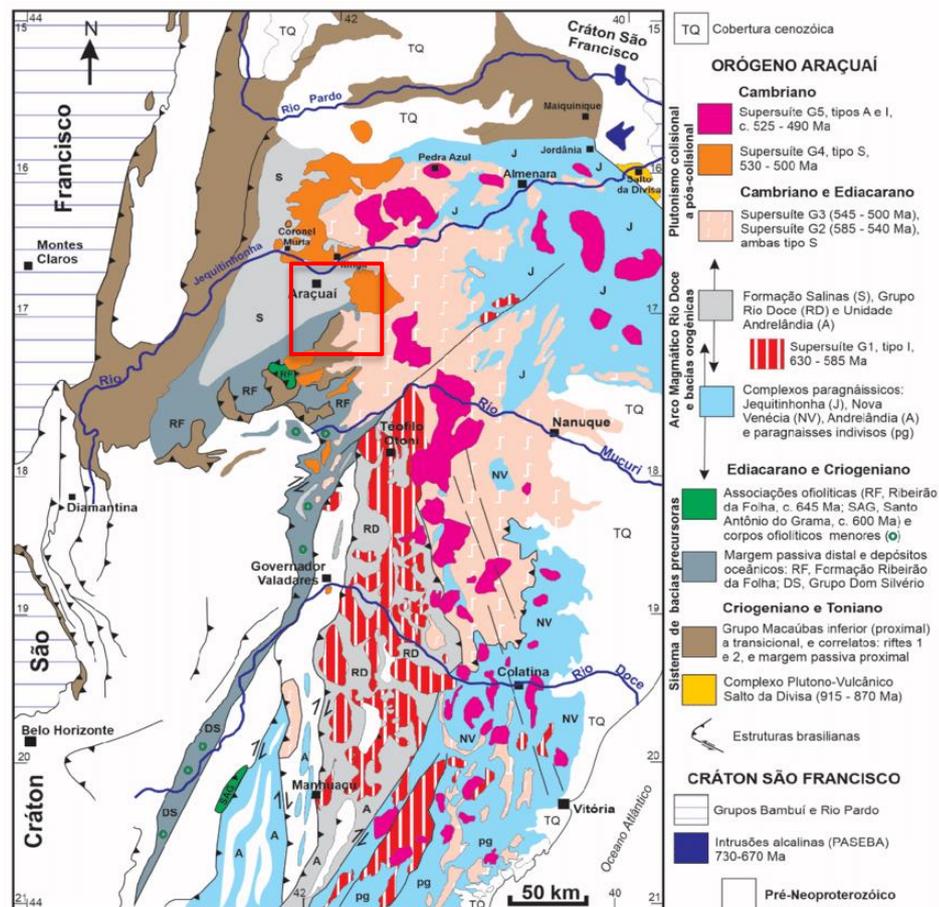


Figura 3.1 - Mapa litológico do Orógeno Araçuaí com delimitação da folha Itaobim do projeto Lítio em destaque com o quadrado vermelho (modificado de: Pedrosa-Soares A.C., (2022)).

3.1. Orógeno Araçuaí

Localizado entre a margem continental leste brasileira e o Cráton São Francisco (Pedrosa-Soares *et al.* 2001), o Orógeno Araçuaí é caracterizado por duas seções: o cinturão Araçuaí composto por dobramentos do tipo *fold-thrust belt* e o núcleo cristalino definido pela presença de granitos neoproterozoicos e rochas metamórficas de alto grau (Almeida 1977; Fischel *et al.* 1998). Devido ao seu núcleo cristalino associado aos granitos, o Orógeno Araçuaí é reconhecido pelos seus depósitos de gemas, como os depósitos de berilo e turmalinas, além dos diamantes da Serra do Espinhaço (Dardenne e Schobbenhaus 2003).

O Orógeno Araçuaí teve sua evolução definida em cinco estágios (Alkmim *et al.* 2003, 2006), iniciando pela abertura da bacia Macaúbas pelo processo de rifteamento do continente São Francisco-Congo entre 957 e 880 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2007).

A seguir, o processo de fechamento da bacia Macaúbas, denominado de "quebra-nozes" por Alkmim *et al.* (2006), foi interpretado por Seer *et al.* (2001) como um reflexo indireto da colisão da Península São Francisco com a placa Paraná ou Rio de La Plata, ocorrida por volta de 630 Ma.

A segunda fase desse fechamento ocorreu com o início do processo de subducção e a formação do arco magmático cálcio-alcalino entre 630 e 585 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2011). Nesse momento, iniciou-se a deposição dos sedimentos da Formação Salinas na porção norte da bacia (Lima *et al.* 2002).

A fase colisional ocorreu entre 580 e 560 Ma, esse processo culminou na geração dos granitos G2, formados a partir da fusão parcial da raiz desse cinturão orogênico de composição aluminosa (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007).

A fase final da evolução deste orógeno foi marcada pelo colapso gravitacional, que resultou na formação da Zona de Cisalhamento Chapada Acauã. Essa fase, com idades aproximadas entre 520 e 490 Ma, gerou as supersuítas graníticas G4 e G5, originadas a partir da fusão crustal e mantélica devido a uma descompressão adiabática (Pedrosa-Soares *et al.* 2011; Gradim *et al.* 2014).

3.2. Formação Salinas

A Formação Salinas é formada por metaconglomerados, meta-arenitos e metapelitos (Santos *et al.* 2009). Os metaconglomerados são os menos comuns, se apresentam como lentes métricas a decimétricas, são clasto-suportados, em sua maioria, e com escassa matriz constituída por quartzo, biotita, muscovita e plagioclásio (Paes *et al.* 2010). Os metapelitos são

representados por quartzo-mica xistos, observados próximo ao Grupo Macaúbas a oeste e próximo às supersuítas graníticas a leste (Lima *et al.* 2002). Os meta-arenitos representam a maior porção dessa formação e se apresentam como pacotes homogêneos com até 30 metros de espessura, possuem também estruturas sedimentares, como laminações e acamamento plano-paralelos (Costa 2018).

3.3. Supersuíte G4

A supersuíte granítica G4 foi classificada por Sá (1977) como granitos com biotita e muscovita com concentrações consideráveis de Cs, Li e Be, diferentemente dos granitos considerados normais de crosta. Esse autor associa os granitos aos pegmatitos mineralizados na região. Esses corpos intrusivos estão principalmente associados às formações Ribeirão da Folha e Salinas (Sá 1977).

A supersuíte G4, que pertence ao tipo S de granitogênese, composta principalmente por granitos a duas micas biotita e muscovita (Paes *et al.* 2010). Em algumas áreas, é possível encontrar cúpulas de granito pegmatóide ou raízes de biotita granito preservadas (Pedrosa-Soares *et al.* 2011). Esses granitos pegmatóides são descritos por porções de magma rico em fluidos residuais provenientes da cristalização fracionada, sendo esse mesmo magmatismo o formador dos corpos mineralizados do campo pegmatítico (Paes *et al.* 2010).

A granitogênese G4 ocorreu em um período compreendido entre 535 e 500 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2007).

Associado a fase pós colisional do Orógeno Araçuai está o Granito Teixeira (Figura 3.2) que é subdividido em três fácies (Paes *et al.* 2010), a fácies 1 com área de 350km² composta majoritariamente de monzogranito a 2 micas (biotita e muscovita), e com turmalina negra, granada e apatita como minerais acessórios. (Morais 2017). A fácies 2 é semelhante a fácies 1 considerando os mesmos minerais, monzogranito a 2 micas (biotita e muscovita), porém apresentando uma maior proporção de turmalinas negras, ocorrendo normalmente em veios pegmatíticos tabulares e corresponde a uma área de 45km² (Morais 2017). Sua fácies 3 é nomeado como turmalina monzogranito pegmatítico, ocorre em uma área de 1km² e em sua proporção a granada e a biotita são localizadas em porções menores que 1%. (Paes *et al.* 2016). A figura 3.2 traz a localização das principais ocorrências de lítio na região do CPI.

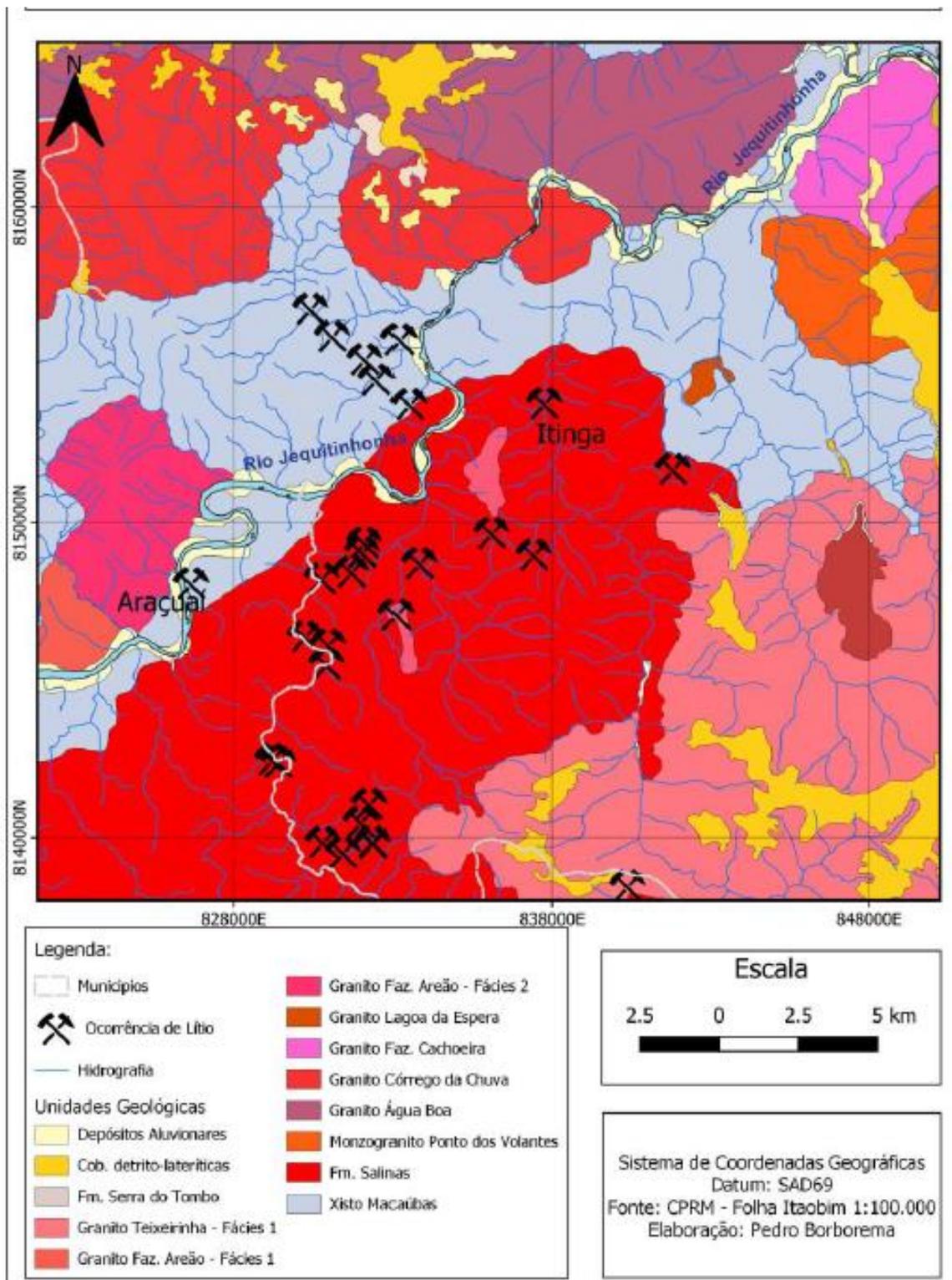


Figura 3. 2 Mapa litológico da região do Campo Pegmatítico de Itinga (Borborema 2023).

3.4. Campo Pegmatítico Itinga

Localizado na região sul do Distrito pegmatítico de Araçuaí (Correia Neves *et al.* 1986), o Campo Pegmatítico Itinga (CPI) é composto por corpos zonados e por corpos homogêneos de dimensões de metros a dezenas de metros de largura. Neste campo pegmatítico há a ocorrência de corpos residuais de granitos intrusivos da supersuíte G4, em rochas hospedeiras definidas como biotita xistos com variações percentuais locais de cordierita, sillimanita, andaluzita (Sá 1977). Localmente são descritas intercalações de rochas calciossilicática da Formação Salinas (Correia Neves *et al.* 1986; Dias 2015).

Os pegmatitos do CPI se caracterizam por ser ricos em minerais que apresentam teores anômalos de lítio (Pedrosa-Soares *et al.* 2009). O CPI, de acordo com Pedrosa-Soares *et al.* (2011), pode ser dividido entre dois grupos, sendo aqueles não zonados compostos majoritariamente por espodumênio, com turmalina e petalita, enquanto o segundo grupo se trata dos pegmatitos zonados que além da composição de espodumênio e petalita, apresenta também lepidolita, ambligonita, polucita, tantalita, cassiterita e albita. Pela sua composição com minerais de lítio, céσιο (polucita) e tântalo (tantalita), esses autores classificam os pegmatitos do CPI como do tipo LCT, enriquecidos em lítio.

Presente nesta região do campo pegmatítico de Itinga ocorre o Pegmatito Córrego do Taquaral na porção central da folha Itaobim (figura 4.2) como dois corpos alongados (Paes *et al.* 2010). Esses pegmatitos são compostos majoritariamente por quartzo, muscovita, espodumênio, feldspato, albita e biotita associada (Romeiro e Pedrosa-Soares 2005). Nessa região estão concentrados os depósitos que são explorados pela CBL e Sigma, por meio das lavras de Cachoeira, Xuxa e Barreiro (Chaves e Dias 2022). De acordo com Dias (2015), a Mina da Cachoeira apresenta grande volume de espodumênio, compostos por pequenos corpos pegmatíticos que estão encaixados no xisto da Formação Salinas.

Para realização da caracterização mineralógica dos minerais concentrados da bacia do rio Jequitinhonha, desenvolveu-se neste trabalho uma metodologia de análises laboratoriais, em que foi feita a seleção das amostras, seguida de sua separação, antes de se realizarem as análises por métodos de MEV e DRX, para que finalmente fossem avaliados e discutidos os seus resultados.

A seguir apresenta-se a descrição das diferentes etapas relacionadas ao desenvolvimento da presente pesquisa e que estão sistematizadas na figura 4.1.

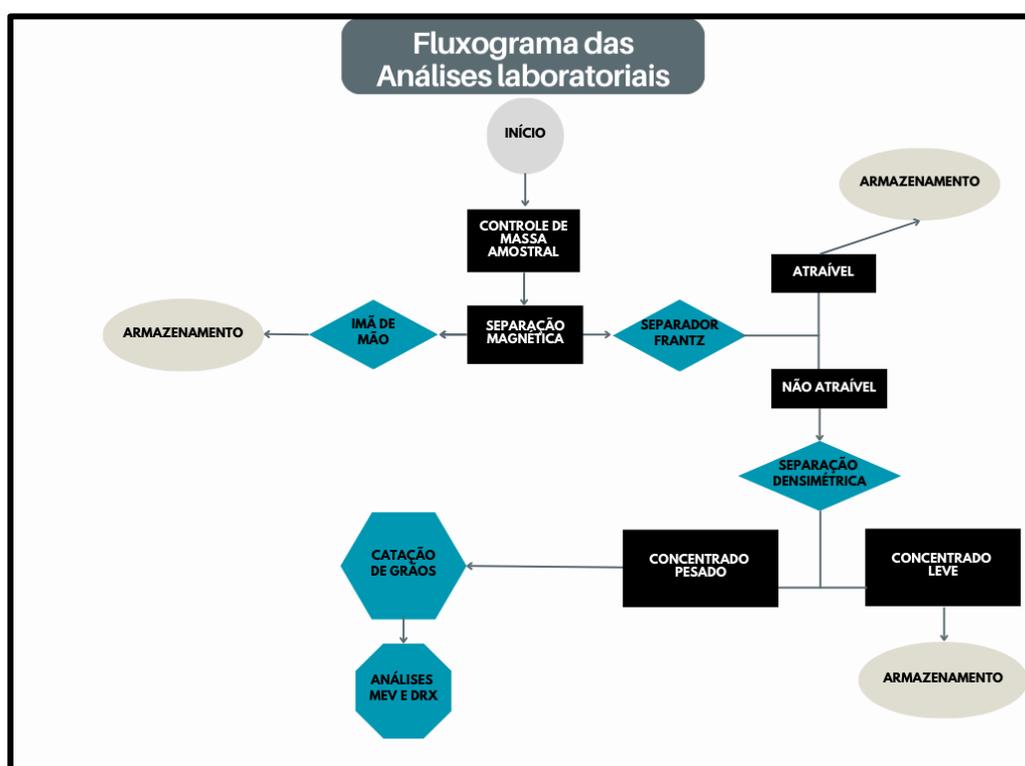


Figura 4. 1 - Fluxograma de metodologia aplicada na pesquisa.

4.1. Aquisição de dados e escolha das amostras

Os dados obtidos para a este trabalho são oriundos do Projeto Jequitinhonha (SGB - CPRM 2010). Este projeto possui informações de diversas amostras coletadas na região da

bacia do rio Jequitinhonha, tais como: dados geológicos, dados geoquímicos, dados geofísicos, além alíquotas com os concentrados de bateia.

Após a realização de uma análise geral sobre as informações disponíveis no Projeto Jequitinhonha (SGB - CPRM 2010), a folha Itaobim (1:100.000; figura 4.2) foi selecionada como foco desta pesquisa. Dentre os aspectos que levaram a esta escolha estão: a geologia local, nesta área encontram-se os principais corpos graníticos com pegmatitos associados com relatos de ocorrências de mineralizações de lítio; maior número de amostras com elevados percentuais de minerais índices ricos em lítio nos concentrados de bateia e estudos geofísicos com anomalias magnéticas e gamaespectométricas.

Assim, selecionaram-se dez amostras da folha Itaobim inserida dentro da bacia do rio Jequitinhonha, próximo aos municípios de Araçuaí e Itaobim (figura 4.2). As dez amostras selecionadas estavam armazenadas na litoteca da SGB - CPRM em Caeté.

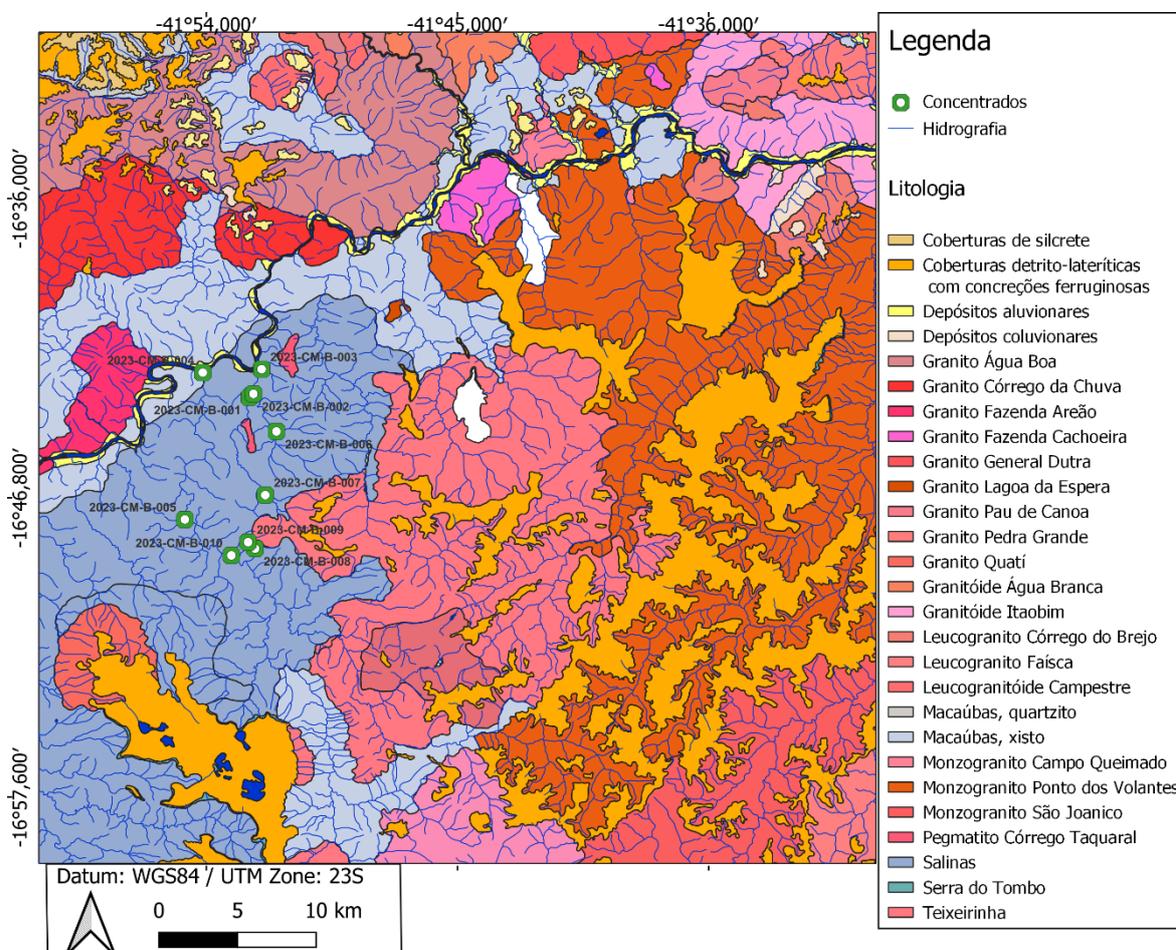


Figura 4. 2 - Mapa litológico 1:100.000 da folha de Itaobim com a localização das amostras analisadas nesta pesquisa (Modificado de SGB - CPRM 2010).

4.2. Análises laboratoriais

As etapas descritas a seguir foram realizadas com as dez amostras selecionadas do banco de dados do Projeto Jequitinhonha (SGB - CPRM 2010). Essas etapas foram realizadas no LAMIN, Laboratório de Análises Minerais do Serviço Geológico do Brasil SGB - CPRM localizado na cidade de Caeté/MG.

4.2.1. Controle de massa de amostra

A primeira etapa foi o controle fracional do material selecionado. As análises laboratoriais posteriores deveriam ser realizadas com a granulometria igual ou menor a 1 mm; então, fez-se o peneiramento dos concentrados. Após esse procedimento, realizou-se a pesagem de cada amostra coletada pela SGB - CPRM (quadro 4.1), utilizando-se uma balança de precisão. Depois de pesadas, todas as amostras foram encaminhadas para o processo de separação magnética.

Quadro 4.1: Quadro de controle de massa amostral das amostras selecionadas do Projeto Jequitinhonha (SGB - CPRM 2010).

Nº DE CAMPO	Nº DE LABORATÓRIO	PESO INICIAL (g)	PESO CONCENTRADO (g)
2023-CM-B-001	JBS-438	200,72	10,59
2023-CM-B-002	JBS-439	199,86	41,05
2023-CM-B-003	JBS-440	199,34	4,41
2023-CM-B-004	JBS-441	197,2	6,23
2023-CM-B-005	JBS-442	199,3	9,92
2023-CM-B-006	JBS-443	199,75	4,89
2023-CM-B-007	JBS-444	190,8	12,79
2023-CM-B-008	JBS-445	199,78	13,84
2023-CM-B-009	JBS-446	199,72	14,72
2023-CM-B-010	JBS-447	200,12	4,22

4.2.2. Separação magnética

A separação magnética promove a separação de grãos de minerais sólidos em função da imantação, aliada à capacidade magnética apresentada por cada mineral. Esse procedimento foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu no uso do imã de mão para retirar os minerais altamente magnéticos dos concentrados de bateia, compostos principalmente por magnetita/pirrotita (figura 4.3A). Após a separação dos minerais magnéticos, foram realizados ensaios de separação magnética utilizando-se do separador isodinâmico Frantz nas amperagens de 0,3A, 0,5A, 0,75A e 1,0A e com inclinação de 15° (figura 4.3B e C). O material de cada

separação (decorrente de sua susceptibilidade magnética) foi armazenado em frascos devidamente etiquetados por seu valor de amperagem (figura 4.3D).

O material que não foi atraído pelo Frantz ou imã de mão foi selecionado para a análise de densidade. Como o objetivo deste trabalho era identificar os minerais de lítio e estudos anteriores, como Klein e Dutrow (2021), enquadram na categoria dos minerais não atraídos magneticamente o espodumênio e petalita, essa categoria foi levada à próxima etapa das análises, que se refere à separação em meio denso.

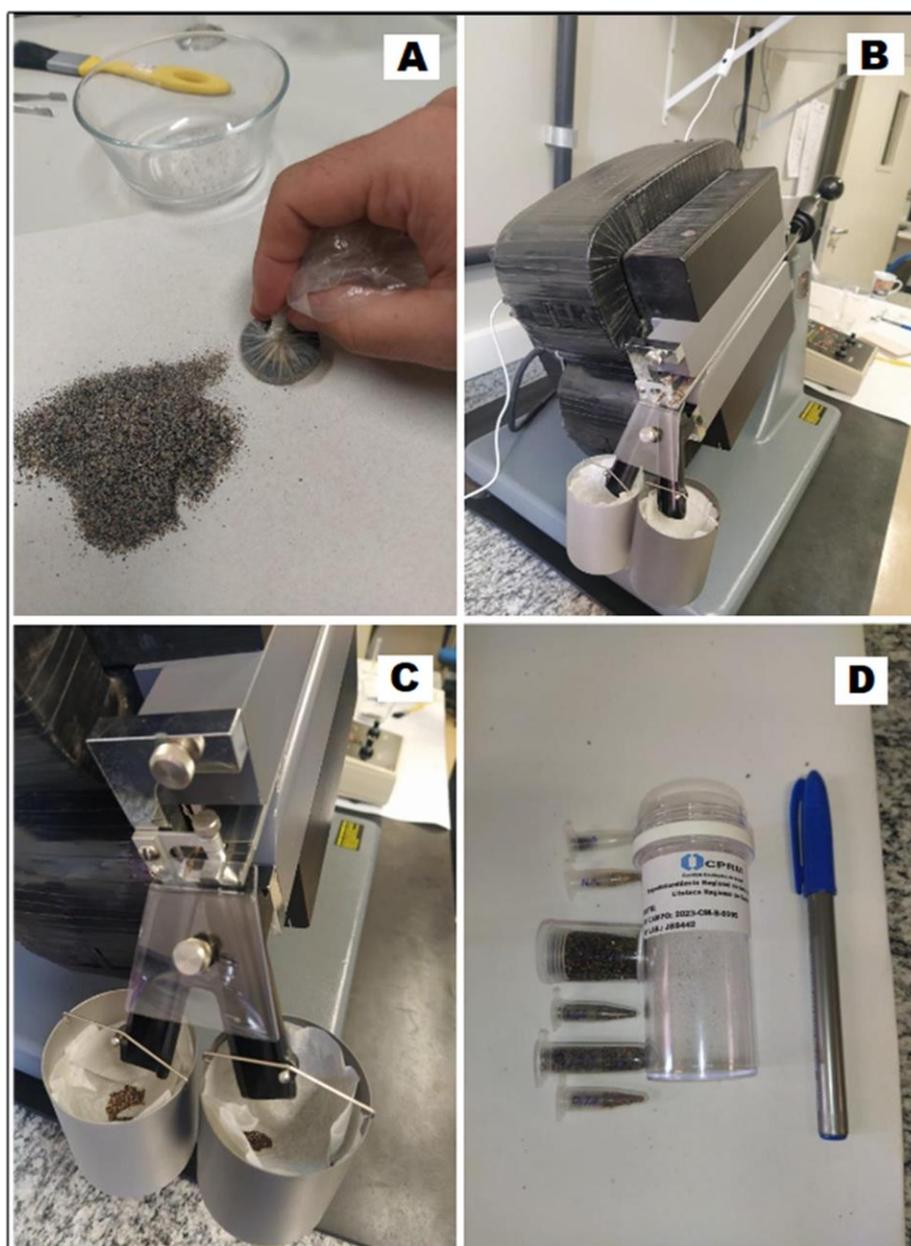


Figura 4. 3 - A) Imagem do processo de separação magnética utilizando o imã de mão. B e C) Separação magnética utilizando o Frantz. D) Frações magnéticas de uma das amostras de concentrado de bateia estudada.

4.2.3. Separação em meio denso

O método de separação em meio denso consiste em um processo em que partículas com densidade superior ao meio afundam, enquanto as partículas de densidade inferior ao meio tendem a flutuar, já as partículas que apresentam o mesmo valor de densidade que o meio, elas permanecem em suspensão (Luz *et.al.* 2004). Comumente são utilizados líquidos orgânicos, soluções aquosas de sais inorgânicos, fluidos paramagnéticos ou suspensões de sólidos em água para separação de minerais em meio denso (Pita 2004). Para a realização deste método, utilizou-se do líquido orgânico bromofórmio (figura 4.4), de densidade $2,89 \text{ g/cm}^3$, com o objetivo de separar os grãos leves, minerais menos densos que o bromofórmio e que boiassem na solução química de densidade menor que $2,89 \text{ g/cm}^3$, dos grãos pesados, minerais que afundassem no líquido orgânico por possuírem densidade maior que $2,89 \text{ g/cm}^3$. O espodumênio ($3,15 - 3,20 \text{ g/cm}^3$) e petalita ($2,39 - 2,46 \text{ g/cm}^3$), por apresentarem densidades relativas diferentes, se separam.

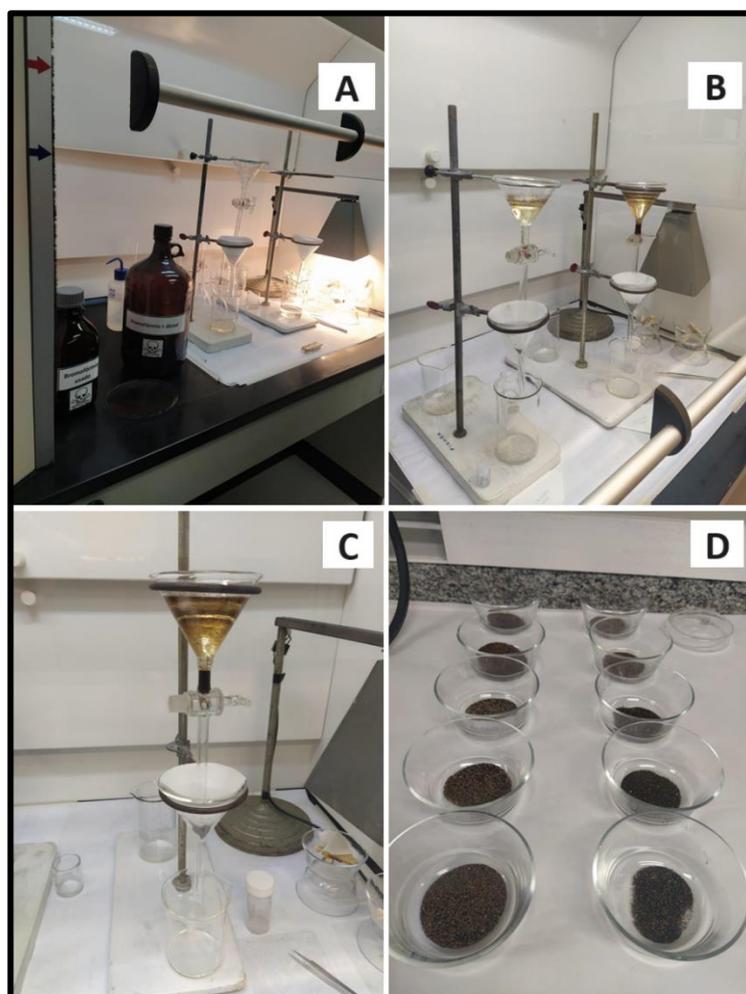


Figura 4.4 - A) B) e C) Imagens do processo de separação em meio denso com o bromofórmio e D) grãos separados pelo bromofórmio, que apresentaram densidades superiores a $2,89 \text{ g/cm}^3$.

4.2.4. Catação de minerais de minério

A catação para a separação de sólidos é um método simples, mas muito utilizado em concentrados de bateia (Moutinho *et al.* 2016; Cidade *et al.* 2020). Com a utilização da lupa binocular e de uma pinça, o processo de catação se deu após a separação magnética e densimétrica, sendo considerada para a separação os minerais não atraídos magneticamente. Aqueles com densidade acima de $2,89\text{g/cm}^3$, os minerais pesados, tinham como foco o espodumênio, enquanto nos grãos leves a catação da petalita.

Com auxílio da lupa binocular e da pinça realizou-se a catação dos minerais (figura 4.5). Das dez amostras selecionadas para o projeto, o objetivo era a análise dos grãos minerais de lítio e dos minerais que se apresentaram com recorrência dentro do contexto geológico; sendo assim, buscou-se separar, utilizando-se com referência o guia mineral Manual da Ciência dos Minerais (Klein e Dutrow 2012), os grãos de: espodumênio ($(\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6))$), petalita ($(\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10})$), turmalina ($(\text{Na, Ca})(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg, Li, Al})_3(\text{Al, Fe}^{+3})_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{B}_3\text{O}_3)_3\text{OH}_3(\text{F, O, OH})$), granada ($(\text{Mg}^{+2}, \text{Fe}^{+2}, \text{Mn}^{+2})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Ca}_3(\text{Fe}^{+3}, \text{Al}^{+3}, \text{Cr}^{+3})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$), andaluzita (Al_2SiO_5), cassiterita (SnO_2), gahnita (ZnAl_2O_4), estauroлита ($(\text{Fe, Mg, Zn})_2\text{Al}_9(\text{Si, Al})_4\text{O}_{22}\text{OH}_2$), silimanita (Al_2SiO_5), scheelita (CaWO_4), xenotímio (YPO_4), ilmenita (FeTiO), limonita (FeOOH), apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, Cl, OH})$) e monazita ($(\text{Ce, La, Nd, Th})\text{PO}_4$).

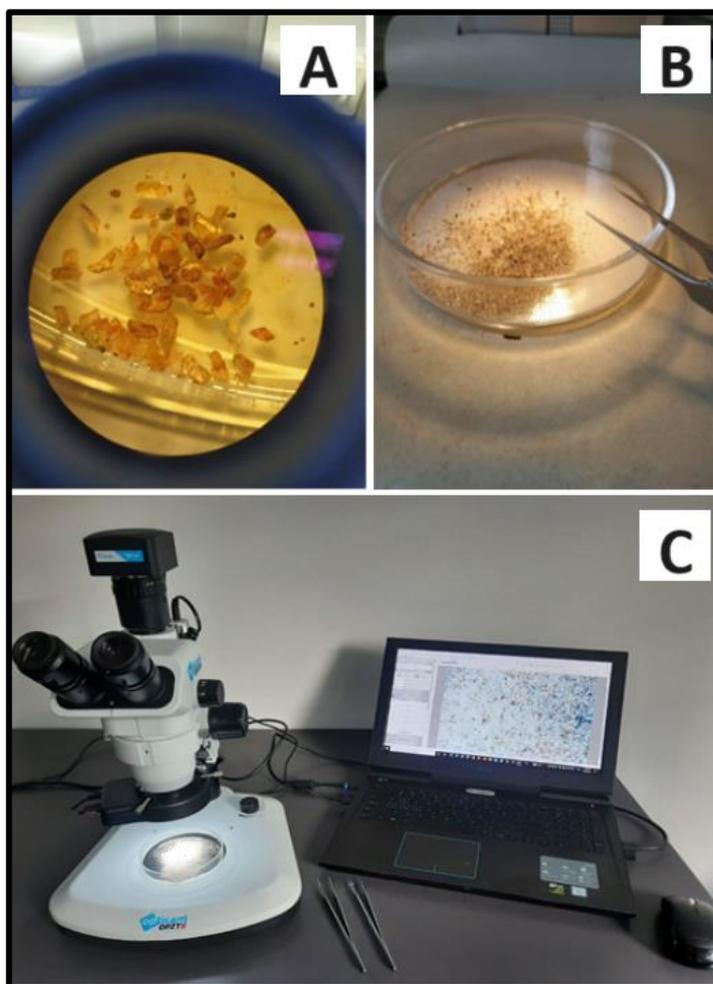


Figura 4.5 - Imagens do processo de catação e registro dos grãos em lupa binocular. A) Grãos de minerais dispostos na placa, vistos pela lupa binocular. B) Grãos de minerais dispostos na placa sem o aumento da lupa. C) Lupa binocular com a câmera acoplada para registros fotográficos dos minerais.

A quantidade de cada grão catado foi definida em função de sua importância na caracterização dos minerais de lítio da bacia; assim, buscou-se separar ao menos dez grãos (de cada) de espodumênio, petalita, turmalinas e granadas, enquanto para os outros minerais foram selecionados os grãos de forma aleatória e com intenção de não selecionar grãos repetidos.

4.2.5. Confeção de pastilhas

Para a realização das análises no MEV-EDS foram confeccionadas pastilhas com os minerais selecionados previamente durante a catação de minerais (figura 4.6). Este processo consistiu na colagem dos grãos em fita de carbono para fixagem e condutividade, em uma

pastilha para que pudesse ser submetida ao microscópio de varredura eletrônica e permitir a caracterização dos minerais.

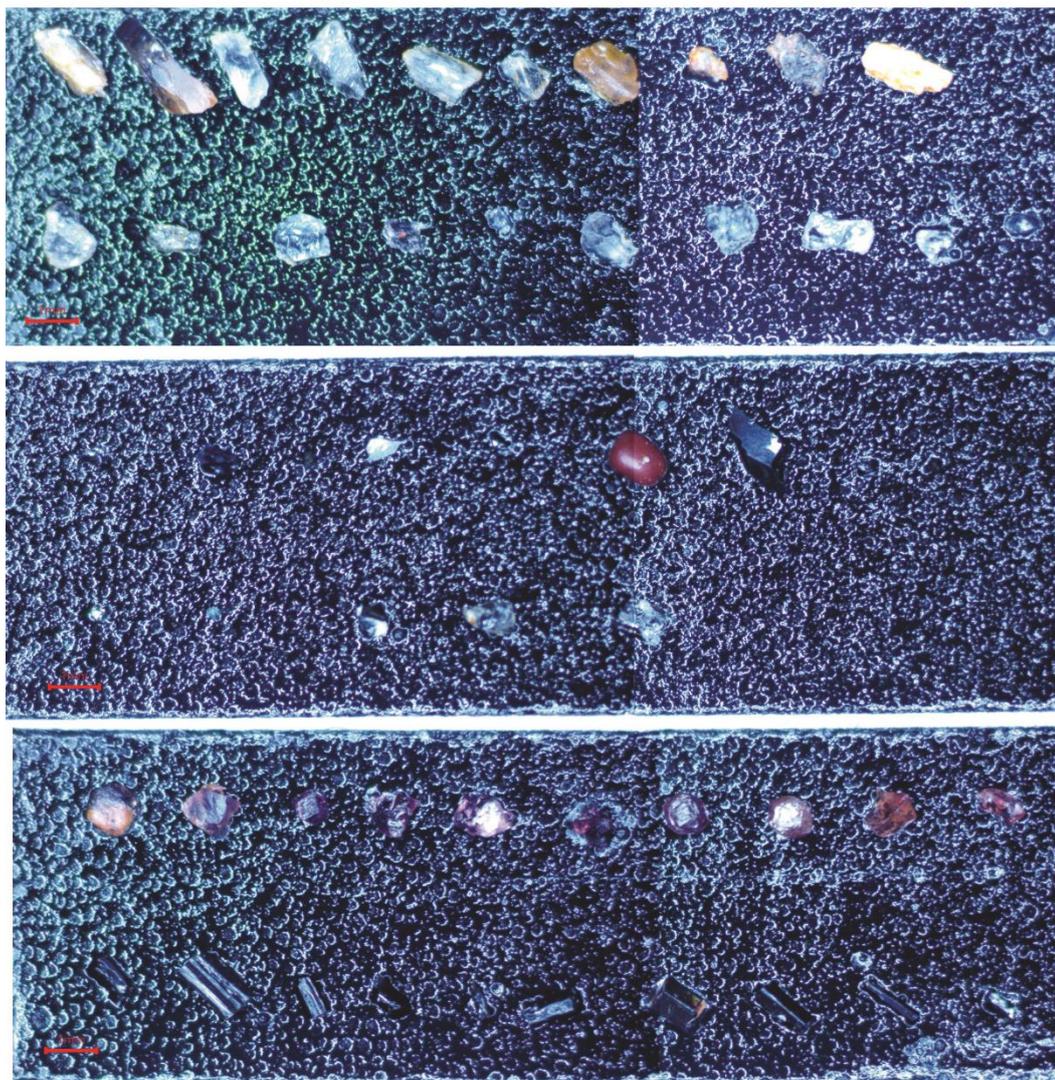


Figura 4. 6 - Imagens da pastilha com os grãos colados em fita de carbono.

4.3. Análise com MEV-EDS

As pastilhas confeccionadas na etapa anterior foram levadas ao laboratório de Microscopia Eletrônica o DEGEO para análises no MEV-EDS. Foram selecionados 75 grãos para análise em MEV, sendo 10 grãos dos minerais índices para a presença de lítio (turmalina e granada) e 10 grãos de cada possível mineral de minério do lítio, como espodumênio e petalita. Os demais grãos foram selecionados de forma a realizar uma análise dos minerais concentrados da bacia, escolhendo-se de 1 a 3 três grãos de cada mineral identificado sob lupa.

Os grãos foram metalizados utilizando carbono e as análises foram realizadas no MEV, marca Jeol, modelo JSM 6510, com filamento de tungstênio, do Laboratório de Microscopia e

Microanálises - LMic da UFOP, para estudos de morfologia e investigação qualitativa da composição dos grãos. Foram geradas imagens utilizando sensores de elétrons secundário (SE – *secondary electrons*) e elétrons retro-espalhados (BSE – *Backscattered electrons*) além da composição de imagens através da união das imagens de SE e BSE. As análises qualitativas para a caracterização química dos 75 grãos selecionados, utilizou-se o espectrômetro por energia dispersiva de raios-x (EDS – *energy dispersive spectrometer*), utilizando 20kV para voltagem de aceleração, distância de trabalho de 15mm, *spot size* 70. Todas as análises tiveram os teores normalizados para 100%. Os elementos químicos dosados foram Ag, Au, Cu, Hg, Pd, Fe, Ni, As, Bi, Te, S, Se, Zn e foram determinados através da revisão bibliográfica pautada em padrões de artigos internacionais (Chapman *et al.* 2021; Ateh *et al.* 2021; Ketchaya *et al.* 2022).

4.4. Análises de DRX

As análises de DRX foram realizadas com o objetivo de acrescentar as informações às já adquiridas nas etapas anteriores, ou seja, para uma melhor caracterização dos minerais identificados nas amostras estudadas. Foram levadas 8 amostras para a análise no difratômetro de raio-x (DRX). Foram analisados grãos de espodumênio, crisoberilo, turmalinas, granadas e andaluzita, que foram separados no processo de catação.

Com as análises de DRX foi possível analisar as características cristalográficas dos grãos selecionados, auxiliando na interpretação dos resultados a partir da comparação do difratograma obtido com os padrões do banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File*).

As análises foram realizadas em Difratômetro de raios-x modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D. A aquisição de dados foi feita com o software *X'Pert Data Collector*, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software *X'Pert HighScore*, versão 3.0d, ambos da PANalytical.

Foram utilizadas as seguintes condições de análise: *Voltage* (kV): 40; *Current* (mA): 40; *Scan range* ($^{\circ} 2\theta$): 5-70 (MA) e 5-50 (RJ); *Step size* ($^{\circ} 2\theta$): 0,02; *Scan mode*: *Continuous*;

Counting time (s): 50; Divergence slit: Slit Fixed 1/2°; Mask Fixed 10 mm; Anti-scatter slit Name: 5,7mm

A identificação dos minerais é feita pela comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data– Powder Diffraction File*). As fichas são específicas por mineral (por ex., quartzo, 00-046-1045), porém, para um mesmo mineral há diversas fichas similares no ICDD-PDF.

4.5. Análises e interpretação dos resultados

Após todas as análises realizadas, foi possível se determinar a mineralogia dos concentrados de bateia das microbacias do CPI e a química mineral de alguns de seus minerais principais. Finalmente, de posse dos resultados, foi possível correlacionar os dados obtidos com o contexto geológico da região.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises realizadas com as dez amostras selecionadas nomeadas pelo seu código amostral conforme descrito no quadro 5.1, que apresenta o resumo dos resultados do controle de massa das amostras considerando o peso amostral de cada amperagem em que as amostras foram separadas no Frantz. Além do quadro com os dados das amostras, os resultados serão apresentados por cada mineral analisado e que foram ordenados pela importância econômica e abundância mineral em todo conteúdo amostral.

Quadro 5.1: Quadro de amostras com peso dos materiais por separação magnética.

Nº DE CAMPO	CÓDIGO AMOSTRA	UTM-E	UTM-N	PESO CONCENTRADO (g)	PESO MAG (g)	PESO 0,3 A (g)	PESO 0,5 A (g)	PESO 0,75 A (g)	PESO N.A (g)
2023-CM-B-001	CM001	193500	8149250	10,59	0,01	0,74	5,76	1,27	2,81
2023-CM-B-002	CM002	193750	8149480	41,05	0,09	4,13	11,84	6,86	18,13
2023-CM-B-003	CM003	194250	8151130	4,41	< 0,01	0,68	1,68	0,46	1,58
2023-CM-B-004	CM004	190500	8150850	6,23	< 0,01	0,58	2,64	0,86	2,14
2023-CM-B-005	CM005	189500	8141050	9,92	< 0,01	1,32	5,56	1,46	1,57
2023-CM-B-006	CM006	195250	8147000	4,89	< 0,01	0,37	1,71	0,66	2,14
2023-CM-B-007	CM007	194600	8142750	12,79	0,16	2,01	5,43	2,57	2,62
2023-CM-B-008	CM008	194000	8139180	13,84	< 0,01	1,23	8,01	2,56	2,03
2023-CM-B-009	CM009	193550	8139600	14,72	< 0,01	0,9	9,15	2,82	1,84
2023-CM-B-010	CM010	192500	8138700	4,22	< 0,01	0,52	2,75	0,53	0,41

5.1 Espodumênio

O espodumênio foi observado na amostra CM003, após todo processo de catação dos minerais com características do espodumênio. O microscópio de varredura eletrônica, porém, não pode confirmar a química deste silicato devido à densidade do elemento Li, que não é analisado no aparelho. Assim, somente foi possível a confirmação via DRX, onde o grão

selecionado pôde ser comparado com o padrão de espodumênio e então ter sua mineralogia confirmada.

O espodumênio observado foi caracterizado por seu hábito prismático, brilho transparente, boa clivagem e durante a separação densimétrica por bromofórmio o mineral ficou na porção dos minerais pesados, ou seja, com densidade acima de 2,89 g/cm. O espodumênio durante a separação magnética por imã de mão e pelo separador magnético Frantz não apresentou susceptibilidade magnética.

No quadro 5.2 a amostra submetida ao MEV apresenta leve percentuais de Fe e Mn, que pode ser a razão das inclusões amareladas no cristal. A figura 5.1 representa o grão de espodumênio que foi separado após a catação dos minerais e a geomorfologia do grão analisado em MEV está representado na figura 5.1.

Quadro 5.2: Resultados químicos das análises no grão de espodumênio no MEV-EDS.

Elemento	O (%)	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Total (%)
CM003	58,42	13,67	27,53	0,26	0,12	100

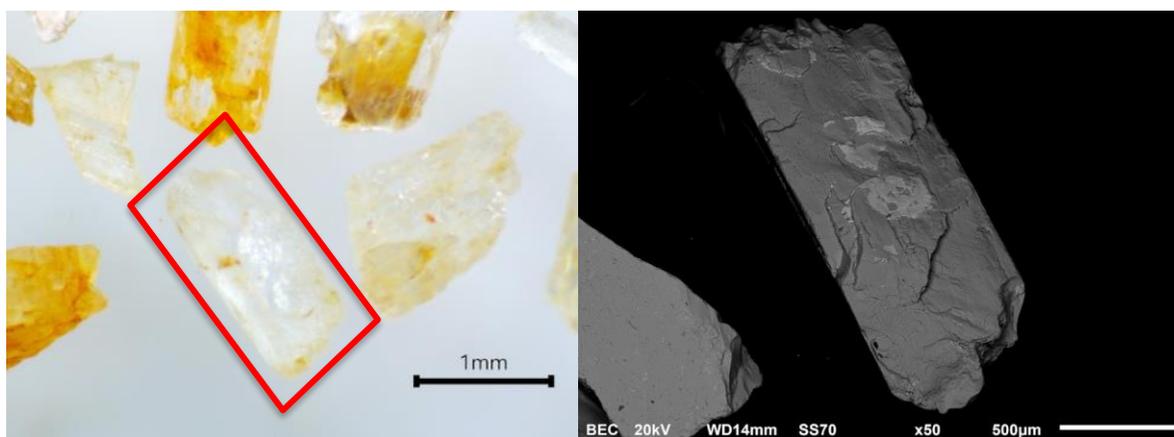


Figura 5.1: Imagem dos grãos de espodumênio em escala em lupa e sob o MEV, demarcado em vermelho a porção do grão de espodumênio analisado.

Como se pode observar no resultado em DRX (figura 5.2), o difratograma apresenta majoritariamente os picos padrões de espodumênio.

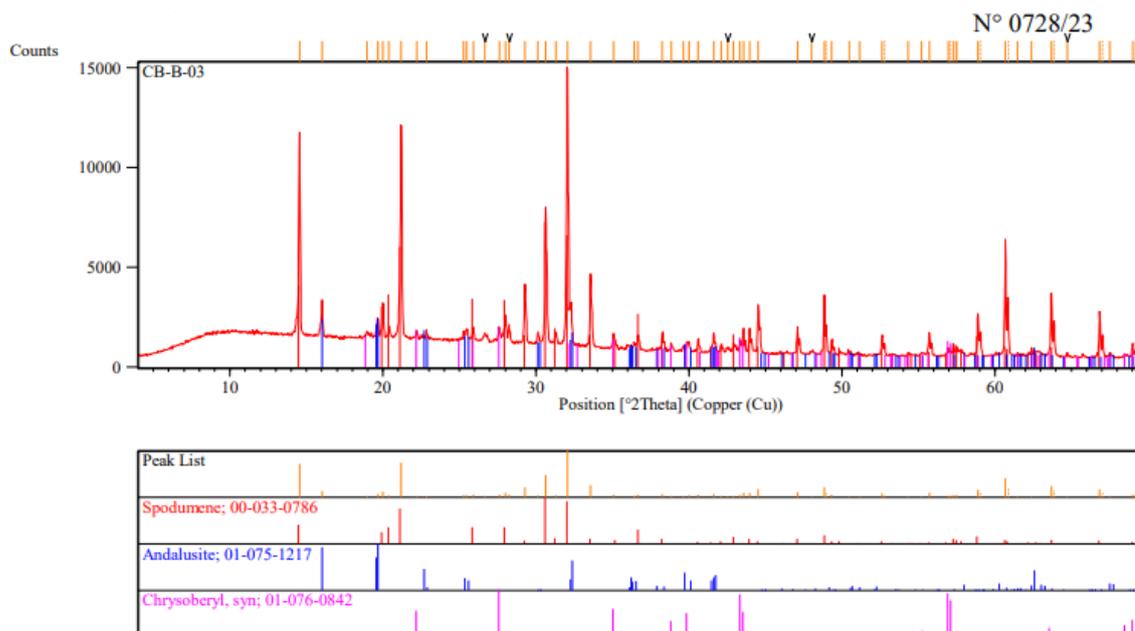


Figura 5.2: Difratoograma por Raios-x do grão de espodumênio.

5.2 Andaluzita

Presente em algumas amostras deste projeto, a andaluzita é frequentemente encontrada na região da bacia do Jequitinhonha (Paes *et al.* 2016).

A andaluzita na separação densimétrica com o bromofórmio foi separada entre os minerais pesados. Foi separada sob a lupa binocular do espodumênio em função das suas características: mineral translúcido sem coloração ou com coloração levemente acastanhada; duas direções de clivagem, hábito prismático e brilho transparente. A andaluzita, assim como o espodumênio, também não apresenta susceptibilidade magnética.

Diante das similaridades diagnósticas apresentadas entre a andaluzita e o espodumênio, os grãos foram levados para análises MEV-EDS e DRX. No MEV-EDS os minerais apresentaram distinção na proporção de Al e Si. Os resultados geoquímicos obtidos nas análises em MEV-EDS estão no quadro 5.3, estes apenas indicaram se tratar de um silicato de alumínio. Algumas amostras apresentaram pequenas inclusões em seus grãos, configurando menos de 2%. Na figura 5.3 estão os grãos que foram catados de andaluzita e a sua geomorfologia em MEV pode ser visto na figura 5.4.

O resultado em DRX das amostras CM001, CM002 e CM007 (figura 5.5) apresentou o padrão da andaluzita predominante, com pequenas inclusões de quartzo e possibilidade de pequenas porções de rutilo na amostra CM002, enquanto na amostra CM007 observou-se pequenas porções de espodumênio e quartzo.

Quadro 5.3: Resultados químicos das análises nos grãos de andaluzita em MEV-EDS.

Elemento químico	CM001	CM002	CM006	CM007	CM008	CM010
O (%)	48,65	44,8	46,88	53,34	51,56	46,3
Al (%)	33,59	34,53	28,92	29,76	31,35	29,5
Si (%)	17,76	19,3	21,76	16,55	16,91	23,51
K (%)		0,13	0,17			
Fe (%)		1,24	1,19	0,34	0,18	0,7
P (%)			0,83			
Ca (%)			0,25			
Total (%)	100	100	100	100	100	100



Figura 5.3: Imagem dos grãos de andaluzita em aumento de 0.7X e 1.0X com fundo escuro.

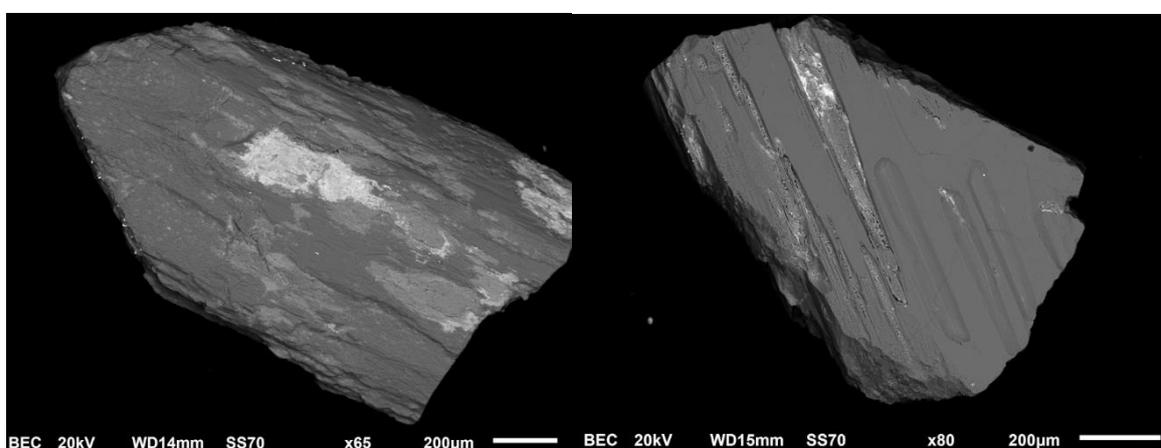


Figura 5.4: Imagem dos grãos de andaluzita em MEV.

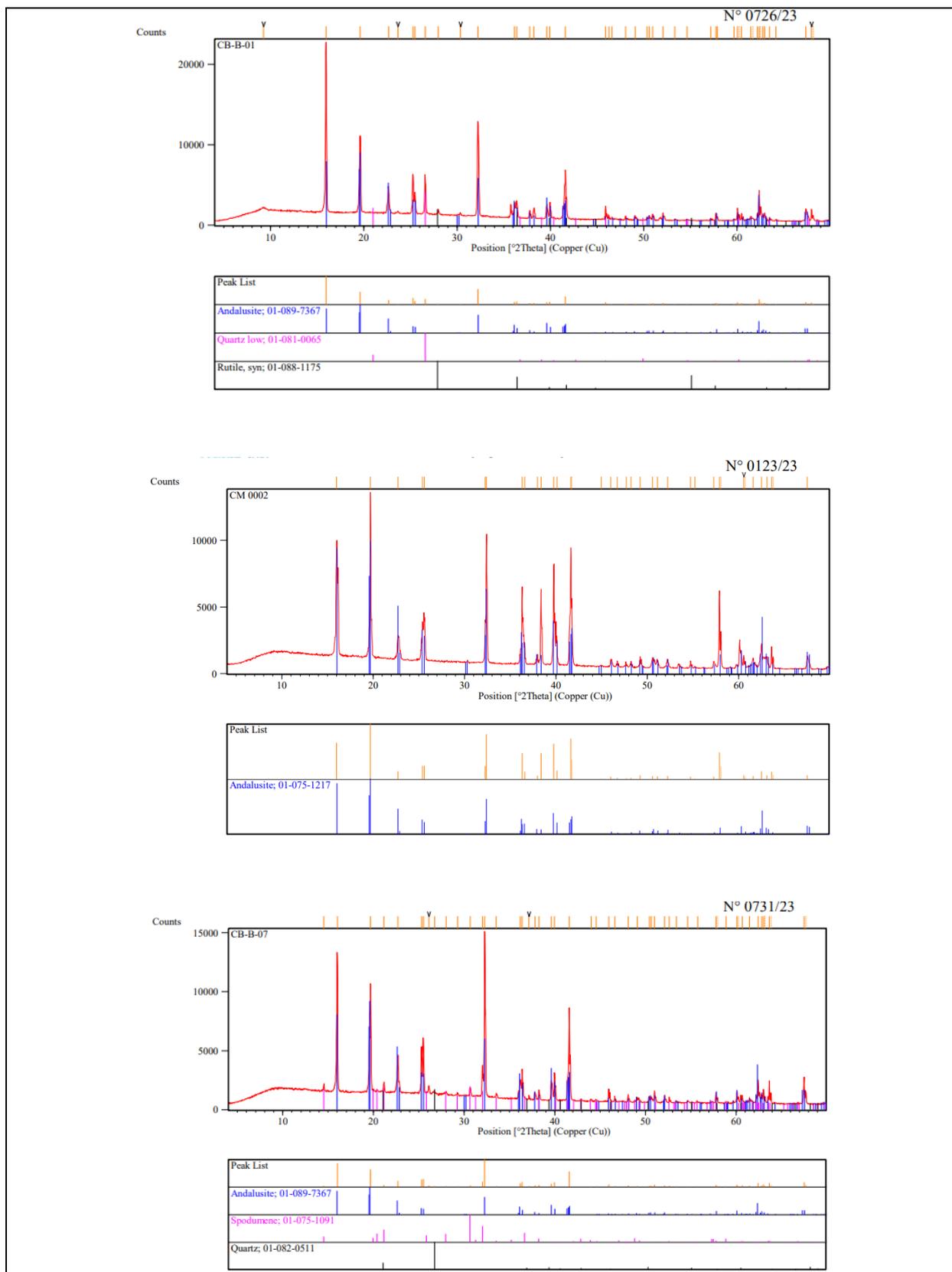


Figura 5.5: Difratoograma por raios-x das amostras CM001 (N° 0726/23), CM002 (N° 0123/23) e CM007 (N° 0731/23) de andaluzita.

5.3 Petalita

A petalita foi encontrada nas amostras CM002 e CM005. Devido a sua similaridade com o quartzo, somente na análise do MEV-EDS foi possível se fazer a diferenciação entre os minerais.

A petalita quando submetida ao separador magnético Frantz, foi recolhida na fração não atraíveis. Sob lupa, apresenta fraturas, em sua maioria conchoidal, e é translúcida, reforçando a similaridade com quartzo; entretanto, a petalita possui iridescência como uma característica óptica para distinção entre os dois minerais. A figura 5.6 apresenta os grãos de petalita catados, enquanto o quadro 5.4 mostra os resultados geoquímicos, que indicam inclusões com valores entre 7% e 13% nas amostras analisadas. Na figura 5.7 é possível observar a morfologia dos grãos da petalita em MEV-EDS.

Quadro 5.4: Resultados químicos das análises nos grãos de petalita em MEV-EDS.

Elemento químico	O (%)	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Na (%)	Mg (%)	K (%)	Ti (%)	P (%)	Total (%)
CM002	47,53	19,81	22,63	0,63	0,83	0,36	7,84	0,36		100
CM005	46,35	10,07	30,62		0,65		12,2		0,11	100

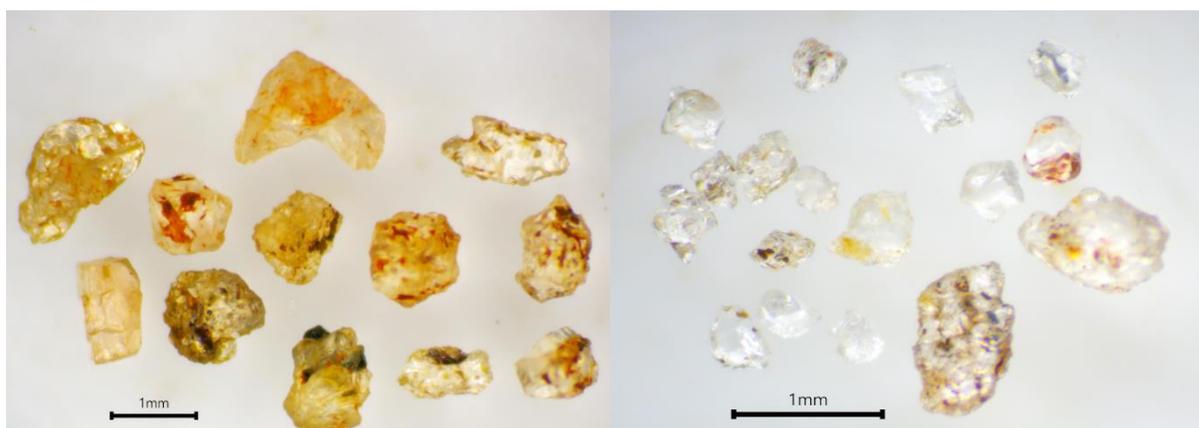


Figura 5.6: Imagem dos grãos de petalita em aumento de 1.5X.

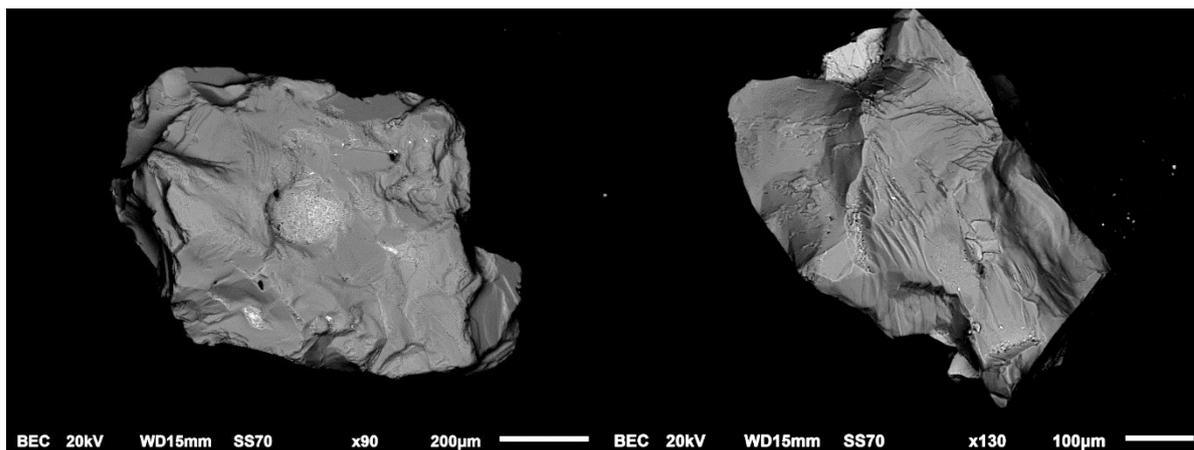


Figura 5.7: Imagens dos grãos de petalita em MEV-EDS.

5.4 Turmalina

Presente em todas as amostras selecionadas para este trabalho, a turmalina caracteristicamente é separada no Frantz com amperagem de acima de 0,75^a, indicando baixa susceptibilidade magnética. A catação da turmalina (figura 5.8) foi realizada considerando seus aspectos minerais como seu hábito prismático, colorações variando de castanhos escuros a pretos e apresentando estrias ao longo de sua estrutura.

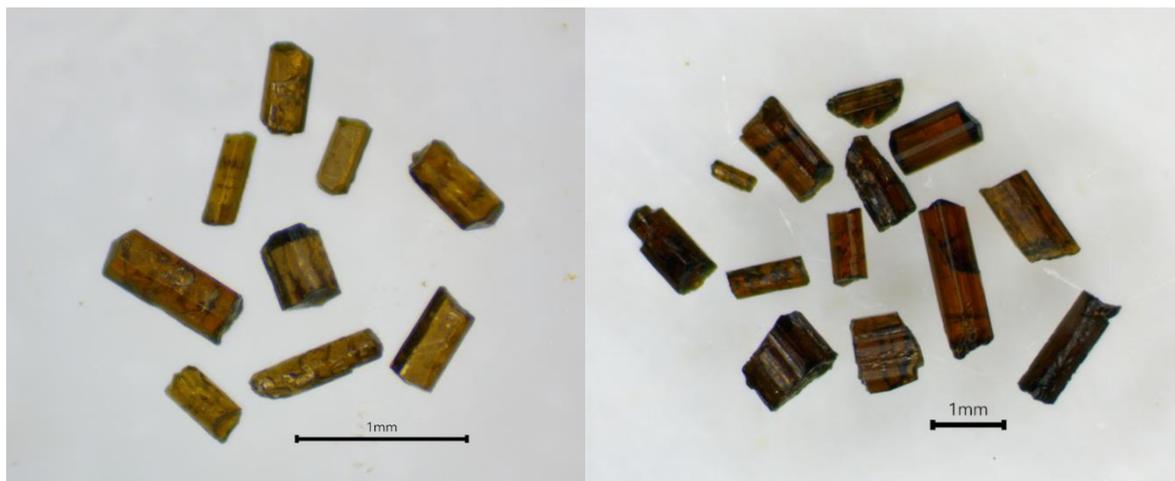


Figura 5.8: Imagem dos grãos de turmalina separados, em aumento de 3X.

A análise MEV-EDS (figura 5.9) apresentou diferentes composições químicas para os grãos separados (quadro 5.5), sendo possível se identificar valores de Fe variando de 3% a 9% e a Si com valores entre 16% a 20%. Além disso, foi possível se observar inclusões nos grãos polidos de turmalina de microclina, gorceixita ($\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$) e crichtonita ($\text{Sr}(\text{Mn}, \text{Y}, \text{U})\text{Fe}_2(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_{18}(\text{O}, \text{OH})_{38}$) (figura 5.10).

Quadro 5.5: Resultados químicos das análises nos grãos de turmalina em MEV-EDS.

Elemento químico	CM001	CM002	CM003	CM004	CM005	CM006	CM007	CM008	CM009	CM010
O (%)	50,94	54,17	47,5	54,95	47,4	46,33	54,38	53,53	45,69	49,4
Na (%)	1,65	1,66	1,48	1,9	1,37	1,66	1,55	1,94	1,68	1,77
Mg (%)	3,67	3,94	2,16	2,18	4,03	3	4,36	3,26	3,3	2,89
Al (%)	18,94	18,2	20,38	17,65	20,65	20,27	18,39	17,45	19,96	19,51
Si (%)	17,98	17,06	18,67	16,22	19,51	19,16	16,94	16,93	19,37	18,31
Ca (%)	0,31	0,21	0,16	0,08	0,4	0,15	0,35	0,2	0,2	0,14
Ti (%)	0,54	0,34	0,38	0,34	0,71	0,48	0,44	0,47	0,62	0,51
Fe (%)	5,97	4,36	9,11	6,6	5,93	8,96	3,58	6,16	9,04	7,4
K (%)		0,07						0,07		0,07
Mn (%)			0,16	0,07					0,14	
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

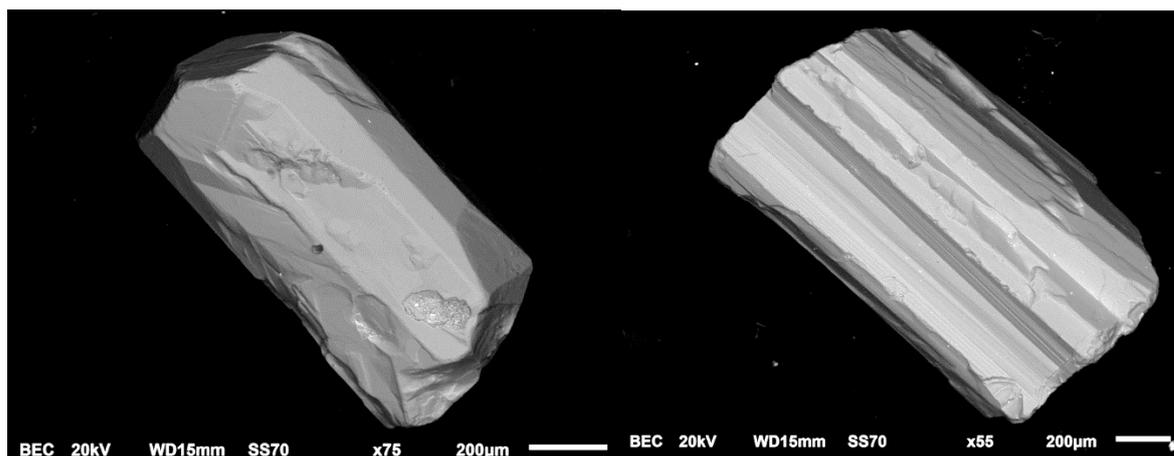


Figura 5.9: Imagem dos grãos de turmalina no MEV.

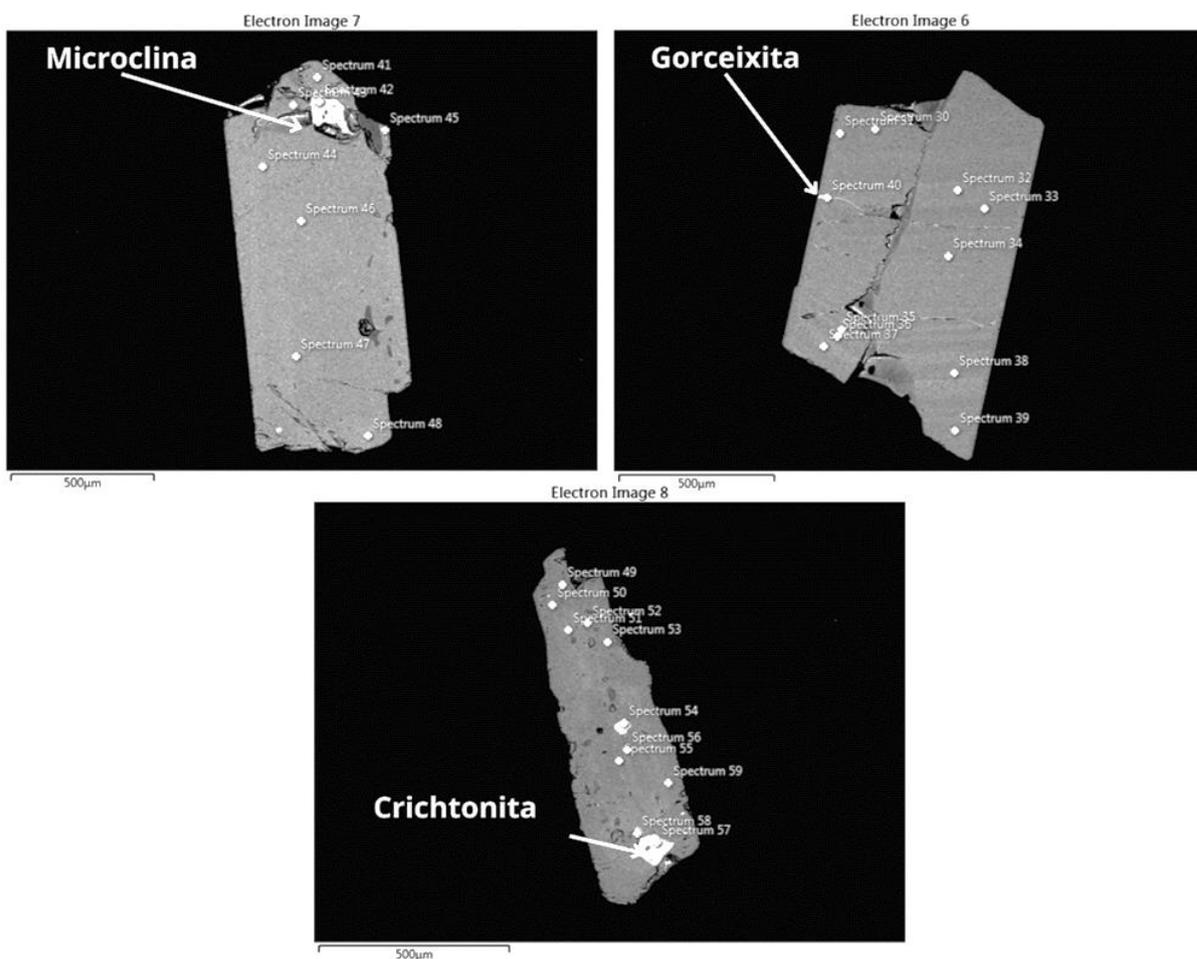


Figura 5.10: Imagem das inclusões encontradas nos grãos de turmalina observadas no MEV.

As análises de DRX (figura 5.11) caracterizam a turmalina como do tipo Schorl.

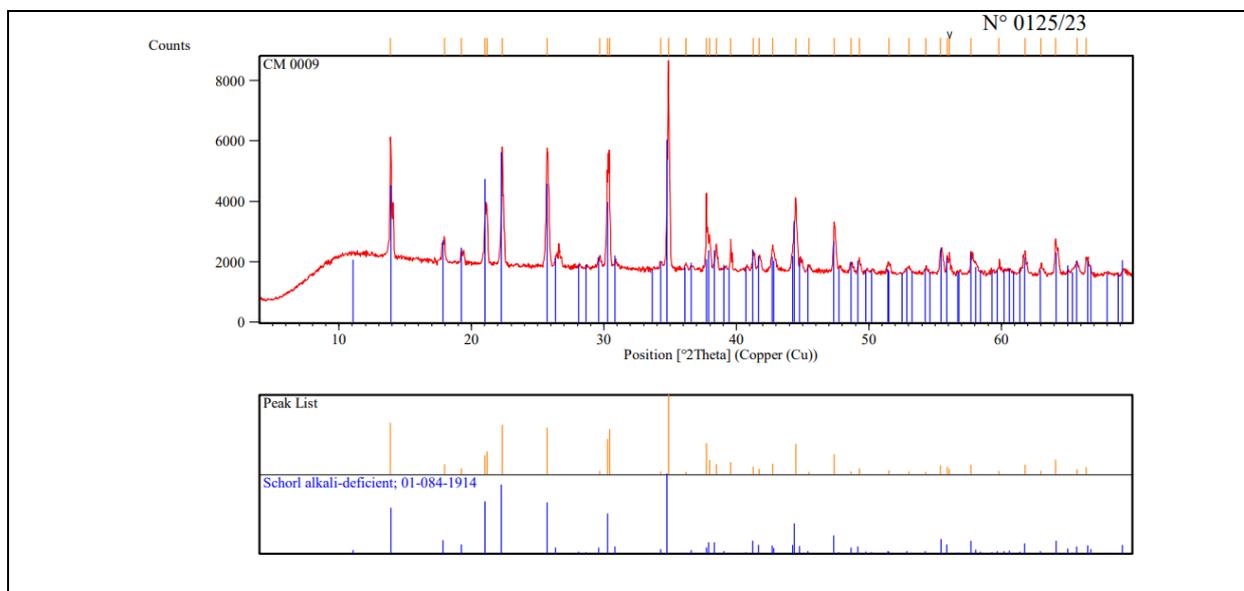


Figura 5.11: Difratoograma de um dos grãos de turmalina (CM009).

5.5 Granada

A granada assim como a turmalina apresentou-se em todas as amostras, e com alguns grãos possuindo inclusões de outros minerais (figura 5.12). Os grãos polidos de granada quando vistos no MEV mostraram duas inclusões, de plagioclásio e suhailita $((\text{NH}_4)\text{Fe}_{2+3}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2)$ (figura 5.13).

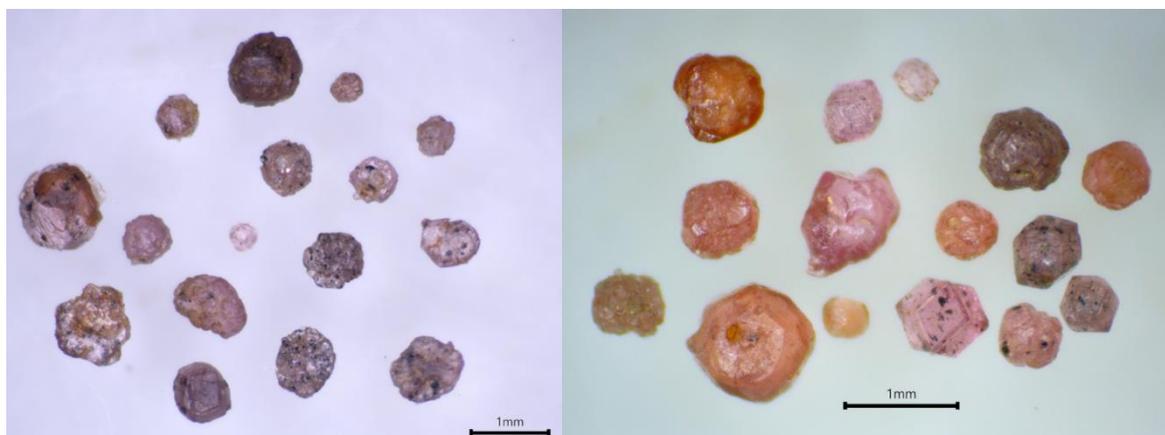


Figura 5.12: Imagem dos grãos de granada almandina em aumento de 1.5X.

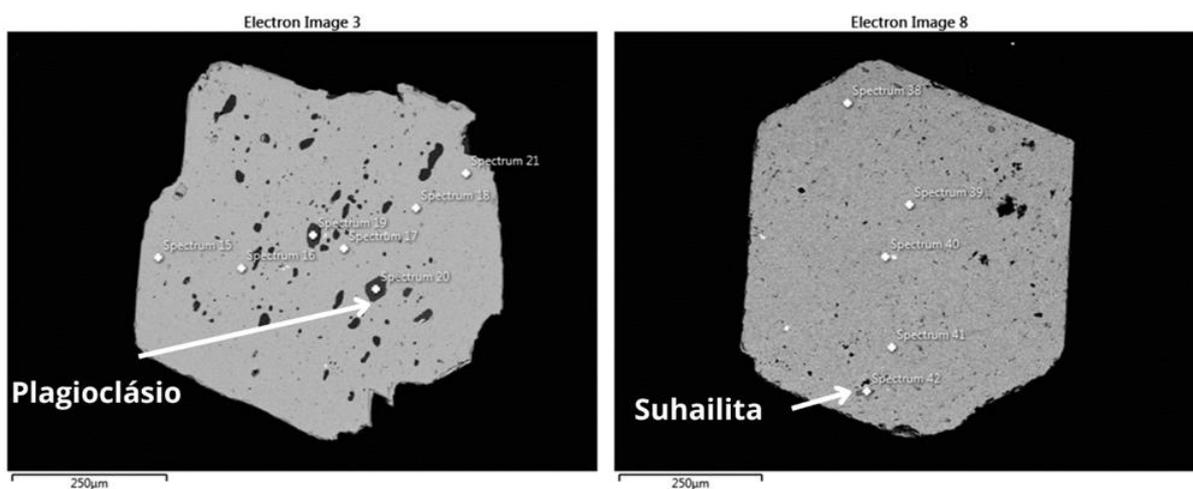


Figura 5.13: Imagem das inclusões encontradas nos grãos de granada no MEV.

A susceptibilidade magnética ocorre na granada a partir de 0,3A no separador magnético do Frantz até a amperagem de 0,75A. Os grãos de granada (figuras 5.12 e 5.14) em sua maioria de coloração rosa a avermelhado, translúcidos e de hábito dodecaédrico preservados.

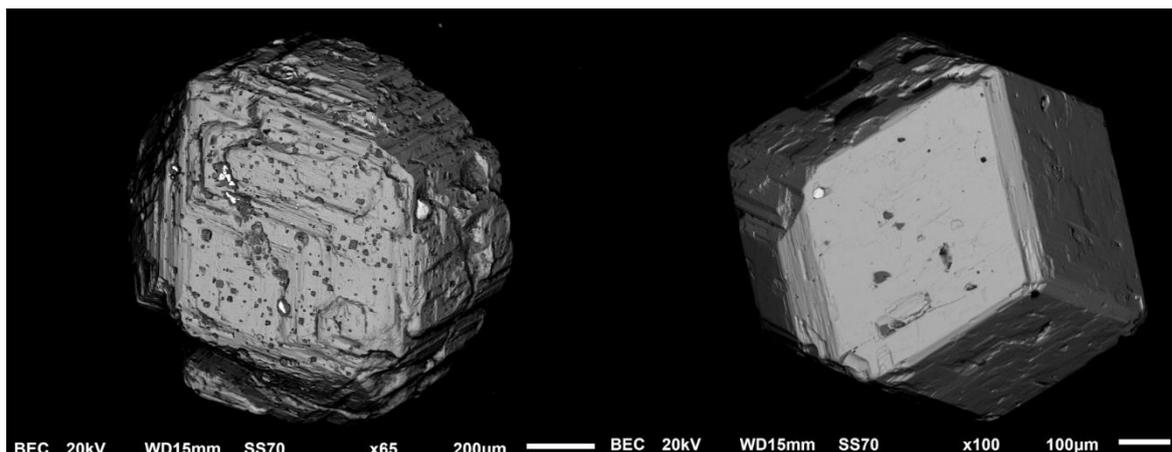


Figura 5.14: Imagem dos grãos de granada subédrico/euédrico em MEV.

No MEV-EDS, a granada apresentou nos resultados químicos (quadro 5.6) teores de Fe variando de 16,62 a 41,33% de Fe indicando ser do tipo almandina. Destacam-se ainda os teores de Mn que variaram de 1,82 a 20,53% (quadro 5.6).

Quadro 5.6: Resultados químicos das análises nos grãos de granada em MEV-EDS.

Elemento	CM001	CM002	CM003	CM004	CM005	CM006	CM007	CM008	CM009	CM010
O (%)	37,41	23,2	35,04	35,43	29,89	26,84	35,77	34,44	35,69	47,67
Mg (%)	1,15	0	0,97	2,08	0,75	1,89	0,87	1,12	0	0,39
Al (%)	11,89	10,35	11,58	11,17	11,59	10,71	11,69	11,69	11,19	11,69
Si (%)	18,15	15,48	17,92	17,27	17,76	16,78	18,06	18,04	17,17	17,1
K (%)	0,1	0	0	0,43	0	0	0	0	0	0,17
Ca (%)	0,6	0,15	0,64	0	0,22	0,63	0,45	1,09	0,11	0,15
Mn (%)	8,23	20,53	8,69	3,37	12,54	1,82	12,12	13,17	18,71	6,2
Fe (%)	22,49	30,28	25,16	30,25	27,25	41,33	21,05	20,46	16,98	16,62
P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

O resultado de DRX (figura 5.15) da amostra CM003 confirma a granada e aponta para a presença de pequenas inclusões de quartzo.

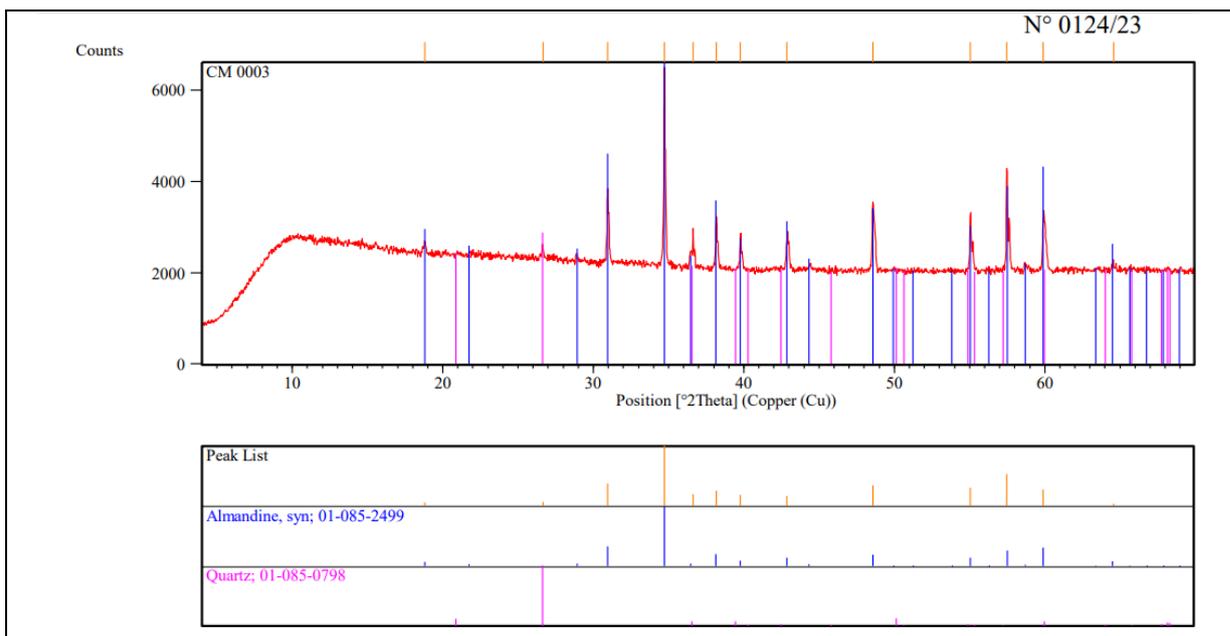


Figura 5.15: Difratoograma de um dos grãos de granada (CM003).

5.6 Crisoberilo

Presente apenas nas amostras CM003, CM004 e CM005. O crisoberilo foi identificado neste estudo durante as análises de DRX (figuras 5.2 e 5.16) apresentando predominância nas amostras CM004 e CM005 com pequenas porções de quartzo e granada (CM004) e com andaluzita associada (CM005), além de se apresentar em pequenas porções com o espodumênio (amostra CM003) indicando correlação com os corpos pegmatíticos e graníticos.

5.7 Cassiterita

A cassiterita é encontrada na amostra CM008 e é classificada como mineral pesado, após ser submetida à separação densimétrica com bromofórmio. Além disso, durante a separação magnética utilizando Frantz, o mineral foi classificado na amperagem superior a 0,3A. O processo de catação dos grãos (figura 5.17) foi realizado observando características importantes, tais como a coloração cinza, hábito bipiramidal e reação ao teste de estanhagem.

A análise do MEV-EDS apresentou os valores químicos (quadro 5.7) e a morfologia (figura 5.18) dos grãos. Os grãos apresentaram valores composicionais elevados de Sn e O, caracterizando o dióxido de estanho.

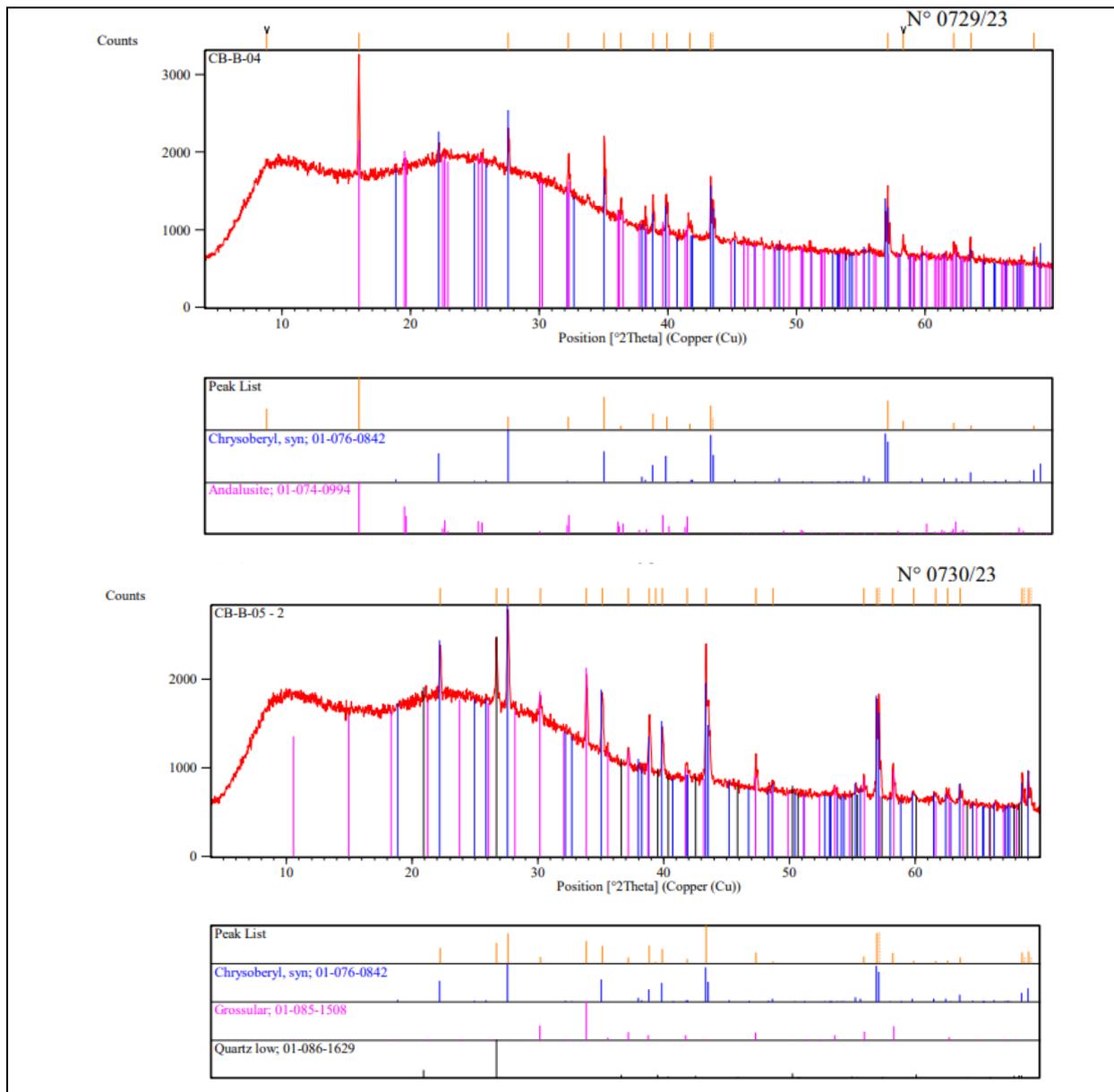


Figura 5.16: Difratogramas dos grãos de crisoberilo das amostras CM004 e CM005.

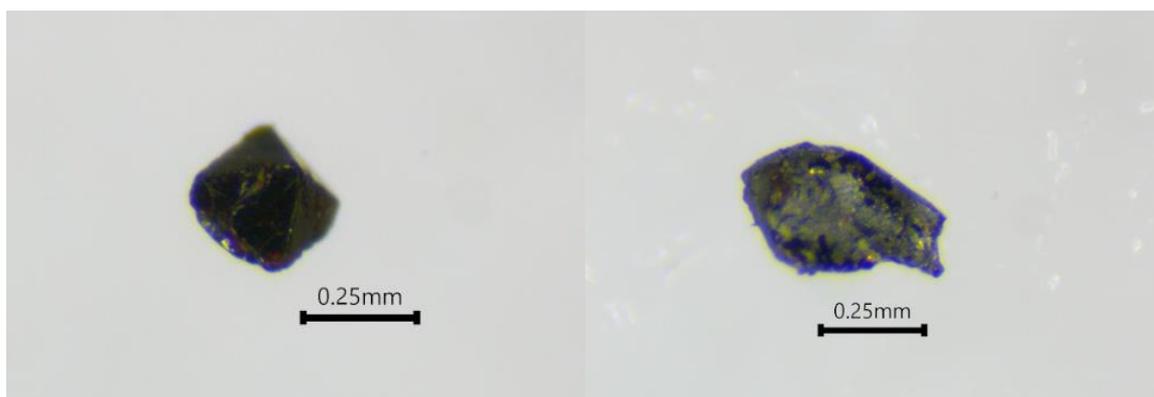
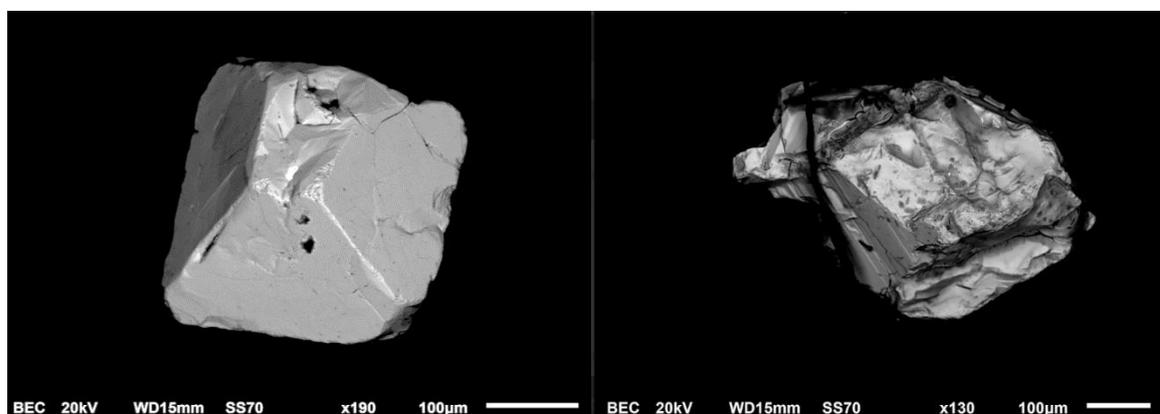


Figura 5.17: Imagem dos grãos de cassiterita em aumento de 4.5X.

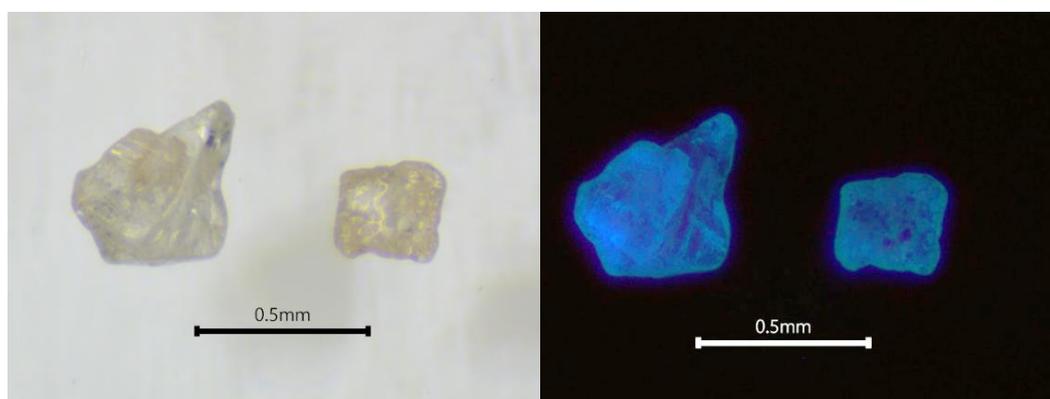
Quadro 5.7: Resultados químicos das análises nos grãos de cassiterita em MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Si (%)	Cl (%)	Zn (%)	Sn (%)	Fe (%)	Ta (%)	Al (%)	Total (%)
CM008	29,36	0,2	0,48	0,33	69,63	0	0	0	100
CM008	29,28	0,27	0	0	69,72	0,22	0,31	0,2	100

**Figura 5.18:** Imagem dos grãos de cassiterita em MEV.

5.8 Scheelita

A scheelita encontrada na amostra CM003 foi caracterizada por ser um mineral pesado, com densidade superior a $2,89 \text{ g/cm}^3$. Durante a separação magnética com Frantz, a scheelita foi classificada como não-atrável e na catação de seus grãos foram observadas características importantes como a sua transparência, fraturas conchoidais e coloração azul intensa sob luz fluorescente (figura 5.19). A figura 5.20 mostra a geomorfologia dos grãos no MEV.

**Figura 5.19:** Imagem dos grãos de scheelita em aumento de 4.5X, com luz comum e fluorescente.

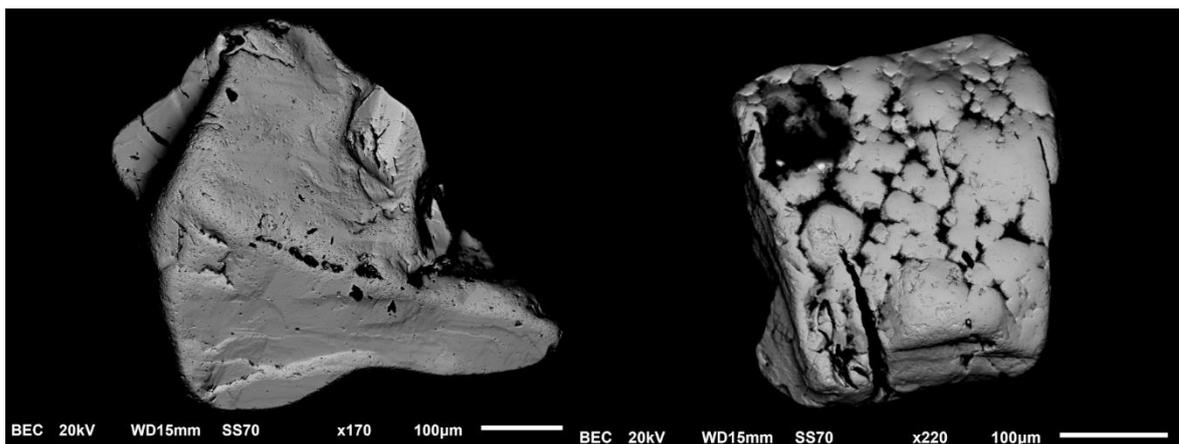


Figura 5.20: Imagens dos grãos de scheelita no MEV.

O resultado da análise do MEV-EDS (quadro 5.8) apresentou os valores de Ca entre 12% e 14% e para o W valores entre 59% e 65%, configurando-se como um tungstato de cálcio.

Quadro 5.8: Resultados químicos das análises nos grãos de scheelita em MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Ca (%)	Sr (%)	W (%)	Fe (%)	Total (%)
CM003	24,09	12,71	3,62	59,58		100
CM003	22,35	13,09		64,25	0,31	100

5.9 Xenotímio

O xenotímio encontrado nas amostras CM003 foi classificado como mineral pesado ao realizar a separação com o bromofórmio, que indicou densidade superior a 2,89 g/cm. Durante a separação magnética com Frantz, o xenotímio apresentou susceptibilidade magnética na amperagem de 0,5A. Na catação (figura 5.21) foi observado características importantes como a sua coloração amarela, brilho sedoso e hábito piramidal curto. O MEV apresenta a morfologia típica do grão de xenotímio na figura 5.21.

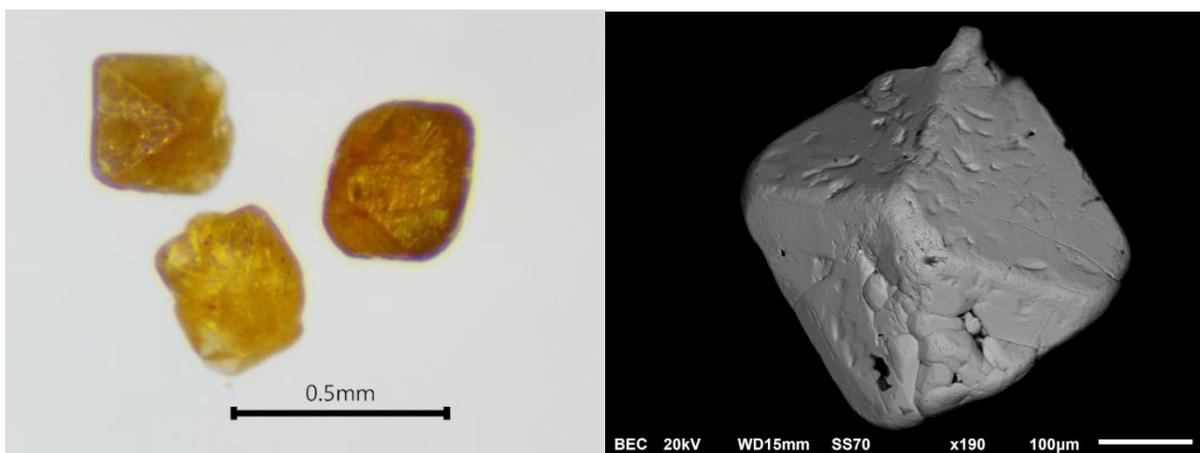


Figura 5.21: Imagens dos grãos de xenotímio em aumento de 4.5X e de um deles no MEV.

Os resultados das análises no MEV-EDS (quadro 5.9) apresentaram valores para Y entre 31% e 38% e para P valores entre 13% e 17%, caracterizando o mineral como fosfato de ítrio.

Quadro 5.9: Resultados químicos das análises de dois grãos de xenotímio no MEV-EDS.

Elemento químico	O (%)	P (%)	Ca (%)	Y (%)	Nd (%)	Sm (%)	Gd (%)	Dy (%)	Ho (%)	Er (%)	Yb (%)	U (%)	Tm (%)	Total (%)
CM003	22	17	0,3	38	0,4	0,6	1,7	5,7	1,7	4,4	4,2	3,8		100
CM003	39	14	0,2	32			1,1	3,6	0,9	3	3,3	2,2	0,6	100

5.10 Gahnita

As amostras CM004 e CM009 contêm gahnita ($ZnAl_2O_4$), um mineral pesado com densidade superior a $2,89 \text{ g/cm}^3$. A gahnita durante a separação magnética com o Frantz apresentou susceptibilidade na amperagem de $0,75A$. Na catação do mineral, foram observadas características importantes como a sua coloração esverdeada, brilho vítreo, diafanidade transparente e hábito octaédrico (figura 5.22).

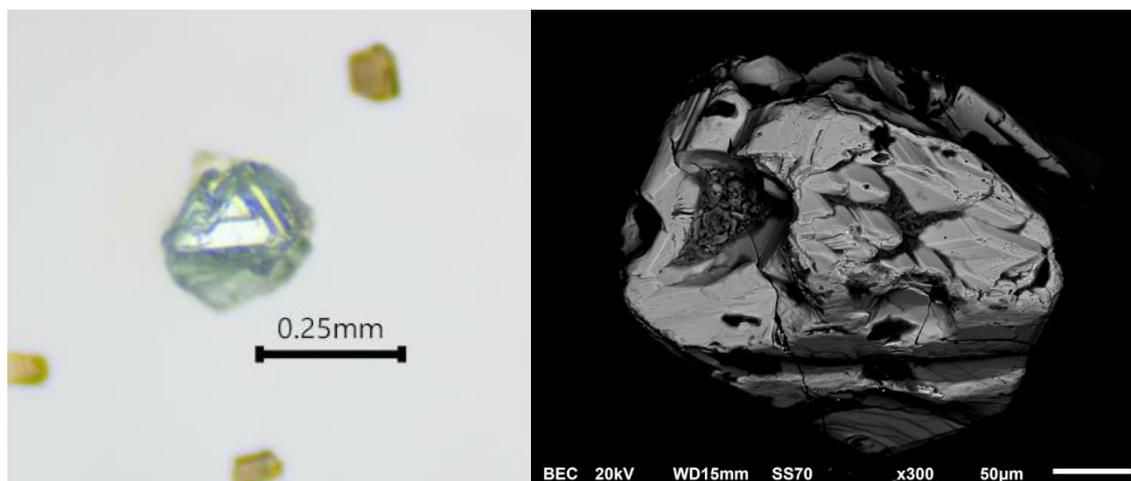


Figura 5.22: Imagem do grão de gahnita em aumento de 4.5X e no MEV.

Os resultados das análises no MEV-EDS (quadro 5.10) apresentou valores de Zn entre 23% e 32% e variação de Fe entre 3% e 12%. Na figura 5.22 é possível observar a geomorfologia do grão de gahnita analisado neste estudo.

Quadro 5.10: Resultados químicos das análises nos grãos de gahnita em MEV-EDS.

Elemento químico	O (%)	Al (%)	Si (%)	Mn (%)	Fe (%)	Zn (%)	Total (%)
CM004	31,73	31,31		0,4	12,79	23,77	100
CM009	33,02	30,48	0,36	0,19	3,95	32	100

5.11 Estauroлита

Contida nas amostras CM001 e CM002, a estauroлита apresentou densidade maior que o bromofórmio durante a separação em meio denso, e caracterizou-se como mineral pesado. A estauroлита no separador magnético Frantz apresentou susceptibilidade magnética em 0,5 A. A catação dos grãos (figura 5.23) realizou-se observando suas características principais como, sua coloração marrom, fraturas subconchoidais e com a presença de inclusões, possivelmente causadas pela variação do Fe entre 9% e 11% em sua composição conforme mostrado nos resultados geoquímicos do MEV (quadro 5.11). A figura 5.24 apresenta a morfologia dos grãos analisados.

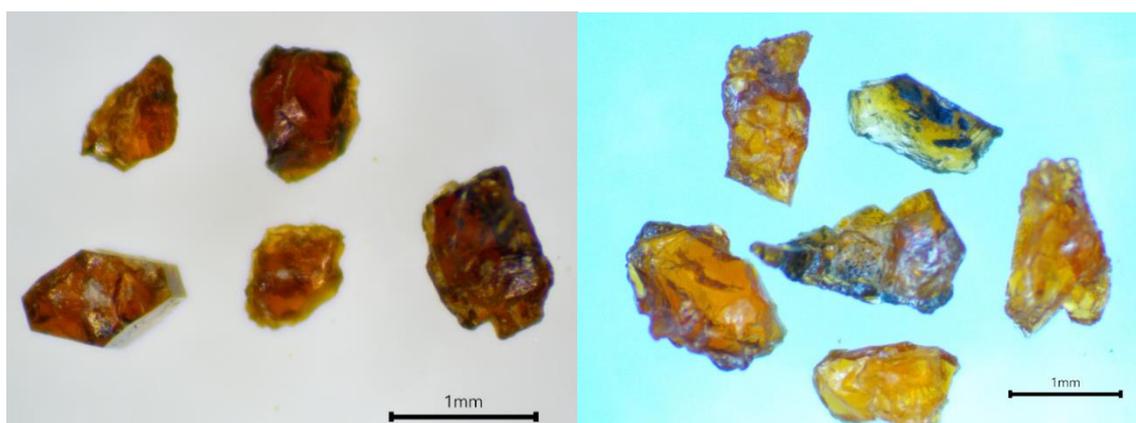


Figura 5.23: Imagem dos grãos de estauroлита em aumento de 2X.

Quadro 5.11: Resultados químicos das análises dos grãos de estauroлита no MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)	Mn (%)	Total (%)
CM001	45,66	28,88	12,91	9,19	0,94	1,66	0,2	0,55	100
CM002	42,27	30,33	13,91	10,54	1,05	1,22	0,26	0,41	100

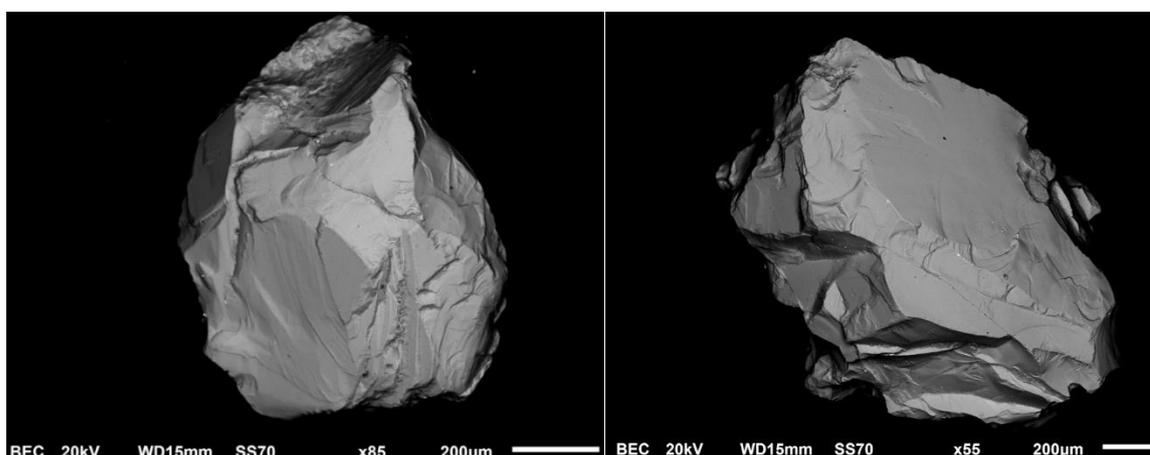


Figura 5.24: Imagens dos grãos de estauroлита no MEV.

5.12 Apatita

A apatita presente na amostra CM007 se classificou como mineral pesado após separação densimétrica com o bromofórmio. Na separação magnética pelo Frantz, apresentou susceptibilidade magnética na amperagem de 0,5A. O processo de catação foi realizado observando suas características principais, como coloração verde, fraturas irregulares e diafaneidade translúcido (figura 5.25). A figura 5.25 revela a geomorfologia do grão analisado.

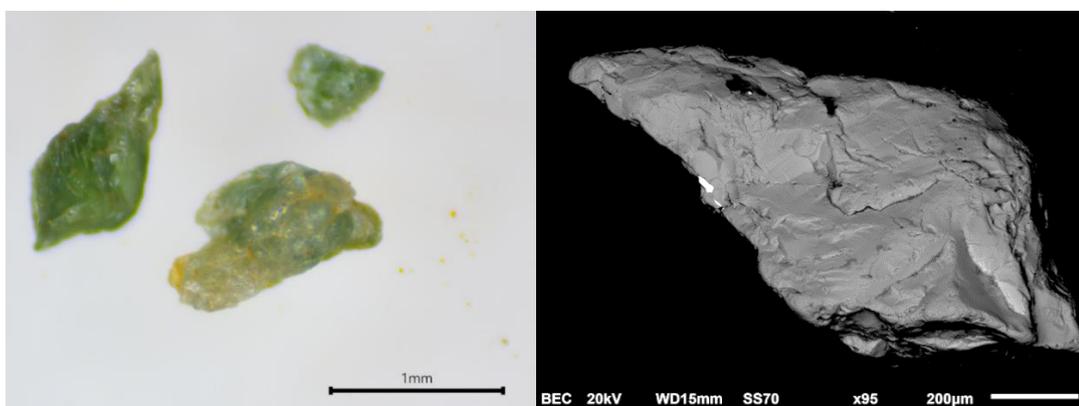


Figura 5.25: Imagens dos grãos de apatita em aumento de 4.5X e a morfologia de um deles no MEV.

O resultado da análise do MEV-EDS (quadro 5.12) apresentou valores para o Ca de 28% e 7% para F, indicando se tratar realmente de uma flúor-apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$).

Quadro 5.12: Resultados químicos das análises nos grãos de apatita em MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	F (%)	Na (%)	P (%)	Ca (%)	Y (%)	Total (%)
CM007	45	0,1	0,1	0,4	0,1	2,6	7,1	0,1	15	28	1,2	100

5.13 Silimanita

A silimanita foi encontrada nas amostras CM003 e CM004, tendo sido classificada como um mineral pesado, com densidade superior a $2,89 \text{ g/cm}^3$. Seus grãos foram selecionados com amperagem superior a 1,0A no separador magnético Frantz. Além disso, foram observadas em lupa características marcantes do mineral, como a coloração amarela, cristais alongados e brilho sedoso (figura 5.26). A morfologia dos grãos analisados pode ser observada na figura 5.27.

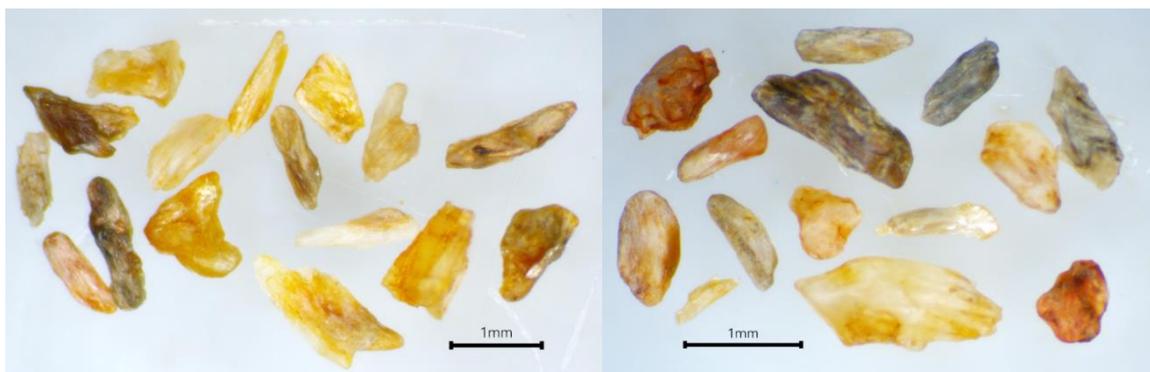


Figura 5.26: Imagens dos grãos de silimanita em lupa, aumento de 2X.

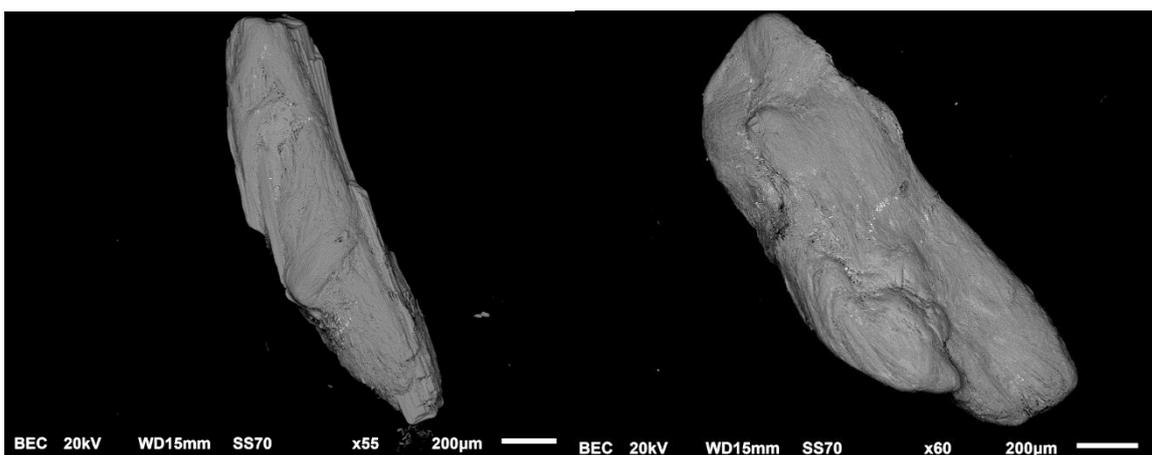


Figura 5.27: Imagens dos grãos de silimanita no MEV.

O resultado da análise do MEV-EDS (quadro 5.13) apresentou os valores químicos da silimanita.

Quadro 5.13: Resultados químicos das análises nos grãos de silimanita em MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	K (%)	Total (%)
CM003	46,89	33,38	19,01	0,73		100
CM004	49,15	32,23	17,99	0,25	0,38	100

5.14 Limonita

A limonita encontrada na amostra CM007 foi classificada como mineralóide pesado na separação densimétrica por bromofórmio. A susceptibilidade da limonita ao separador magnético Frantz ocorreu a partir de 0,3A. O processo de catação (figura 5.28) foi realizado observando características importantes, tais como a coloração marrom, opacidade e formato arredondados dos grãos, possivelmente causados por retrabalhamento sedimentar, além da presença inclusões. O MEV apresentou a morfologia de um dos grãos estudados na figura 5.28.

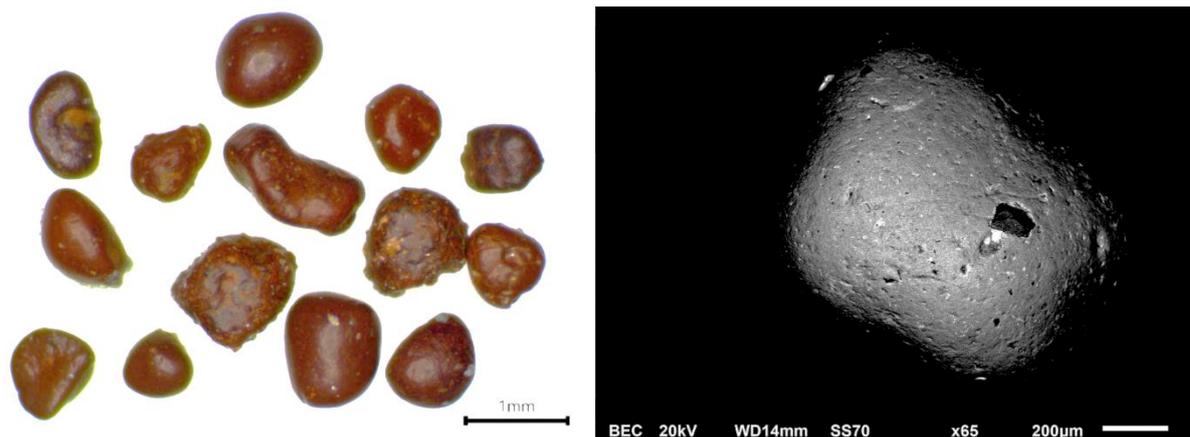


Figura 5.28: Imagens dos grãos de limonita em lupa com aumento de 1.5X e de um deles no MEV.

A limonita apresentou nos resultados do MEV-EDS (quadro 5.14) maiores valores de O e Fe, e também percentual de 12% para Al e Si, o que pode indicar a presença de inclusões nestes grãos.

Quadro 5.14: Resultados químicos da análise do grão de limonita no MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	K (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Fe (%)	Total (%)
CM007	43	12	12	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,2	31	100

5.15 Ilmenita

A ilmenita encontrada na amostra CM004 foi classificada como um mineral pesado, com densidade superior a $2,89 \text{ g/cm}^3$ pela separação com bromofórmio. O resultado pelo separador magnético Frantz apresentado para a ilmenita foi de 0,5A. O processo de catação dos grãos foi realizado observando características importantes como: a coloração cinza, cristais opacos e brilho metálico (figura 5.29). Na figura 5.29 é possível se observar a morfologia de um dos grãos durante a análise em MEV.

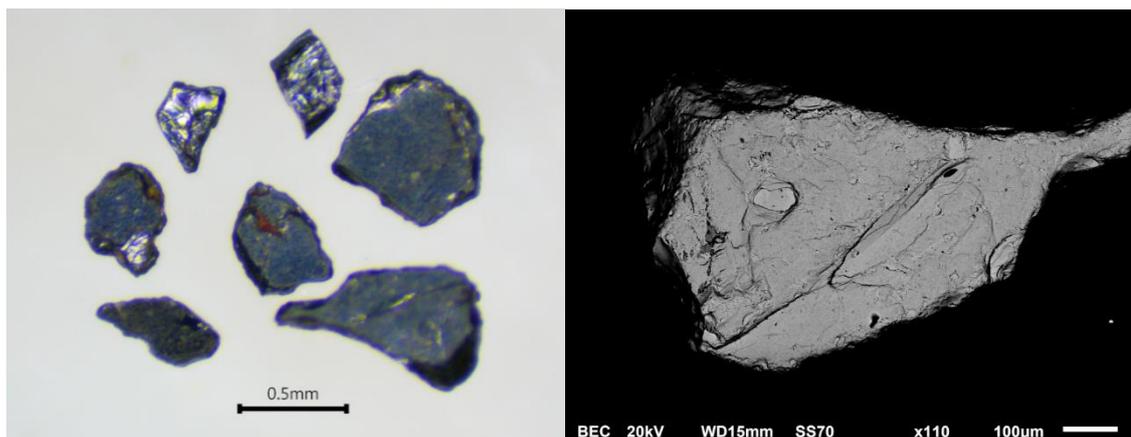


Figura 5.29: Imagens dos grãos de ilmenita em lupa com aumento de 3X e do maior deles no MEV.

O resultado da análise MEV-EDS (quadro 5.15) apresentou valores de Ti em 32% da amostra e 28% de Fe, elementos característicos da ilmenita (FeTiO_3).

Quadro 5.15: Resultados químicos da análise nos grãos de ilmenita pelo MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	K (%)	Ti (%)	V (%)	Mn (%)	Fe (%)	Total (%)
CM004	34	0,3	1,5	1,3	0,1	32	0,2	1,7	28	100

5.16 Monazita

Na amostra CM003 foi encontrado a monazita, mineral pesado com densidade superior a $2,89 \text{ g/cm}^3$ separado por bromofórmio. Durante a separação magnética com Frantz, a monazita apresentou susceptibilidade magnética de 0,5A. Na catação do grão de monazita foram observadas características distintivas como a sua coloração amarelada, brilho gorduroso e hábito prismático alongado (figura 5.30).



Figura 5.30: Imagens do grão de monazita em lupa com aumento de 4.5X e no MEV.

A análise no MEV-EDS apresentou em seus resultados (quadro 5.16) valores interessantes de metais pesados como 24% de Ce, 12% de La, 8% de Nd e 3% de U. Esses valores geoquímicos, com a predominância de Cério indicam se tratar de uma monazita Ce.

Quadro 5.16: Resultado químicos da análise nos grãos de monazita no MEV-EDS.

Elementos químicos	O (%)	P (%)	Ca (%)	La (%)	Ce (%)	Pr (%)	Nd (%)	Sm (%)	Gd (%)	Th (%)	U (%)	Total (%)
CM003	23	14	1,8	13	24	2,2	8,5	2	1,4	7,4	3,35	100

5.17 Proporção dos minerais por amostra

O quadro 5.17 apresenta a proporção dos valores percentuais aproximados de cada mineral observado nos concentrados de bateia. Como se pode observar, turmalina, granada, ilmenita, limonita, piroxênio, monazita e fragmentos de rocha foram observados em todas as amostras. Turmalina, monazita, ilmenita e limonita e fragmentos de rocha apareceram com porções variadas nas amostras. Desses, destaca-se a quantidade de turmalina encontrada em proporções acima de 14%, podendo chegar até cerca de 74% como na amostra CM009. Enquanto a granada e a monazita apresentaram percentuais constantes, 5% e 1% respectivamente (quadro 5.17).

A andaluzita, o crisoberilo, a apatita, a gahnita e a cassiterita não foram individualizados e estão contabilizados como “OUTROS”, juntamente com as micas, com valores que variaram entre 14% e 21%. O espodumênio neste quadro possivelmente é o principal mineral representante do grupo dos piroxênios, se apresentando nas amostras CM001, CM002, CM003, CM007, CM009 E CM010 com percentual entre 1% e 14%.

Quadro 5.17: Proporção dos minerais pesados presentes em cada amostra (Modificada de Projeto Jequitinhonha (SGB - CPRM 2010)).

CÓDIGO DA AMOSTRA	TURMALINA	GRANADA	ILMENITA	LIMONITA	PIROXÊNIO	MONAZITA	SCHEELITA	XENOTÍMIO	ESTAUROLITA	SILLIMANITA	F. ROCHA	OUTROS	TOTAL
CM001	39%	5%	5%	15%	3%	1%	0%	0%	1%	1%	15%	15%	100%
CM002	14%	5%	2%	12%	14%	1%	0%	0%	1%	1%	36%	14%	100%
CM003	45%	5%	5%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	17%	18%	100%
CM004	51%	5%	2%	3%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	18%	20%	100%
CM005	59%	5%	1%	3%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	15%	15%	100%
CM006	52%	5%	2%	4%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	15%	21%	100%
CM007	25%	5%	1%	3%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	46%	18%	100%
CM008	60%	5%	1%	3%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	15%	15%	100%
CM009	74%	5%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	3%	14%	100%
CM010	65%	5%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	13%	13%	100%

5.18 Possíveis áreas fonte dos minerais identificados

Foram elaborados mapas a partir das informações obtidas durante a realização deste trabalho, com o objetivo de compreender a proveniência dos minerais presentes nas amostras. Os mapas foram categorizados pela importância dos minerais, o mapa dos concentrados de lítio (figura 5.31) é referente as amostras em que os grãos de minerais litiníferos coletados durante essa pesquisa, enquanto o mapa dos concentrados (figura 5.32) tem como objetivo a correlação do restante dos minerais pesados vistos nesse trabalho.

O mapa da figura 5.31 estaca as amostras em que se localizou o espodumênio e a petalita, minerais de lítio, sendo este primeiro na amostra CM003 e a petalita nas amostras CM002 e CM005. O mapa apresenta também a divisão das sub-bacias do rio Jequitinhonha e as litologias mapeadas.

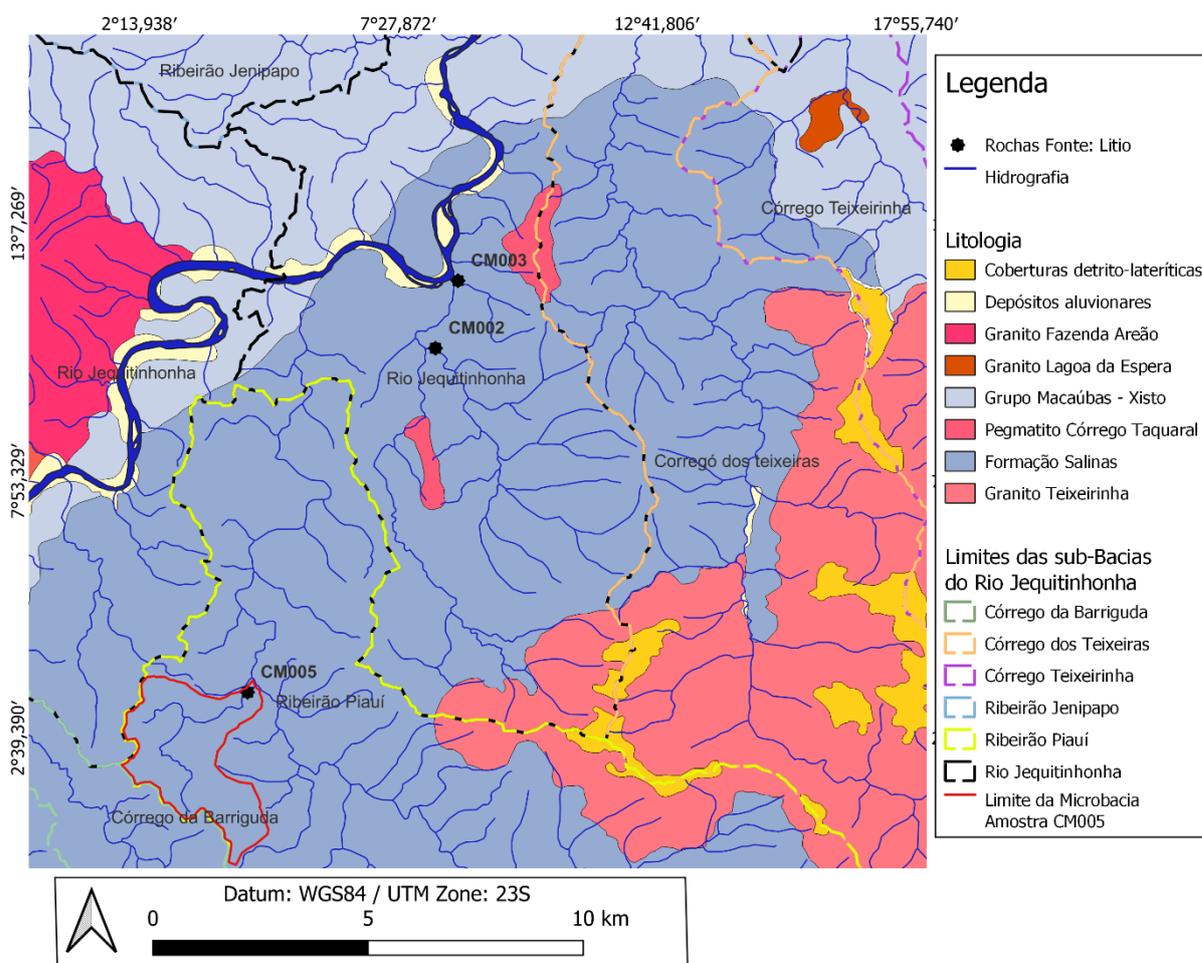


Figura 5.31: Mapa com a localização das amostras que apresentaram minerais de lítio e as sub-bacias do rio Jequitinhonha. Destaque para a microbacia da mostra CM005 em vermelho no mapa (Modificado de SGB - CPRM 2010).

As amostras CM002 e CM003, como pode-se na figura 5.31, foram coletadas em drenagens cujas nascentes cortam (CM002) ou estão muito próximas (CM003) de afloramentos

do Pegmatito Córrego Taquaral. No caso da sub-bacia da amostra CM003, a drenagem não corta o pegmatito, mas pode ser um problema de escala do mapa (o corpo pegmatítico pode ser um pouco maior do que o desenhado no mapa). Porém, na microbacia da amostra CM005 (vide detalhe no mapa da figura 5.31 na sub-bacia do ribeirão Piauí) não foi mapeado nenhum corpo deste pegmatito, o que pode apontar para a necessidade de um mapeamento de maior detalhe nesta região.

O mapa da figura 5.32 mostra todas as amostras desta pesquisa e sua relação com as sub-bacias do rio Jequitinhonha e as litologias da região. As amostras foram separadas em 4 categorias em função de suas possíveis rochas fonte: Formação Salinas e Pegmatito Córrego do Taquaral; Formação Salinas + Granito Teixeira; Formação Salinas e Grupo Macaúbas e Formação Salinas.

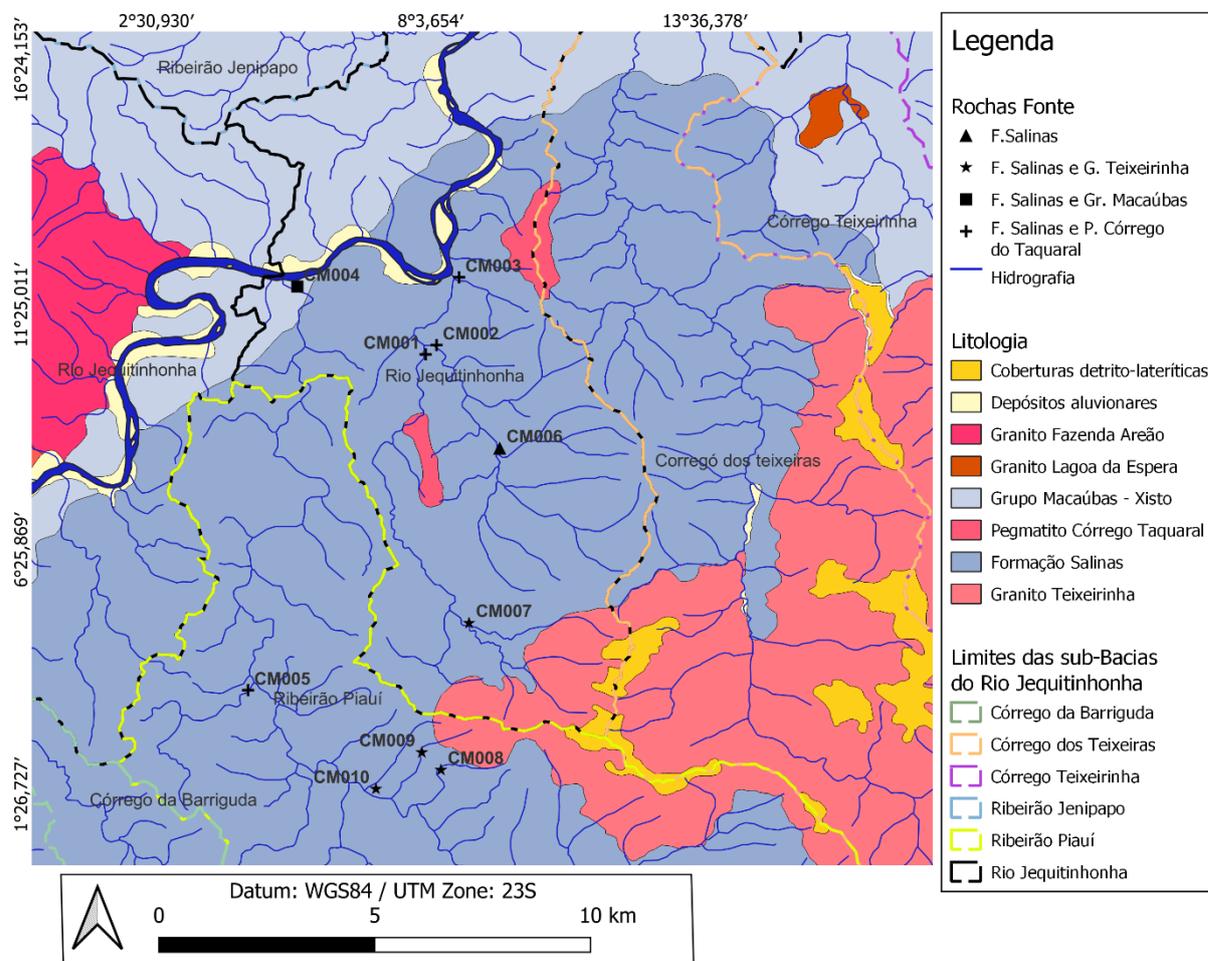


Figura 5.32: Mapa dos concentrados e as sub-bacias do rio Jequitinhonha. (Modificado de SGB - CPRM 2010).

Apesar da amostra CM001 apresentar composição mineralógica semelhante às amostras CM002 e CM003 (quadro 5.17), e ela não possuir minerais de lítio propriamente ditos.

As três amostras apresentaram estauroлита e silimanita, já descritas em pegmatitos LCT na região (Paes *et al.* 2010), além de apresentar em comum o grupo dos piroxênios em suas amostras. Outra amostra destoante desse grupo é a CM003, que apresenta os minerais xenotímio e a scheelita. A scheelita teve sua descrição na região de Araçuaí em 1983 por Pedrosa-Soares *et al.* que associou o mineral ao Grupo Macaúbas tendo sido encontrado nos quartzos mica-xistos. Enquanto para o mineral xenotímio não se encontrou registros descritivos de sua ocorrência na área de estudo, entretanto de acordo com Pires (2010) é comum a ocorrência desse mineral em rochas e pegmatitos graníticos como mineral acessório. A amostra CM006, apesar de ter alguns de seus córregos com as nascentes no Pegmatito Córrego do Taquaral, não possui mineralogia semelhante às três, tendo sido separada em outra categoria (Formação Salinas apenas).

As amostras de concentrados do grupo Formação Salinas + Granito Teixeira, são as amostras ao sul do mapa e pertencem principalmente a sub-bacia do ribeirão Piauí. As amostras CM008, CM009 e CM010 apresentam elevados valores de concentração de turmalina (quadro 5.17), diferentemente da amostra CM007 que possui valores intermediários para o mineral, essa diferença pode estar relacionada a posição desta última amostra em outra sub-bacia, a do córrego Teixeiras (figura 5.32). A turmalina está presente entre os constituintes principais do Granito Teixeira (Paes *et al.* 2016).

A última categoria é a dos concentrados provenientes da Formação Salinas + Grupo Macaúbas (CM004). Essa amostra tem uma mineralogia semelhante a amostra CM006 (quadro 5.17) devido a sua proveniência, o que difere ambas amostras é o ponto de coleta da amostra CM004 estar localizado sobre a divisa do Grupo Macaúbas com a Formação Salinas, observa-se ainda que grande parte de sua microbacia é determinada na Formação Salinas.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES

O estudo de sedimentos de corrente vem sendo usado como um dos métodos de prospecção na exploração mineral há séculos (Doherly *et al.* 2023). Trata-se de uma importante ferramenta para caracterizar a geologia regional e fazer descobertas de potenciais novos depósitos minerais (Ottesen e Theobald 1994). Os concentrados de bateia dos canais fluviais têm historicamente fornecido a solução mais custo-efetiva de amostragem para cobrir amplas áreas, permitindo que levantamentos geoquímicos (muito mais caros) sejam direcionados para áreas que justifiquem uma investigação mais profunda (Stendal e Theobald, 1994; Averill, 2001).

Apesar do uso conjunto de técnicas analíticas mais modernas (DRX e MEV-EDS) permitir uma melhor prospectividade da análise de concentrados de bateia (Averill 2009; Cooke *et al.* 2020; Kelley *et al.* 2022), essa ainda apresenta muitos desafios e dificuldades. Em especial, durante a separação sob lupa. Por exemplo, espodumênio e a andaluzita desta região que demonstram características óticas semelhantes. Além disso, estes minerais possuem propriedades minerais semelhantes, como densidade acima do bromofórmio e dureza alta. Assim, só foi possível separar os dois com a utilização do DRX, levando-se em consideração que o MEV-EDS não identifica elementos leves como o Li. Assim como os grãos de espodumênio e andaluzita, do grupo dos tectossilicatos os grãos de petalita e quartzo analisados apresentaram também características minerais que dificultaram a separação mineralógica de seus grãos devido às similaridades de suas propriedades físicas, como valores de densidade próximos, cor dos grãos e tipo de fraturas observadas dos grãos destes minerais semelhantes, por vezes conchoidais. Para a diferenciação também foi necessária a utilização da DRX e do MEV-EDS.

Apesar das dificuldades encontradas, a caracterização mineral dos concentrados de bateia de pequenas drenagens de 2ª ordem (*sensu* Strahler 1952; 1957) localizadas nos municípios de Araçuaí, Itinga e Itaobim permitiu a identificação de 16 minerais (quadro 5.17), incluindo 2 minerais ricos em lítio (espodumênio e petalita). A localização das amostras com minerais de lítio pode ser vista no mapa da figura 5.31. Como se pode observar no quadro 5.17, essas amostras contêm ainda turmalina, granada, ilmenita, limonita, estauroлита, silimanita e alguns fragmentos de rocha em comum.

A presença dos minerais de lítio (espodumênio e a petalita) e minerais como a cassiterita e o crisoberilo, minerais que possuem Sn e Be em sua composição, respectivamente, corrobora a classificação de Pedrosa - Soares *et al.* (2011) dos pegmatitos do Campo de Itinga, como pegmatitos a elementos raros do tipo LCT (Ginsburg *et al.* 1979; 1984; Černý 1991; e Černý e Ercit 2005). Destaca-se ainda a presença nessas amostras de estaurolita, silimanita e andaluzita (quadros 5.17 e 5.3), minerais encontrados em rochas de origem sedimentar, o que corrobora a proposta de Paes *et al.* (2010) acerca da granitogênese do tipo S dos granitos da supersuíte G4 da região. Assim, a assembleia mineralógica encontrada nessas amostras (CM001, CM002 e CM003) infere a presença de granitos tipo S com a ocorrência de pegmatitos do tipo LCT a montante do ponto de coleta. Como se pode observar no mapa da figura 5.31, essas amostras são provenientes do pegmatito mapeado como Córrego do Taquaral, dividido no mapa em dois corpos aflorando em duas sub-bacias, sendo uma no limite do córrego dos Teixeiras com a sub-bacia rio Jequitinhonha e outro corpo inteiro na sub-bacia do rio Jequitinhonha. Observou-se durante a pesquisa petalita na amostra CM005, que pode inferir a existência de um outro corpo pegmatítico ainda não mapeado na sub-bacia ribeirão Piauí. Os estudos sobre o Pegmatito Córrego do Taquaral conforme Romeiro e Pedrosa-Soares (2005); Dias (2015) definem os corpos do pegmatito como ricos em lítio, encaixados nos xistos da Formação Salinas.

Importante destacar que, quando avaliados os valores do quadro 5.17, esses dados apresentam semelhanças na composição (proporções minerais) dos quatro grupos de amostras estudadas (categorias em função de suas possíveis rochas fonte: Formação Salinas e Pegmatito Córrego do Taquaral; Formação Salinas + Granito Teixeira; Formação Salinas e Grupo Macaúbas e Formação Salinas) com as rochas aflorantes nas porções mais a montante das microbacias das drenagens onde formam coletados os concentrados. Apesar da assembleia de minerais amostrados em concentrados de bateia indicar a presença de uma fonte a montante que foi parcial ou totalmente erodida (Ottesen e Theobald 1994; Doherty *et al.* 2023), não é possível se estabelecer uma correlação direta entre o percentual de dado mineral na amostra com seu percentual na rocha fonte. Isto porque este percentual pode indicar tanto uma grande área aflorante como um pequeno depósito que foi completamente erodido e forneceu maior quantidade de determinados minerais para a drenagem (Stendal e Theobald 1994; Doherty *et al.* 2023). Além disso, o concentrado de bateia amostrado em uma drenagem reflete não apenas uma fonte, mas o conjunto complexo de todas as litologias existentes a montante do ponto de coleta (Luz *et al.* 2004). Cada uma dessas rochas responde de forma diferente aos processos intempéricos e de erosão (Amarante 2021), o que dificulta ainda mais essa correlação. Pode-se

observar ainda que minerais mais densos, como a cassiterita, apesar da mesma área fonte, foram identificados no ponto de coleta mais próximo à sua área fonte (CM008; figura 5.32).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O uso de concentrados de bateia na exploração mineral tem raízes seculares, se destacando por seu custo relativamente baixo (Doherty *et al.* 2003). Atualmente, são poucos os trabalhos que utilizaram esse tipo de material. O presente projeto provou que os concentrados de bateia quando analisados por técnicas tradicionais (separação magnética, diferenças de densidade e características sob lupa binocular) aliadas a técnicas mais modernas (DRX, MEV-EDS) podem ainda muito contribuir para um melhor entendimento da geologia regional e apontar novas áreas para exploração mineral.

A análise de dez amostras de drenagens e 1ª e 2ª ordens (*sensu* Strahler 1952; 1957) da bacia do rio Jequitinhonha (todas localizadas na folha Itaobim, próximas aos municípios de Araçuaí e Itaobim) permitiu a identificação de 16 diferentes minerais, sendo dois litiníferos (espodumênio e petalita), reconhecidos em três das amostras. Notou-se também a presença do xenotímio na amostra CM003, mineral de ítrio, possivelmente associado aos pegmatitos ETR de classificação NYF (Černý e Ercit 2005), ainda não descrito na região de estudo, o que sugere uma investigação acerca de sua proveniência. Além disso, a avaliação espacial da distribuição dos demais minerais encontrados nas amostras não apenas enterra a probabilidade de existirem pegmatitos NYF (Černý e Ercit 2005), como também aponta uma nova área de exploração na microbacia da amostra CM005.

REFERÊNCIAS

- Abe, Y. 2010 Rare Metal Series—Current Status of Lithium Resources; *JOGMEC Mineral Resources Report*; Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC): Chiba, Japan.
- Alecrim, J.D. 1982. Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte:METAMIG, 298 pp.
- Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz, S., Whittington A. 2003. Tectônica quebra-nozes e a gênese do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. In: *SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, Búzios, Resumo expandido, 40-42.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C.P., Whittington, A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149: 43-63.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4):349-364.
- Amarante, R. T. 2021. *Mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente na borda do Cráton São Francisco e Cinturão Brasília, Minas Gerais: definição de background geoquímico e aplicação de análise estatística multivariada*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Inst. Geoc., UFMG. Belo Horizonte, 107p.
- Ateh, K. I., Suh, C. E., Shuster, J., Shemang, E. M., Vishiti, A., Reith, F., Southam, G. 2021. Alluvial gold in the Bétaré Oya drainage system, east Cameroon. *J. Sediment. Environ.* 6, 201-212.
- Averill, S. 2001. The application of heavy indicator mineralogy in mineral exploration with emphasis on base metal indicators in glaciated metamorphic and plutonic terrains. *Geological Society*, London, Special Publication, 185, 69–81,
- Averill, S. 2009. Useful Ni-Cu-PGE versus kimberlite indicator minerals in surficial sediments: similarities and differences. *Geological Association of Canada*, Short Course Notes, 18, 125–139.
- Barbosa, C.C. 2021. *Caracterização estrutural, mineralógica e química mineral do pegmatito Bananal: um depósito de lítio do Campo Pegmatítico de Curralinho, Salinas, MG*. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 127 f.
- Borborema, P. H. L. 2023. *Pegmatitos litiníferos de Araçuaí e Itinga(MG): importância geológica e econômica*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 61p.

Braga, P. F. A., Sampaio, J. A. 2008. Lítio. In: Luz, A. B., Lins, F. A. F. (Eds.). 2008. *Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2ªed., p. 585-603.

Braga, P. F. A., França, S. C. A. 2013. *Lítio: um mineral estratégico*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Série Estudos e Documentos, 81.

BRASIL. Decreto nº 10.627, de 26 de fevereiro de 2021. Dispõe sobre a qualificação da política de fomento à pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de tecnologias da informação e comunicação no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 fev. 2021. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Resolução CPPI nº 126, de 10 de junho de 2020. Diário Oficial da União, Edição 148, Seção 1, p. 14. Publicado em 04/08/2020.

Cameron E.N. Jahns R. H., McNair A. H., Page L. R. 1949. Internal structure of granitic pegmatites. In: *Economia Geology. Monograph 2*, 115p.

Campos, A. R. de., Luz, A. B. da., Carvalho, E. A. de. 2004. *Separação em Meio Denso*. CETEM. Rio de Janeiro.

Černý, P. 1991. Rare-Element Granitic Pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatites deposits. *Geoscience Canada*, 18: 49-67.

Černý, P., Ercit, T. S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 43, 2005-2026.

Černý, P., London, D., Novák, M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements*, 8, 289-294.

Chaves, M. L. de S. C., Dias, C. H. 2022. Lítio em Minas Gerais: mineralogia, depósitos e estágios de geração de espodumênio na província pegmatítica oriental brasileira. *Terrae Didatica*, 18(00).

Cidade, T. P., Ávila, C. A., Neumann, R., Faulstich, F. R. L., Silva, V. H. R. M. da, e Sousa, S. S. da C. G. 2020. Minerais pesados de saprólitos de pegmatitos intrusivos no ortognaisse Resende Costa: caracterização e correlação com a Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 20(3), 3-22.

Chapman, R.J., Banks. D. A., Styles, M. T., Walshak, R. D., Piazzolo, S., Morgon, D. J., Grimshaw, M. R., Spence-Jones, C. P., Matthews, T, J., Borovinskaya, O. 2021. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Mineralium Deposita*. 56, 1563-1588.

Clarke, D. B., Dorais, M., Barbarin, B., Barker, D., Cesare, B., Clarke, G., e Woodard, H. H. (2005). Occurrence and origin of andalusite in peraluminous felsic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 46(3), 441-472.

Cooke, D.R., Wilkinson, J.J., Baker, M., Agnew, J., Phillips, J., Chang, Z., Chen, H., Wilkinson, C.C., Inglis, S., Hollings, P., Zhang, L., Gemmell, J.B., White, N.C., Danyushevsky, L., Martin,

H. 2020. Using Mineral Chemistry to Aid Exploration: A Case Study from the Resolution Porphyry Cu-Mo Deposit, Arizona. *Economic Geology*. 115 (4): 813–840.

Correia-Neves, J.M., Pedrosa-Soares, A.C., Marciano, V.R.P.R.O. 1986 A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 106-118.

Dana, J. D., Hurlbut, C. S. Jr. 1981. *Manual de mineralogia*. 3ª Edição, Editora Livros Técnicos e Científicos. 996 p.

Dardenne M.A. e Schobbenhaus C. 2003. Depósitos minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas. In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Goncalves J.H. (eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Brasília, p. 365-447.

De la Hoz, G. M., Martínez, V. R., e Vedia, J. L. 2013. El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares. *Temas de Biología y Geología del NOA. Instituto de Bio y Geociencias del NOA*. 3(3), 58-67.

Dias, C. H. 2015. *Mineralogia, tipologia e causas de cor de espodumênios da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e química mineral de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (Minas Gerais)*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Inst. Geoc., UFMG. Belo Horizonte, 127p.

Doherty, M. E., Arndt, K., Chang, Z., Kelley, K., Lavin, O. 2023 .Stream sediment geochemistry in mineral exploration: a review of fine-fraction, clay-fraction, bulk leach gold, heavy mineral concentrate and indicator mineral chemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Jun. doi: 10.1144/geochem2022-039.

Fletcher, W. K. 1997. Stream sediment geochemistry in today's exploration world. *In Proceedings of exploration*. Vol. 97, pp. 249-260.

Flexer, V., Fernando, C., Inés, C. 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188-1204.

Fischel, D.P., Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Costa, A.G., Rosière, C.A. 1998. Geology and Sm-Nd isotopic data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes (Ribeira Belt) in the Abre Campo Manhuaçu region, Minas Gerais, Brazil. In: *International Conference on Basement Tectonics*, 14, Ouro Preto. UFOP, Extended Abstracts, p. 21-23.

Ginsburg, A.I., Timofeyev, I.N., Feldman, L.G. 1979. Principle of geology of the granitic pegmatites. In: *Nedra Moscow*. p.296.

Ginsburg, A. I. 1984. The geological condition of the location and the formation of granitic pegmatites. In: *International Geological Congress*, 27. Canada. v.15, p.245-260.

Grew, E. S. 2020. The minerals of lithium. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 16(4), 235-240.

Grosjean C, Miranda PH, Perrin M, Poggi P. 2012. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renew Sustain Energy Rev* 16:1735–1744.

Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Kesler, S.E., Everson, M.P., Wallington, T.J., 2011. Global lithium availability: a constraint for electric vehicles? *J. Ind. Ecol.* 15, 760–775.

Guzzo, P. L. 2008. Quartzo. *Rochas e Minerais Industriais* – Rio de Janeiro: CETEM , 681-721.

IBGM – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS & METAIS PRECIOSOS. Manual Técnico de Gemas. 2009. Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas & Metais Preciosos, Departamento Nacional de Produção Mineral, 220 p.

Jahns, R.H. 1955. The study of pegmatites. *Econ. Geol.*, Anniversary Volume, Part II, 50: 1025–1130.

Jahns, R.H., Burnham, C.W. 1969. Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Econ. Geol.*, 64 (8), 843–864.

Jahns, R.H. 1982. Internal Evolution Of Pegmatite Bodies. In: *Granitic Pegmatites In Science And Industry*. Winnipeg, Mac. Short Course, Handbook, 8: 293–327.

Jiankang, L., Tianren, Z., Xifang, L., Denghong, W., Xin, D. 2015. The Metallogenic Regularities of Lithium Deposits in China. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 89(2), 652–670.

Kelley, K.D., Graham, G.E., Pfaff, K., Lowers, H.A. and Koenig, A.E. 2022. Indicator mineral analyses of stream-sediment samples using automated mineralogy and mineral chemistry: applicability to exploration in covered terranes in eastern Alaska, USA. *Ore Geology Reviews*, 148, 105021, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105021>

Kemp, J. F. 1924 The pegmatites. *Economic Geology*, 19(8), 697–723.

Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., Wallington, T. J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55–69.

Ketchaya B.Y., Dong, G., Santosh, M., Lemdjou, Y. B. 2022. Microchemical signatures of placer gold grains from the Gamba district, northern Cameroon: Implications for possible bedrock sources. *Ore Geology Reviews*. Volume 141.

Klein, C., Hurlbut, C. S. Jr. 1985. *Manual of Mineralogy (after James D. Dana)* 20th ed. John Wiley & Sons.

Klein, C., Dutrow, B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. Traduzido por Rualdo Menegat. Porto Alegre: Bookman. 23ª ed. 724p.

Kogel J. E., Society for Mining Metallurgy and Exploration (U.S.). 2006. *Industrial minerals & rocks: commodities markets and uses* (7th ed.). Society for Mining Metallurgy and Exploration. 1548p.

Landes, K. K. 1933. Origin and classification of pegmatites. In: *American Mineralogist*. v.18, n.2, p.33-56, 95-103.

Lima S.A.A., Martins-Neto M.A., Pedrosa-Soares A.C., Cordani U.G., Nutman A. 2002. A Formação Salinas na área-tipo, NE de Minas Gerais: Uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e idades U-Pb SHRIMP. *Rev. Bras. Geociências*, 32: 491-500.

London, D. Pegmatites. 2008. Mineralogical Association of Canada, (The Canadian *Mineralogist*, *Special Publication* 10), Québec. 347 p.

López, S.R.L. 2017. Lithium- and boron-bearing brines in the Central Andes: exploring hydrofacies on the eastern Puna plateau between 23° and 23° 30' S. *Miner Depos* 52:35–50. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0656-x>

López, S.R.L, Salvi S (2021) Brine grades in Andean salars: when basin size matters. A review of the Lithium Triangle. *Earth Sci Rev* 217:103615.

Luz, A. B., Sampaio, J. A., Almeida, S. L. M. 2004. *Tratamento de Minérios*. 4 ed. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2004.

Mendoza, A. A. S., Escalante, J. L. Z., Morejon, C. F. M., Araya, A. C. 2015. Estudo da evaporação solar da salmoura no processo de concentração do lítio do Salar de Uyuni-Bolívia. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, 2(1), 900-905.

Morais, R.M. de. 2017. *Prospecção de rochas ornamentais na área mapeada pelo Projeto Jequitinhonha através de sistemas de informações geográficas*. 124 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

Moutinho, V. F., Neumann, R., Avila, C. A. 2016. Caracterização mineralógica e química do zircão dos pegmatitos da região da mina de Volta Grande, visando a ocorrência de ETR. In: *Jornada de Iniciação Científica*, 24., Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC.

Ottesen, R. and Theobald, P. 1994. Stream sediments in mineral exploration. In: Hale, M. and Plant, J.A. (eds) *Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry*, 6, 147–184.

Paes, V. J. C., Raposo, F.O., Pinto, C. P., Oliveira, F. A. R., 2010. *Projeto Jequitinhonha: estados de Minas Gerais e Bahia: geologia e recursos minerais das folhas Comercinho, Jequitinhonha, Almenara, Itaobim, Joáima e Rio do Prado*. Belo Horizonte: SGB - CPRM. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB.

Paes, V. J. C., Santos, L. D., Tedeschi, M. F., Bettiollo, L.M. 2016. *Avaliação do potencial do lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais*. Belo Horizonte: CPRM. 274p. URL: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17451>

Paes, V. J. C., Marques, E. D., Gomes, D. G. C., Silva, M. A., Marinho, M. S., Di Salvio, L. P. P., Nobrega, M., Santos, E. A. M., Martins, L. A. 2023. *O "Projeto Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil" na Província Pegmatítica Oriental do Brasil: o Serviço Geológico do Brasil - CPRM fomentando a pesquisa mineral*. Informe Técnico, Brasília, n. 19, p. 1-15, jun.

Paiva, G. 1946. Províncias Pegmatíticas do Brasil. *Boletim DNPM/DFPM*, 78, 13-21.

Pedrosa-Soares, A.C.; Costa, A.G.; Correia Neves, J.M. 1983. A mineração de scheelita nas rochas calcossilicáticas do Médio Jequitinhonha - MG. In: *SIMP. GEOL. MINAS GERAIS*, 2. Belo Horizonte, 1983. Anais...Belo Horizonte, SBG. v.1, p. 297-305.

Pedrosa-Soares, A. C., Monteiro, R., Correia-Neves, J. M., Leonardos, O. H., Fuzikawa, K. 1987. Metasomatic evolution of granites, northeast Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 17, 512–518.

Pedrosa-Soares, A. C., Pinto, C. P., Custódio-Netto, J., Araújo, M. C., Castañeda, C., Achtschin, A. B., Basílio, M. S. 2001. A Província Gemológica Oriental do Brasil. In Castañeda, C., Addad, E., Liccardo, A. (Eds.), *Gemas de Minas Gerais* (pp. 16-33). SBG.

Pedrosa-Soares A.C, Chaves M, Scholz R., 2009. Eastern Brazilian Pegmatite Province. In: *International Symposium on Granitic Pegmatites*, 4, Recife, 28p.

Pedrosa-Soares A. C., Noce C. M., Alkmim F. F. D., Silva L. C. D., Babinski M., Cordani U., Castañeda, C. 2007. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Revista Geonomos*, 15(1):1-16.

Pedrosa-Soares, A.C. 2022. Grafita (Sul da Bahia e Nordeste de Minas Gerais) e Lítio (Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG): *Livro de campo de curso promovido pela ADIMB*. 30p

Pedrosa-Soares, A.C., De Campos, C.P., Noce, C., Silva, L.C., Novo, T., Roncato, J., Medeiros, S., Castañeda, C., Queiroga, G., Dantas, E., Dussin, I., Alkmim, F.F., 2011. Late Neoproterozoic - Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí Orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. In: Sial, A. N., Bettencourt, J. S., De Campos, C. P., Ferreira, V. P. (eds) *Granite-Related Ore Deposits*. Geological Society, London, Special Publications, 350: 25-51.

Pellant, C., Pellant, H. 2021. *Rocks and Minerals*. Londres Editora Dorling Kindersley Ltd, 256p.

Phelps, P. R., Lee, C. T. A., Morton, D. M. 2020. Episodes of fast crystal growth in pegmatites. *Nature communications*, 11(1), 4986.

Pires, A.C. 2010. *Xenotima, Gagarinita, Fluocerita e Waimirita da mina Pitinga (AM): mineralogia e avaliação preliminar do potencial do albita granítica para exploração dos elementos terras raras e ítrio*. Porto Alegre, 201p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rodrigues, B. S., Padula, R. 2017. Geopolítica do lítio no século XXI. *Revista Brasileira de Estratégia e Relações Internacionais*, v. 6, n. 12, p. 197-220.

Romeiro, J.C.P.; Pedrosa-Soares, A.C. 2005. Controle do minério de espodumênio em pegmatitos da mina de cachoeira, Araçuaí, Minas Gerais. *Geonomos*, vol.13.n 1 e 2, p. 75-81, 2005.

Roskill 2006. *The Economics of Lithium*. Londres 10th ed. Roskill information Services Ltd, 255p.

Sá J.H.S. 1977. *Pegmatitos litiníferos da região de Itinga Araçuaí, Minas Gerais*. Tese de Doutorado. IGSUSP, São Paulo, 104p

Sá, J. H.S., Svisero, D. P. 1976. Polucita em pegmatito do município de Araçuaí, Minas Gerais. *Anais*, 2, 403-407.

Salomão, P. E. A., Borges, E. A. G. 2020 Lithium extraction in the municipalities of Itinga and Araçuaí in the Jequitinhonha Valley in Minas Gerais. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. e132911798.

Santos, R. F. dos., Alkmim, F. F. de., Soares, A. C. P. 2009. A Formação Salinas, Orógeno Araçuaí (MG): história deformacional e significado tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 1, p. 81-100.

Sarchi, C., Lucassen, F., Meixner, A., Caffè, P. J., Becchio, R., Kasemann, S. A. 2023. Lithium enrichment in the Salar de Diablillos, Argentina, and the influence of Cenozoic volcanism in a basin dominated by Paleozoic basement. *Miner Deposita* 58, 1351–1370. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01181-z>

Schulz, K., Seal, R., Bradley, D., Deyoung, J. 2017 Critical Mineral Resources of the United States—*Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA.

Schumann, W. 1988. *Guia de Pedras Preciosas e Minerais*. Tradução de Gudrun Hamrol. Editora Presença, 128p.

Seer H.J., Brod J.A., Fuck R.A., Pimentel M.M., Boaventura G.R., Dardenne M.A. 2001. Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica neoproterozóica na Faixa de Dobramentos Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3):385-396.

Simmons, W. B., Webber, K. L. 2008 Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*; 20 (4): 421–438.

Snyder, K., Yang, X., Miller, T. 2009. Hybrid vehicle battery technology — the transition from NiMH to Li-ion. *SAE Technical Paper* 8p.

Souza, C. J. M. de. 1999. *Caracterização mineralógica e geoquímica dos pegmatitos da Pederneira na região de Santa Maria do Suaçui, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em

Geociências)-Instituto de Geociências.Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 272 f.

Spadoni, M., Cavarretta, G., Patera, A., 2004. Cartographic techniques for mapping the geochemical data of stream sediments: the sample catchment basin approach. *Environ. Geol.* 45 (5): 593–599.

Stendal, H. and Theobald, P. 1994. Heavy-mineral concentrates in geochemical exploration. In: Hale, M. and Plant, J.A. (eds) Drainage Geochemistry. *Handbook of Exploration Geochemistry*, 6, 185–225.

Strahler, A. 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38, 913-920. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Strahler, A. 1952. Dynamic Basis of Geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 923-938. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)

Strecker MR, Alonso RN, Bookhagen B, Carrapa B, Hilley GE, Sobel ER, Trauth MH (2007) Tectonics and climate of the Southern Central Andes. *Annu Rev Earth Planet Sci* 35:747–787. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140158>

Tahil, W. 2007, The trouble with lithium: *Meridian International Research*, 22p.

Thomas, R.; Webster, J.D.; Davidson, P. (2006). Understanding pegmatite formation: the melt and fluid inclusion approach. In: Webster, J.D. (Ed.). *Melt inclusions in plutonic rocks*. Mineral. Assoc. Can. Short Course, 36, 189-210.

U.S.G.S., 2020, Mineral commodity summaries 2020: *U.S. Geological Survey*, 200 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.

U.S.G.S., 2022. Mineral commodity summaries 2022. *U.S. Geological Survey*, 202 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

U.S.G.S., 2023, Mineral commodity summaries 2023: *U.S. Geological Survey*, 210 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2023>.

Vargas, T. C., França, S. C. A., Braga, P. F. A. 2012. Beneficiamento de minério de espodumênio para produção de compostos de lítio. In: *Jornada de Iniciação Científica*, 20., Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro. CETEM.

Winkler, H.G.F. 1977. *Petrogênese das rochas metamórficas*. Traduzido por Carlos Burger Júnior. 4.ed. São Paulo: Edgard Blucher. p.254.

Wise, M. A., Muller, A., Simmons, William B. 2022. A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, v. 60, n. 2, p. 229-248.

Yaksic, A.Y., Tilton, J.E. 2009. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: the case of lithium. *Resour. Policy* 34, 185–194