

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**RODRIGO CARNEIRO NOVAES**

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E ESPECTRAL EM  
PEGMATITOS LITINÍFEROS DE ARAÇUAÍ – MG E APLICAÇÃO EM  
PROSPECÇÃO MINERAL POR SENSORIAMENTO REMOTO**

**Caçapava do sul**

**2025**

**RODRIGO CARNEIRO NOVAES**

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E ESPECTRAL EM  
PEGMATITOS LITINÍFEROS DE ARAÇUAÍ – MG E APLICAÇÃO EM  
PROSPECÇÃO MINERAL POR SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral - PPGEM da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Filipe Altoé Temporim.

**Caçapava do Sul**

**2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

N696c Novaes, Rodrigo Carneiro

Caracterização química, mineralógica e espectral em pegmatitos  
litiníferos de Araçuaí – MG e aplicação em prospecção mineral por  
sensoriamento remoto / Rodrigo Carneiro Novaes.

148 p.

Dissertação(Mestrado) - Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2025.

"Orientação: Luis Eduardo de Souza".

1. Prospecção mineral. 2. Pegmatitos litiníferos. 3. Análise espectral.  
4. FRX. 5. ASTER. I. Título.

**RODRIGO CARNEIRO NOVAES**

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E ESPECTRAL EM PEGMATITOS  
LITINÍFEROS DE ARAÇUAÍ – MG E APLICAÇÃO EM PROSPECÇÃO MINERAL POR  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Mineral da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 10 de março de 2025

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dra. Luciana Arnt Abichequer

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Juliano Tessinari Zagôto

---

Prof. Dr. Filipe Altoé Temporim

UFG



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2025, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Filipe Altoe Temporim, Usuário Externo**, em 10/03/2025, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2025, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JULIANO TESSINARI ZAGÔTO, Usuário Externo**, em 11/03/2025, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1670833** e o código CRC **85F951DB**.

---

Dedico este trabalho a minha esposa Maria Angélica Kramer Sant'ana, que sempre me apoiou, me acompanhou e incentivou, seja no campo, no laboratório ou em casa a concluir esta jornada.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza e Filipe Temporim Altoé pela orientação e comprometimento com a entrega do trabalho, ao professor Daniel Vale pelo incentivo ao caminho da qualificação, ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) e ao Ifes (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia) -Campus Cachoeiro de Itapemirim pela disponibilização dos laboratórios para execução dos ensaios, e ao amigo Telmo Namem pela disponibilização dos locais para realização do trabalho de campo.

“O que vemos depende do que procuramos.”

**John Lubbock**

## RESUMO

Este estudo investigou a prospecção e análise de pegmatitos em duas áreas do sudeste brasileiro, visando a caracterização geológica das amostras e a verificação da viabilidade de uso de métodos espectrais e químicos como indicativos de mineralizações de lítio. As atividades de campo incluíram a coleta de amostras de rochas e solos em pegmatitos nas regiões de Araçuaí e Engenheiro Schnoor, que passaram por preparo e homogeneização para assegurar a representatividade mineralógica. Na etapa laboratorial, as análises petrográficas evidenciaram feições de minerais como possíveis piroxênios, micas e feldspatos, enquanto a análise de fluorescência de raios X com a S1TITAN apontou valores elevados de elementos como háfnio e ródio relacionados aos pegmatitos. A análise espectral indicou feições características de absorção associadas a minerais com Al-OH, como muscovita, caulinita e halloisita, possibilitando a identificação de minerais por métodos de classificação de mínimos e distância euclidiana. Foram também observadas feições menos proeminentes de minerais ferrosos, como hematita e goethita. Para o pré-processamento e correção atmosférica dos dados ASTER, foi utilizado o QGIS, enquanto o processamento das cenas ocorreu na plataforma Google Colab. Na etapa de processamento, os dados foram re amostrados para a resolução espectral do ASTER, clusterizados e analisados para cada classe, destacando-se uma classe representativa da área estudada, a qual foi utilizada para mapear espectros similares na região. A metodologia mostrou-se eficiente para identificar minerais indicadores e sugerir associações mineralógicas úteis em estudos de prospecção com dados espectrais, embora apresente limitações associadas a erros e restrições no processo de obtenção de espectros em campo e sua aplicação em sensores orbitais. Propõe-se a integração com métodos geofísicos e geoquímicos para uma discriminação mais precisa das áreas anômalas.

Palavras-Chave: Prospecção mineral, Pegmatitos litiníferos, Análise espectral, FRX, ASTER

## ABSTRACT

This study investigated the prospecting and analysis of pegmatites in two areas of southeastern Brazil, aiming to characterize samples geologically and to assess the viability of using spectral and chemical methods as vectors for lithium mineralization. Field activities included the collection of rock and soil samples from pegmatites in the Araçuaí and Engenheiro Schnoor regions, which were prepared and homogenized to ensure mineralogical representativeness. In the laboratory phase, petrographic analyses revealed features of minerals such as potential pyroxenes, micas, and feldspars, while X-ray fluorescence analysis with the S1TITAN highlighted elevated values of elements like hafnium and rhodium associated with pegmatites. Spectral analysis indicated characteristic absorption features related to minerals with Al-OH bonds, such as muscovite, kaolinite, and halloysite, enabling mineral identification through minimum and Euclidean distance classification methods. Less prominent features of ferrous minerals, such as hematite and goethite, were also observed. For ASTER data preprocessing and atmospheric correction, QGIS was used, and scene processing was performed on the Google Colab platform. During processing, the data were resampled to ASTER spectral resolution, clustered, and analyzed per class, with one representative class from the study area being used to map similar spectra in the region. The methodology proved efficient for identifying indicator minerals and suggesting mineralogical associations useful for prospecting studies using spectral data, although limitations were noted due to errors and constraints in the field spectral acquisition process and its application to orbital sensors. Integration with geophysical and geochemical methods is proposed for more precise discrimination of anomalous areas.

**Keywords:** Mineral prospecting, Lithium pegmatites, Spectral analysis, XRF, ASTER.

:

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Assinatura espectral do espodumênio (piroxênio litinífero): curvas de reflectância (A) e contínuo removido curvas (B). As principais características de absorção são destacadas e são fornecidas amostras de fotografias. Curva pontilhada: amostras frescas; curvas completas: amostras com sinais visíveis de intemperismo.....	8
Figura 2 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	12
Figura 3 - (a) Exemplo de diagrama esquemático representando um mecanismo de impulso e extensão facilitando a formação de fusão granítica e intrusão de pegmatitos. (b) Representação de uma região concêntrica regional idealizada de configuração de zoneamento dentro de um pegmatito formado a partir de fusão. Os elementos raros distintivos são delineados das composições dos pegmatitos mais enriquecidos dentro de cada zona. Notavelmente, os pegmatitos mais enriquecidos exibem uma tendência a se manifestar distalmente posições relativas ao granito fonte.....	19
Figura 4 - Mapa esquemático mostrando o alinhamento dos cinco principais corpos de pegmatito (“enxame de diques”) da Mina da Cachoeira (Araçuaí-Itinga).....	20
Figura 5 - Cotação histórica do carbonato de lítio.....	25
Figura 6 - Matérias primas usadas na bateria.....	27
Figura 7 - Baterias de íon-lítio: uma visão geral dos riscos de fornecimento, gargalos e principais atores ao longo da cadeia de fornecimento.....	28
Figura 8 - Identificação da área de estudo mapa geológico simplificado do orógeno Araçuaí e região cratônica adjacente, destacando as super suítes graníticas Neoproterozóicas e Cambrianas (a) e localização da EBPP em escala menor(b)....	35
Figura 9 - Áreas estudadas demonstradas por pontos, e polígonos minerários associados (EPSG: 4326).....	38
Figura 10 - Áreas amostradas para teores do prospecto disponibilizado pelo proprietário do projeto (EPSG: 4326).....	39
Figura 11 - Corte ortogonal de pedra de pegmatito abandonada.....	41
Figura 12 - Embocamento de túnel garimpeiro.....	42
Figura 13 - Zona do xisto (capa – amostra 5) com intrusão pegmatítica.....	43
Figura 14 - Zona de minerais prismáticos intemperizados (amostra 2).....	44
Figura 15 - Mineral de coloração preta com sinais de alteração (amostra 1).....	45
Figura 16 - Horizonte B amostrado, acima do saprolito (amostra 3).....	46
Figura 17 - Amostragem de saprolito em quase contato total com a saída do túnel (amostra 4).....	47
Figura 18 - Encontrado próximo ao local de coleta da amostra, provável lepidolita (mica rosa à direita) e albita (coloração branca, em cristais tabulares se cruzando à esquerda).....	48
Figura 19 - Aspecto do local semi-aflorante de coleta de amostra, mineral verde exposto em massa pegmatítica intemperizada.....	49
Figura 20 - Local de coleta da amostra, acima do local escavado, rocha foliada representando o quartzito micáceo.....	50
Figura 21 - Moinho de discos utilizado.....	51
Figura 22 - Quarteamento em pilha cônica para retirada das alíquotas.....	52

Figura 23 - Alíquotas a serem impregnadas.....	53
Figura 24 - Amostras após cura da resina, prestes a serem enviadas ao laboratório de laminação.....	54
Figura 25 - Almofariz utilizado para moagem manual até 150#.....	55
Figura 26 - Amostras preparadas para análise por FRX.....	56
Figura 27 -S1 TITAN FRX.....	57
Figura 28 - Alíquotas submetidas à análise espectral.....	58
Figura 29 - Função resposta do sensor ASTER para região de infravermelho de ondas curtas (SWIR).....	59
Figura 30 - Cristal de possível feldspato encontrado na lâmina da amostra 2 da área 1, a nicóis cruzados, mostrando cor acinzentada (a) e macla polissintética (b).....	64
Figura 31 - Cristal de possível muscovita encontrado na lâmina da amostra 2 da área 1, a nicóis descruzados, mostrando aspecto incolor e (a) cores de interferência de segunda/terceira ordem. Formas arredondadas são bolhas na lâmina.....	65
Figura 32 - Cristal de mineral mostrando relevo bem definido (a) e discreto pleocroísmo discretamente esverdeado (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.....	66
Figura 33 - Cristais mostrando posição de extinção e cores alaranjadas (a) e (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.....	67
Figura 34 - Cristais mostrando baixo relevo a nicóis descruzados (a) e cor cinza e aspecto deteriorado a nicóis cruzados (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.....	68
Figura 35 - Cristal mostrando relevo médio e forma lamelar incolor a nicóis descruzados (a) cor amarelada a nicóis cruzados (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.....	69
Figura 36 - Teor de elementos encontrados no FRX.....	71
Figura 37 - Erros amostrais da análise FRX.....	73
Figura 38 - Espectros de reflectância das amostras coletadas em campo.....	76
Figura 39 - Lógica para aplicação da função de encontrar picos.....	77
Figura 40 - Mínimos espectrais mapeados através de pontos nas regiões estudadas.	78
Figura 41 - Mínimos do espectro da amostra 1.....	79
Figura 41 - Feições espectrais da amostra 2.....	80
Figura 42 - Feições espectrais da amostra 3.....	80
Figura 43 - Feições espectrais da amostra 4.....	81
Figura 44 - Feições espectrais da amostra 5.....	82
Figura 45 - Feições espectrais da amostra 6.....	83
Figura 46 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 1, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	85
Figura 47 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 2, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	88
Figura 48 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm	

(abaixo) da amostra 3, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	91
Figura 49 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 4, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	94
Figura 50 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm(abaixo) da amostra 5, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	97
Figura 51 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm(abaixo) da amostra 6, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.....	100
Figura 52 - Sobreposição das funções resposta das bandas 4 a 9 com o espectro da amostra 6.....	102
Figura 53 - Espectro da amostra do 1 SWIR reamostrado para o ASTER.....	103
Figura 54 - Espectro da amostra 2 SWIR re-amostrado para o ASTER.....	103
Figura 55 - Espectro da amostra 3 SWIR reamostrado para o ASTER.....	104
Figura 56 - Espectro da amostra 4 SWIR reamostrado para o ASTER.....	104
Figura 57 - Espectro da amostra 5 SWIR reamostrado para o ASTER.....	105
Figura 58 - Espectro da amostra 6 SWIR reamostrado para o ASTER.....	105
Figura 59 - Método do cotovelo para análise de erros entre as classes da imagem 1..	106
Figura 60 - Método do cotovelo para análise de erros entre as classes da imagem 2..	106
Figura 61 - Panorama geral da cena ASTER em composição colorida falsa cor RGB 321, e vista de recorte da área 1 classificada em 10 classes.....	107
Figura 62 - Demonstração da aplicação do método de filtragem para média mais representativa em vermelho reflectância da classe e em preto nova média calculada.	108
Figura 63 - Recorte da cena ASTER da área 1 de onde as amostras foram coletadas,em composição colorida falsa cor RGB 321(A), e sua correspondente classificada (B) (EPSG: 4326).....	109
Figura 64 - Espectro da classe 6, representativa da área 1 e 15 espectros mais similares da biblioteca espectral USGS, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).....	110
Figura 65 - Recorte da cena ASTER da área 2 de onde as amostras foram coletadas,em composição colorida falsa cor RGB 321(A), e sua correspondente classificada (B) (EPSG: 4326).....	112
Figura 66 - Espectro da classe 8, representativa da área 2 e 15 espectros mais similares da biblioteca espectral USGS, pontos no gráfico representam do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).....	113
Figura 67 - Comparação dos espectros da classe 6 e amostras 1 a 5 da área 1, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9)....	115
Figura 68 -Comparação dos espectros da classe 8 e amostra 6 da área 2, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).....	117
Figura 69 - Área 1 de estudo com pontos de coleta (a) em composição ASTER RGB 321, classificada pela similaridade na mesma escala (b) também classificada em	

escala menor (c)(EPSG: 4326).....	118
Figura 70 - Área 2 de estudo com pontos de coleta (a) em composição ASTER RGB 321, classificada pela similaridade na mesma escala (b) também classificada em escala menor (c)(EPSG: 4326).....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns minerais de lítio importantes.....	15
Tabela 2 - Classificação do pegmatito, modificado para mostrar a correlação entre classes e famílias de pegmatitos. NYF = nióbio-ítrio- família do flúor; LCT = lítio-césio-tântalo família; ETRP= elementos terras raras pesado; ETRL = elementos terra rara leves, ETR= elementos terras raras.....	17
Tabela 3 - Setor da economia matérias primas críticas.....	26
Tabela 4 - Dados de teores disponibilizados pelo proprietário dos projetos[sic].* - Amostras 1, 2, 3, 4 e 5 coletadas para este trabalho. ** - Amostra 6 coletada para este trabalho.....	39
Tabela 5 - identificação das amostras coletadas.....	40
Tabela 6 - Tabela de dados médios integral, valores em vermelho são valores em que os pegmatitos apresentaram valores inferiores que as demais amostra, e verde superiores.....	75
Tabela 7 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 1.....	86
Tabela 8 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 2.....	89
Tabela 9 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 3.....	92
Tabela 10 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 4.....	95
Tabela 11 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 5.....	98
Tabela 12 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 6.....	101
Tabela 13 - Valores de cosseno para classificação espectral da classe 6.....	111
Tabela 14 - Valores de cosseno para classificação espectral da classe 8.....	114
Tabela 15 - Amostra das área 1.....	116

## LISTA DE SIGLAS

<b>EBPP</b>	Eastern Brazilian Pegmatite Province
<b>FRX</b>	Fluorescência de raios X
<b>LCT</b>	Lítio-césio-tântalo
<b>SRP</b>	Pegmatitos ricos em espodumênio
<b>ETRP/ETRL</b>	Elementos terras raras pesado/Elementos terras raras leves
<b>NYF</b>	Nióbio-ítrio- família do flúor
<b>ETR</b>	Elementos terras raras
<b>Bbe</b>	Boro Berílio
<b>Li</b>	Lítio
<b>EVs</b>	Veículos elétricos
<b>CNY</b>	Yuan chinês
<b>USD</b>	Dólar americano
<b>(UE)</b>	União europeia
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
<b>SAVI</b>	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
<b>OLI</b>	Operational Land Imager
<b>TM</b>	Thematic Mapper
<b>ETM</b>	Enhanced Thematic Mapper plus
<b>ASTER</b>	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
<b>PCA</b>	Análise de componentes principais
<b>FPCS</b>	Componentes Principais Orientada a Características
<b>SWIR</b>	infravermelho de ondas curtas
<b>VNIR</b>	Visível ao infravermelho de ondas curtas
<b>TIR</b>	Infravermelho termal
<b>USGS</b>	Serviço Geológico dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Estado-da-arte.....	4
1.4.1 Levantamento Geológico.....	4
1.4.2 Levantamentos Geofísicos.....	5
1.4.3 Levantamentos Geoquímicos.....	5
1.4.4 Sensoriamento remoto aplicado à prospecção de pegmatitos.....	6
1.5 Metodologia.....	11
1.6 Organização do trabalho.....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Aspectos geológicos dos depósitos de lítio em pegmatitos.....	15
2.2 Panorama econômico.....	21
2.2.1 Demanda por lítio.....	23
2.2.2 Eletrificação da economia.....	25
2.3 Sensoriamento remoto aplicado à prospecção mineral.....	28
2.3.1 ASTER.....	30
2.4 Classificação não supervisionada K-means.....	31
<b>3. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>32</b>
3.1 Geologia Regional.....	33
3.2 Área de estudo.....	37
3.3 Coleta de amostras no campo.....	38
3.3.1 Reconhecimento da área.....	40
3.4 Preparação das amostras.....	50
3.5 Análise petrográfica.....	52
3.6 Análise química.....	54
3.7 Análise espectral.....	57
3.7.1 Reamostragem dos dados para ASTER.....	58
3.8 Pré processamento dos dados.....	60
3.9 Métodos de clusterização das áreas estudadas.....	61
3.9.1 Métodos de mapeamento dos espectros alvo.....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
4.1 Descrição petrográfica.....	63
4.2 Descrição química composicional.....	70
4.3 Análise de feições espectrais.....	76
4.4 Análise espectrais com biblioteca espectral.....	83
4.5 Reamostragem espectral.....	102
4.6 Clusterização e classificação espectral.....	105
4.7 Mapeamento dos espectros alvo.....	117

<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Província Pegmatítica do Leste Brasileiro (*Eastern Brazilian Pegmatite Province*- EBPP) abrange uma região de cerca de 150.000 km<sup>2</sup>, que se estende desde o estado da Bahia até o Rio de Janeiro. No entanto, mais de 90% dessa área está localizada no leste de Minas Gerais, especificamente na unidade geotectônica conhecida como Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares *et al.*, 2022).

Desde que foi determinada por Paiva em (1946), os limites e subdivisões da província foram redefinidos e refinados ao longo do tempo. Esses ajustes ocorreram com base em mapas mais detalhados e dados analíticos, conforme indicado por vários estudos (Correia-Neves *et al.*, 1986; Pedrosa-Soares *et al.*, 2001a, 2011; Morteani *et al.*, 2000; Netto *et al.*, 2001; Pinto & Pedrosa-Soares, 2001).

Durante o século XX, os pegmatitos da EBPP foram principalmente reconhecidos pela produção de gemas, como água-marinha, turmalinas, topázio e várias formas de quartzo através de garimpos. Além disso, houve extração de minérios como estanho (Sn), lítio (Li) e berílio (Be), assim como minerais industriais, principalmente feldspatos e muscovita, e minerais raros, como fosfatos, minerais de lítio e óxidos de tântalo (Ta), nióbio (Nb) e urânio (U) (Pedrosa-Soares *et al.*, 2022).

No entanto, a partir da década de 1990, a EBPP enfrentou um declínio econômico resultado de uma longa história de mineração predatória, aliada ao aumento da fiscalização legal e ambiental. A partir dos anos 2000 a extração de rochas ornamentais ganhou força na região, mostrando-se mais viável economicamente que os garimpos tradicionais.(Pedrosa-Soares *et al.*, 2022).

Com o crescimento da demanda global por minerais essenciais à transição energética, como o lítio, a EBPP voltou a ser foco de interesse em 2022. Minerais como espodumênio, lepidolita, ambligonita e petalita presentes nos pegmatitos da região tornaram-se alvo de especulação devido às necessidades imediatas impostas pela agenda de descarbonização mundial. Diante deste contexto, torna-se crucial ampliar o conhecimento científico sobre o potencial mineral da EBPP, destacando ferramentas modernas para a exploração mineral, como a espectroscopia de reflectância aplicada ao sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto começou a ser utilizado na exploração mineral ainda na primeira metade do século XX, inicialmente utilizando fotografias aéreas verticais

(Crosta, 2016). Um exemplo marcante de sua aplicação foi destacado por Oliveira (2017) em uma entrevista com o geólogo Breno Augusto dos Santos, integrante da equipe responsável pela descoberta da província mineral de Carajás. Nessa ocasião, imagens aéreas identificaram clareiras na densa floresta amazônica que, após serem investigadas com o auxílio de helicópteros, revelaram-se anomalias geológicas. Esse processo afasta qualquer suposição de que a descoberta se tratava de mero acaso, evidenciando a importância do sensoriamento remoto na exploração mineral.

A espectroscopia de reflectância, técnica fundamental no sensoriamento remoto, permite analisar a resposta espectral de alvos rochosos. Embora essa resposta possa ser afetada por interferências, como a cobertura vegetal ou alterações superficiais dos solos e rochas, a reflectância de determinados minerais em faixas espectrais específicas pode se manter preservada.

Fatores como matéria orgânica, óxidos de ferro, fração de argila e umidade também podem influenciar os espectros de solo e rocha alterada, mas, em muitos casos, a assinatura espectral característica dos minerais permite sua identificação remota com o uso de dados de alta resolução espectral (Galvão *et al.*, 1997).

O presente estudo concentra-se na investigação de dois pegmatitos litiníferos localizados na EBPP, com ênfase na caracterização espectral, mineralógica e geoquímica. O objetivo geral é aplicar técnicas de sensoriamento remoto e análises laboratoriais para aprimorar a caracterização mineralógica e química desses pegmatitos. Para tanto, foram coletadas amostras de rochas de contato, rochas alteradas e solo superficial sobreposto, visando compreender as interações geoquímicas e os processos de alteração associados a esses depósitos.

A espectroscopia de reflectância na região do espectro óptico (400 a 2500 nm) foi utilizada para identificar os padrões espectrais característicos dos minerais presentes nas amostras, complementada pela preparação de lâminas petrográficas impregnadas com resina e análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) para determinar a composição geoquímica das rochas e solos. Além disso, buscou-se correlacionar as assinaturas espectrais com as características mineralógicas e químicas observadas, com o intuito de aprimorar o uso do sensoriamento remoto na identificação e exploração de pegmatitos litiníferos.

Dessa forma, o estudo integra múltiplas abordagens analíticas para estabelecer correlações robustas entre mineralogia, geoquímica e padrões

espectrais, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre esses depósitos e suas aplicações práticas.

### 1.1 Objetivo geral

Aplicar técnicas de sensoriamento remoto e análises laboratoriais para aprimorar a caracterização mineralógica e química dos pegmatitos litiníferos.

### 1.2 Objetivos específicos

- Coletar amostras de dois pegmatitos litiníferos, incluindo rochas de contato, rochas alteradas e solo superficial sobreposto;
- Correlacionar a análise espectral de reflectância da região do espectro óptico (região do espectro eletromagnético de 400 a 2500 nm) dessas amostras;
- Identificar os padrões espectrais característicos dos minerais presentes nas amostras coletadas;
- Preparar lâminas petrográficas impregnadas com resina das mostras coletadas;
- Caracterizar detalhadamente a mineralogia das amostras coletadas;
- Realizar análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) para determinar a composição geoquímica das rochas e solos;
- Correlacionar as assinaturas espectrais com as características mineralógicas e químicas observadas;
- Aprimorar o uso do sensoriamento remoto na identificação e exploração de pegmatitos litiníferos.

### 1.3 Justificativa

O Brasil, com suas reservas significativas de pegmatitos litiníferos, possui grande potencial para se consolidar como um fornecedor estratégico no mercado global. Entretanto, o conhecimento detalhado desses depósitos ainda é limitado, especialmente no que se refere à aplicação do sensoriamento remoto para a identificação de alvos exploratórios. Assim, o presente trabalho busca preencher essas lacunas ao aplicar a espectroscopia de reflectância como uma ferramenta

alternativa na exploração de pegmatitos litiníferos, contribuindo para o desenvolvimento de metodologias mais sustentáveis na exploração mineral.

A escolha do tema é justificada pelo aumento da demanda mundial por minerais estratégicos, como o lítio, que desempenha um papel essencial nas tecnologias de armazenamento de energia e mobilidade elétrica.

#### 1.4 Estado-da-arte

A crescente demanda global por lítio torna fundamentais as estratégias de exploração para identificar a concentração e distribuição desse elemento em rochas crustais. Métodos geológicos, geofísicos, mineralógicos, geoquímicos, e de sensoriamento remoto, aliados à perfuração, são essenciais para descobrir novos depósitos. A prospecção de pegmatitos depende de afloramentos superficiais, com técnicas modernas como geofísica, geoquímica e sensoriamento remoto sendo amplamente adotadas (Cao *et al.*, 2022; Galliski *et al.*, 2022; Ding *et al.*, 2023a, b; He *et al.*, 2023).

Indicadores geoquímicos como razão potássio/rubídio (K/Rb) e elementos como Rb, Césio (Cs), e nióbio (Nb) são úteis para entender a evolução de pegmatitos (Garate-Olave *et al.*, 2018; Horstman, 1957). Métodos como amostras de sedimentos de corrente ajudam a localizar corpos mineralizados (van de Ven *et al.*, 2020).

##### 1.4.1 Levantamento Geológico

Os levantamentos geológicos desempenham um papel crucial na exploração de lítio. Oh *et al.* (2022) investigaram os fatores que controlam intrusões de pegmatitos portadores de lítio, como características de camadas, dobras locais e a relação entre pegmatitos e sistemas de fraturas, contribuindo para estratégias de exploração na área de Uljin, Coreia do Sul.

Galliski *et al.* (2022) apresentaram detalhes sobre localização, geologia, mineralogia e potencial de recursos de um corpo de minério de pegmatito da família lítio-césio-tântalo (LCT) na província Pampeana, Argentina. Alterações como montmorilonitização e cloritização foram destacadas como indicadores diretos para depósitos sedimentares de lítio. Singh (2022) analisou pegmatitos graníticos

indianos da família LCT, indicando minerais como cleavelandita, topázio, muscovita e outros como guias para exploração de lítio.

#### 1.4.2 Levantamentos Geofísicos

Os métodos geofísicos também têm avançado na identificação de depósitos de lítio, incluindo estudos de física de rochas, sensoriamento remoto, gravimetria, magnetometria e métodos geoeletricos. Apesar de desafios anteriores devido às semelhanças entre pegmatitos e granitos, avanços instrumentais têm ampliado seu uso. He *et al.* (2023) aplicaram o método magnetotelúrico de áudio frequência (AMT) para detecção de pegmatitos em Koktokay, China, identificando boas perspectivas de recursos raros.

Em regiões como Antofagasta, no Chile, métodos magnetotelúricos revelaram zonas horizontais altamente condutivas associadas à mineralização em salmouras. Na Índia, Srinivasarao *et al.* (2022) usaram anomalias gravitacionais para identificar pegmatitos portadores de lítio em Marlagalla, destacando amplitudes de 5 a 200  $\mu\text{Gal}$ .

#### 1.4.3 Levantamentos Geoquímicos

Estudos geoquímicos evoluíram significativamente, passando de análises laboratoriais convencionais, conforme mencionado por Balaram (2021) para o uso de instrumentos portáteis como espectrômetros de fluorescência de raios-X (XRF), tal qual usado neste estudo, e difração de raios-X (XRD), espectrômetros de plasma induzido por laser (LIBS) e Raman.

Esses dispositivos permitem a obtenção de dados analíticos em tempo real no campo, assegurados por protocolos de controle de qualidade (Balaram e Satyanarayanan, 2022).

Elementos indicadores e minerais guia para identificar depósitos de lítio são amplamente utilizados, com destaque para altas concentrações de Mg, Br e Rb em depósitos de salmouras (Mertineit e Schramm, 2019).

Na China, o programa de mapeamento geoquímico iniciado em 2008 identificou cerca de 16 anomalias geoquímicas significativas baseadas em análises de amostras de solo e sedimentos, selecionando oito áreas promissoras (Liu *et al.*, 2020).

Em Portugal, Fernandes *et al.* (2021) empregaram análises de sedimentos de corrente e elementos guia para mapear áreas-alvo na região de Douro, enquanto Dias *et al.* (2023) usaram ICP-MS e LIBS para estudos no campo aplito-pegmatítico de Barroso–Alvão.

Técnicas como a razão K/Rb têm se mostrado úteis para identificar litologias altamente fracionadas, potenciais alvos de exploração de lítio (Steiner, 2019; Balaram e Sawant, 2022). Estes avanços, aliados ao uso de elementos guia como boro (B), berílio (Be), céσιο (Cs) e elementos terras raras (ETR), bem como minerais como espodumênio, petalita e lepidolita, destacam a eficácia da abordagem geoquímica para localizar e avaliar depósitos de lítio em diferentes contextos geológicos.

Durante as etapas finais da evolução magmática, processos como separação de fluidos e fracionamento isotópico podem concentrar  ${}^6\text{Li}$  em pegmatitos ricos e  ${}^7\text{Li}$  em pegmatitos inférteis para lítio, como reportado por Zhang *et al.*, (2021) ao analisar isótopos de lítio, amostras de rocha inteira, e muscovitas.

Estudos no depósito de Jiajika identificaram múltiplas etapas de enriquecimento de lítio, envolvendo cristalização magmática, exsolução de fluidos e interação com estratos ricos em lítio.

#### 1.4.4 Sensoriamento remoto aplicado à prospecção de pegmatitos

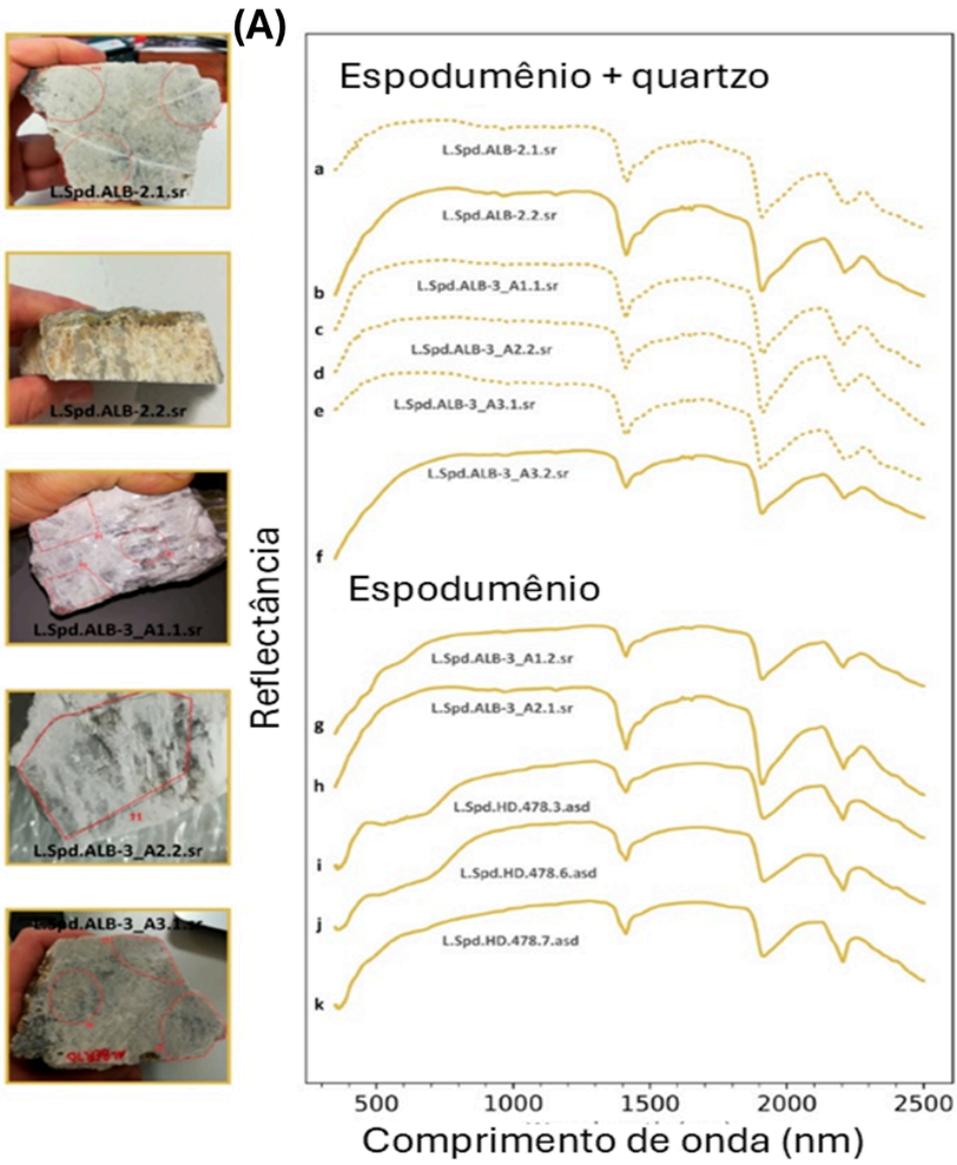
Avanços tecnológicos recentes no sensoriamento remoto e no processamento de dados e imagens tornaram essa abordagem poderosa para a exploração de minerais, como elementos de terras raras (ETR) e lítio (V. Balaram *et al.* 2014; Balaram, 2019; Fernandes *et al.*, 2019, 2020). Dados multiespectrais e hiperespectrais têm sido usados para identificar vários tipos de depósitos, incluindo depósitos de ETR (Balaram, 2022).

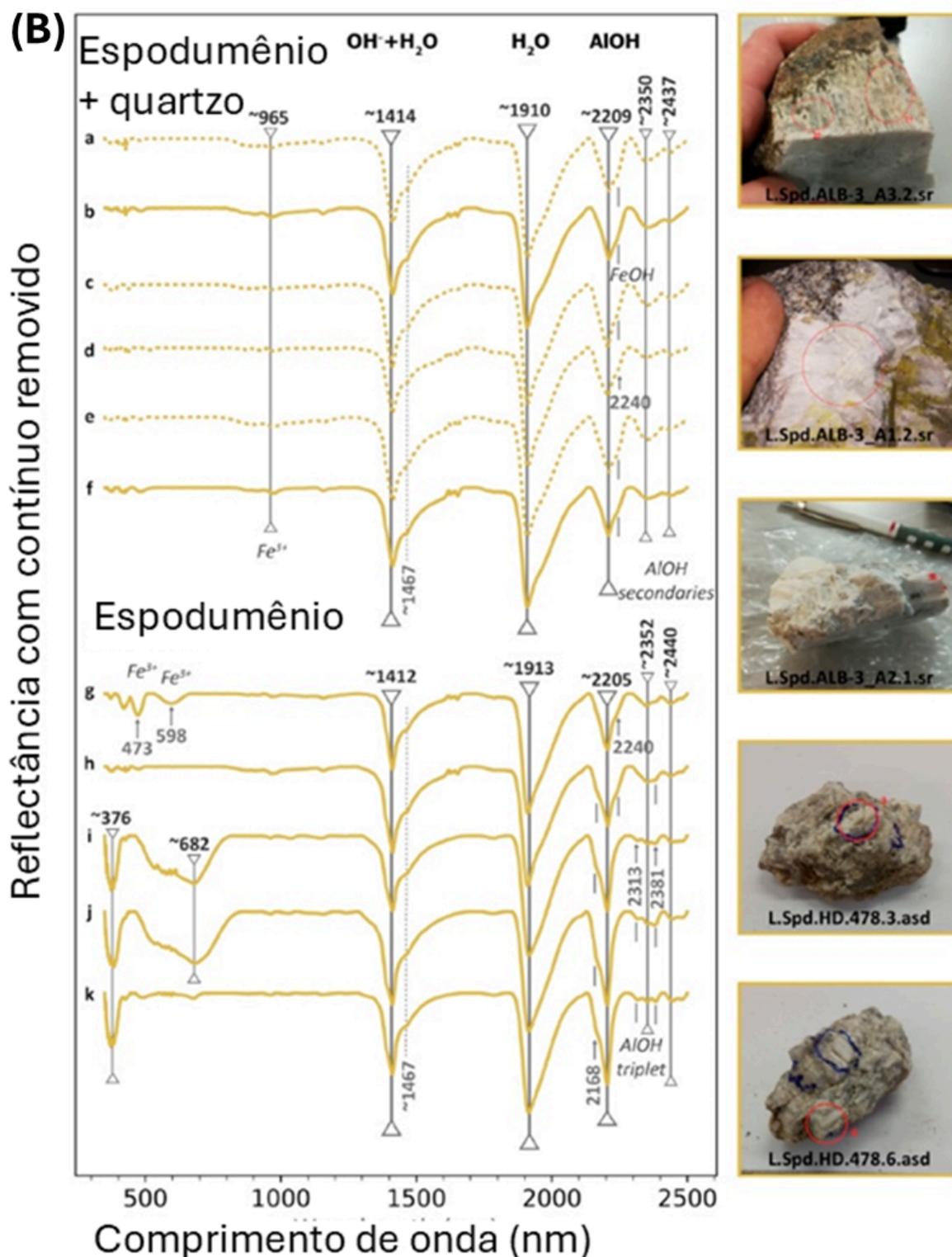
Esses estudos auxiliam na localização de áreas mineralizadas ao identificar zonas alteradas, como óxidos de ferro e argilas, ou na identificação direta de minerais portadores de lítio, como espodumênio, lepidolita, petalita e cookeita.

Imagens de satélite podem distinguir pegmatitos com lítio de outras litologias devido à diferença na magnitude de reflectância, profundidade de absorção e posição distinta da banda de Al-OH (Fernandes *et al.*, 2021). As principais

características de absorção para o espodumênio em pegmatitos estão em torno de 1412 nm, 1913 nm e 2205 nm, com absorções secundárias em 2352 nm e 2440 nm (Ding *et al.*, 2023a,b). Espectros característicos do espodumênio podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 - Assinatura espectral do espodumênio (piroxênio litinífero): curvas de reflectância (A) e contínuo removido curvas (B). As principais características de absorção são destacadas e são fornecidas amostras de fotografias. Curva pontilhada: amostras frescas; curvas completas: amostras com sinais visíveis de intemperismo.





Fonte: Modificado de (Cardoso-Fernandes et. al, 2021).

A exploração de lítio utilizando técnicas de sensoriamento remoto está em ascensão. Métodos de processamento de imagem, como mapeamento estrutural, litológico e de alteração, são usados para identificar áreas-alvo para exploração de

elementos específicos, e foram aplicados com sucesso na detecção de pegmatitos com lítio na região de Fregeneda (Salamanca, Espanha) e Almendra (Vila Nova de Foz Côa, Portugal).

Na China, técnicas de sensoriamento remoto, incluindo dados dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e ASTER, foram usadas para localizar diques de pegmatitos ricos em espodumênio na área de Dahongliutan (Gao *et al.*, 2020a,b,c).

Ding *et al.* (2023a,b) usaram dados de sensoriamento remoto hiperespectral para detectar depósitos ricos em lítio na área de Zhawulong, Sichuan Ocidental. Nessas áreas, grandes depósitos de pegmatito ricos em lítio foram descobertos com base nas características de absorção e reflectância espectral completa na faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas (VNIR-SWIR) (Chen *et al.*, 2023a,b).

Depósitos de lítio em salmouras, formados pela lixiviação de lítio de rochas-fonte em bacias hidrográficas, foram estudados por Rossi *et al.* (2022), que desenvolveram um fluxo de trabalho para modelar a formação desses depósitos na região dos Andes, usando sensoriamento remoto e modelagem de salmouras de lítio.

Imagens de satélite combinadas com dados geológicos e inteligência artificial ajudaram a identificar potenciais salares ricos em lítio na América do Sul, muitos deles enterrados sob sedimentos recentes e vulcânicos (Broadley *et al.*, 2023).

Dai *et al.* (2023a,b) usaram dados de sensoriamento remoto do Landsat e um algoritmo Light GBM de alta precisão para estudar o lago salino de Zabuye, localizado no Tibet, China, estimando volume de água, salinidade total e conteúdo total de lítio entre 2000 e 2017. O estudo mostrou que, com a exploração contínua, o conteúdo de lítio diminuiu ao longo do tempo, destacando a importância dessas técnicas para avaliação de recursos em salares.

Uma combinação de mapeamento geológico, métodos geoquímicos e sensoriamento remoto hiperespectral com melhor resolução espacial e espectral foi crucial na descoberta de ocorrências de lítio no tipo LCT (lítio, céσιο, tântalo) em enxames de diques pegmatíticos no noroeste da China, em um ambiente extensivo pós-colisional (Gao *et al.*, 2020a,b,c).

## 1.5 Metodologia

A metodologia adotada seguiu uma abordagem multidisciplinar, combinando a coleta de amostras em campo com análises laboratoriais. A etapa de campo consistiu da amostragem de dois pegmatitos litiníferos, rochas de contato, rochas alteradas e solos superficiais foram coletadas para posterior análise.

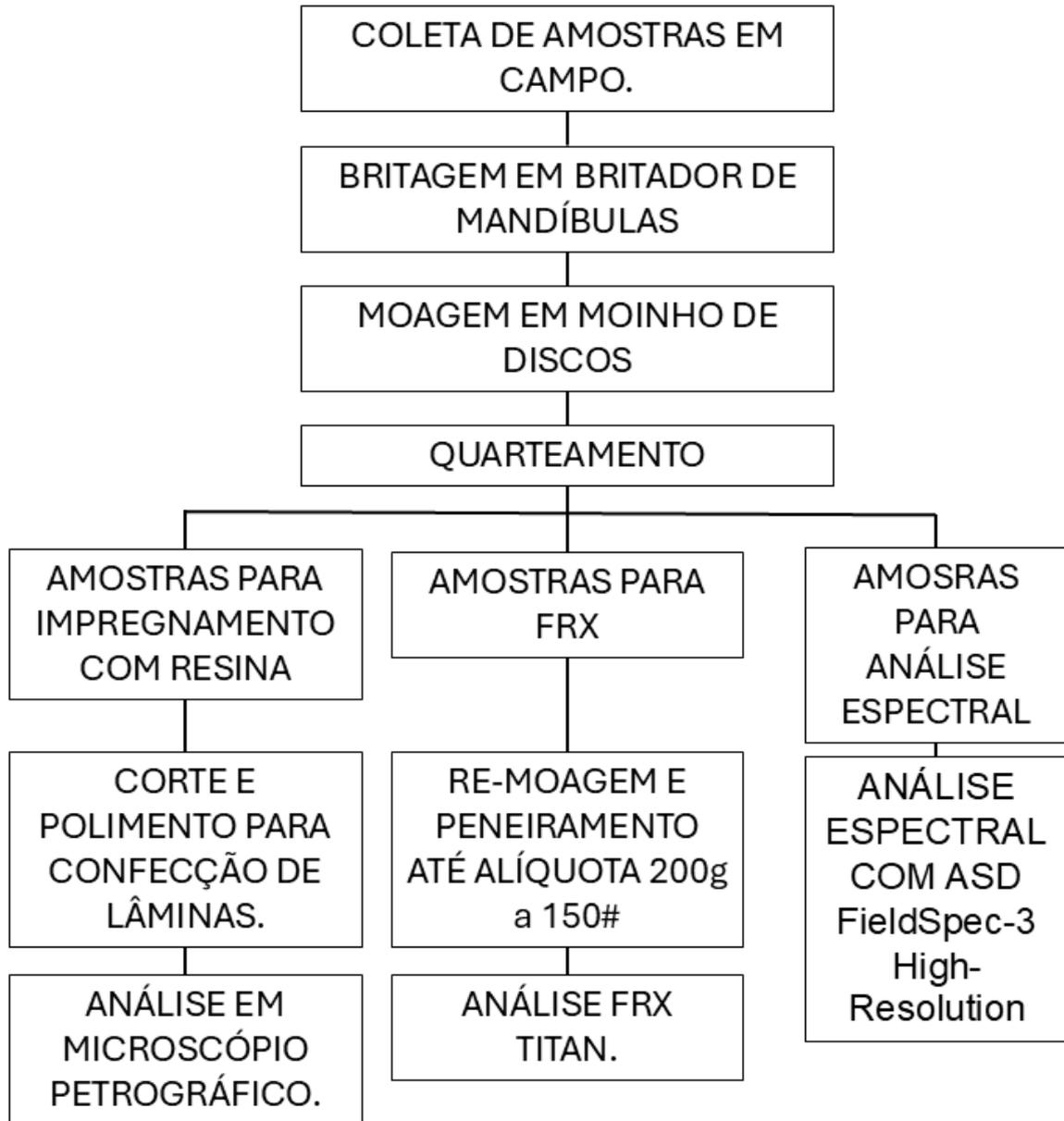
A etapa laboratorial iniciou-se submetendo as amostras coletadas em campo à espectroscopia de reflectância, com o intuito de identificar as assinaturas espectrais dos minerais presentes.

Lâminas petrográficas impregnadas com resina foram preparadas para a caracterização mineralógica detalhada, complementadas por análises químicas por fluorescência de raios X (FRX), visando a determinação da composição química das amostras.

Posteriormente, os resultados foram analisados para correlacionar as assinaturas espectrais com as características mineralógicas e geoquímicas, com o objetivo de identificar padrões que possam ser aplicados em futuros estudos de sensoriamento remoto voltados à exploração de pegmatitos litiníferos.

A etapa de preparação das amostras consistiu em britagem em britador de mandíbulas, moagem em moinho de discos de porcelana para evitar contaminação, e as alíquotas então quarteadas utilizando a metodologia de pilhas cônicas para retirada de cada parcela destinada a cada metodologia para análise. Parte das amostras quarteadas foram impregnadas com resinas e enviada a laboratório de laminação para preparação de lâminas petrográficas, outra parcela foi enviada ao laboratório de espectroscopia do serviço geológico para coleta dos espectros das amostras, e cerca de 200 gramas foi moída manualmente em almofariz de porcelana até a granulometria de 150# para análise em FRX. O fluxograma de preparação e análise das amostras pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autor.

## 1.6 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em cinco partes. A primeira parte apresenta a introdução, os objetivos, a justificativa, estado da arte e a delimitação do estudo. A segunda parte compreende a revisão bibliográfica, abordando a importância e emprego do lítio, além das técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância como ferramenta na prospecção.

Na terceira parte, é apresentado o estudo de caso, iniciando com uma breve apresentação da geologia dos pegmatitos litíferos, além de descritos os métodos e materiais utilizados, incluindo os procedimentos de coleta de amostras e as análises espectrais, petrográficas e químicas. A quarta parte discute os resultados obtidos, correlacionando os dados espectrais, mineralógicos e geoquímicos. Por fim, a quinta parte apresenta as considerações finais, destacando as contribuições do estudo e sugerindo direções para futuras pesquisas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prospecção de lítio envolve métodos diversos, desde levantamentos geológicos e geoquímicos até técnicas avançadas como sensoriamento remoto e análises geofísicas. Os depósitos de lítio em pegmatitos graníticos concentram minerais como espodumênio, petalita e lepidolita, associados a ambientes orogênicos e magmas graníticos altamente diferenciados.

Recentemente, o mercado de lítio experimentou flutuações devido à desaceleração da demanda global, mas projetos inovadores destacam o potencial de longo prazo com tecnologias sustentáveis. Além disso, a classificação de pegmatitos baseada em mineralogia e composição química identifica os pegmatitos ricos em espodumênio como os mais economicamente viáveis.

Além de técnicas tradicionais como levantamentos geológicos, métodos modernos como geofísica, geoquímica, mineralogia e sensoriamento remoto, juntamente com a perfuração, são essenciais para identificar novos depósitos de lítio. A integração dessas abordagens com observações em campo melhora o entendimento dos processos de mineralização.

Embora a descoberta de pegmatitos economicamente viáveis dependa principalmente de afloramentos superficiais, as técnicas mais recentes de geofísica, geoquímica e sensoriamento remoto têm sido cada vez mais utilizadas para a prospecção ( Galliski *et al.*, 2022; Ding *et al.*, 2023a, b; He *et al.*, 2023). As técnicas de sensoriamento remoto com análise espectral de imagens de satélite possibilitam identificar minerais indicativos e mapear grandes áreas com eficiência e custo reduzido complementando levantamentos de campo que utilizam elementos traço e minerais guia para localizar alvos promissores.

Instrumentos portáteis, como espectrômetros XRF, permitem análises em tempo real, enquanto métodos geofísicos, como gravimetria e magnetotelúrica, oferecem suporte adicional na detecção de pegmatitos. Esses avanços têm otimizado as campanhas exploratórias, tornando-as mais precisas e econômicas.

## 2.1 Aspectos geológicos dos depósitos de lítio em pegmatitos

O lítio está associado a muitos minerais em várias rochas ígneas, como granitos e pegmatitos, sendo o espodumênio e a petalita os minerais mais comuns. Mais de 124 espécies de minerais de lítio foram identificadas, principalmente em quatro ambientes geológicos: (i) pegmatitos graníticos do tipo lítio-césio-tântalo (LCT) e rochas metasomáticas associadas; (ii) pegmatitos altamente peralcalinos; (iii) rochas metasomáticas não diretamente associadas a pegmatitos; e (iv) depósitos de manganês. Embora o lítio seja encontrado em um grande número de minerais, ele é extraído apenas do espodumênio, lepidolita, ambligonita, petalita e eucryptita como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Alguns minerais de lítio importantes.

Mineral de Lítio	Fórmula química	Grupo Mineral	Concentração de Li (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Espodumênio	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Inossilicato	3.73	3.2
Lepidolita	K(Li,Al) <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> R b) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	Filossilicato	3.58	2.8
Hectorita	(Mg,Li) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (O H) <sub>2</sub>	Filossilicato	0.16 - 0.74	2.3
Jadeíta	LiNaBSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Nesossilicato	3.39	3.3
Petalita	LiAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	Tectossilicato	2.26	2.4
Ambligonita	Li(Na)AlPO <sub>4</sub> (F, OH)	Fosfato	4.69	3
Cookeíta	LiAl(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (O H) <sub>8</sub>	Filossilicato	1.34	2.6
Taeniolita	KLiMg <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> F <sub>2</sub>	Filossilicato	1.71	2.8
Litioporita	(Al,Li)Mn <sup>4+</sup> O <sub>2</sub> (O H)	Óxido	0.57	3.4
Eucryptita	LiAlSiO <sub>4</sub>	Feldspatóide	5.51	2.7
Zinnwaldita	K(LiFeAl)(Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>2</sub> (FOH) <sub>2</sub>	Grupo Mica	2.0 - 4.0 (Li <sub>2</sub> O)	2.9
Muscovita	[Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> ] <sub>2</sub> (KAl <sub>2</sub> ) K <sub>2</sub> O,Al <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Grupo Mica	0.23 (Li <sub>2</sub> O)	2.8

				16
Illita	$K_{0.7}Al_2(Si,Al)_4O_{10}$	Grupo Filosilicato	1.8	2.6
Montebrasita	$LiAl(PO_4)(OH)$	Fosfato	7.40 (Li <sub>2</sub> O)	3
Trifilita	$Li(Fe,Mn)PO_4$ 4	Fosfato	9.47 (Li <sub>2</sub> O)	3.5
Zabuyelite	$Li_2CO_3$	Grupo Carbonato	18.79	2.1

Fonte: modificado de V. Balaram *et al.*, 2024; Peiro *et al.*, 2013; Gourcerol *et al.*, 2019; Bowell *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2023).

O sistema atual de classificação de pegmatitos começa com a subdivisão das classes de pegmatitos (Ginsburg *et al.*, 1979). As classes de pegmatitos são diferenciadas com base no ambiente metamórfico das rochas hospedeiras (classe abissal), na mineralogia (classe muscovita), na composição elementar (classe de elementos raros) e na textura (classe miarolítica). A maioria das classes de pegmatitos traz uma conotação implícita de seu ambiente de colocação, mais ou menos equivalente à profundidade de formação.

No entanto, as pressões (profundidades) às quais os pegmatitos se cristalizam são mal definidas por características químicas ou texturais dos próprios pegmatitos. A maioria dos pegmatitos são corpos intrusivos, e, portanto, são posteriores às rochas hospedeiras adjacentes, dessa forma, a pressão e a temperatura em que os pegmatitos se cristalizam podem ter pouca ou nenhuma relação direta com as condições de formação e as associações minerais das rochas hospedeiras. Por essas razões, a aplicação das classes de pegmatitos é repleta de contradições e ambiguidades (Tkachev, 2011).

Cerný (1991) e Cerný e Ercit (2005) expandiram a classificação dos pegmatitos graníticos para incluir dez subclasses, das quais quatro são subdivididas em treze tipos, e dois desses tipos são ainda divididos em sete subtipos.

Todas essas categorias são baseadas nas assinaturas de elementos-traço dos pegmatitos, refletidas em sua mineralogia e química mineral. A Tabela 2 mostra a hierarquia da classificação, começando, assim como Cerný e Ercit (2005), com as classes de pegmatitos.

Os pegmatitos historicamente encontrados na área de estudo são LCT complexo e albita-espodumênio. Os complexos menos cobiçados por serem altamente zonados, apresentando espodumênio geralmente associado ao quartzo no núcleo do corpo, e tendo lítio cristalizando em outros minerais em zonas externas

ao núcleo, o que complica o processamento mineral (propriedades distintas de mineral de minério).

Os Albita espodumênio, popularmente chamados de SRP (spodumene rich pegmatites -pegmatitos ricos em espodumênio) são mais visados, apresentam-se como corpos fracamente zonados a não zonados, com mineralogia principal mais simples, composta por albita, feldspato potássico, quartzo e espodumênio, sendo o último principal mineral de minério ocorrendo em quase toda sua extensão, facilitando a exploração e processamento mineral. A classificação na íntegra dos pegmatitos pode ser vista na tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do pegmatito, modificado para mostrar a correlação entre classes e famílias de pegmatitos. NYF = nióbio-ítrio- família do flúor; LCT = lítio-césio-tântalo família; ETRP= elementos terras raras pesado; ETRL = elementos terra rara leves, ETR= elementos terras raras.

Classe	Subclasse	Tipo	Subtipo	Família
Abissal	ETRP			NYF
Muscovita				
Muscovita - elementos raros	ETRL			
	U			NYF
Elementos Raros	BBe			LCT
	ETR			NYF
	Li			LCT
	ETR	Alanita-mon azita Euxenita Gadolonita Berilo	Berilo-columbita Berilo-columbita-phos pato	NYF
		Complexo	Espodumênio Petalita Lepidolita Elbaíta Ambligonita	LCT
Miarolítica	ETR	Albita-espod umênio Albita Topázio-Beri lo		NYF

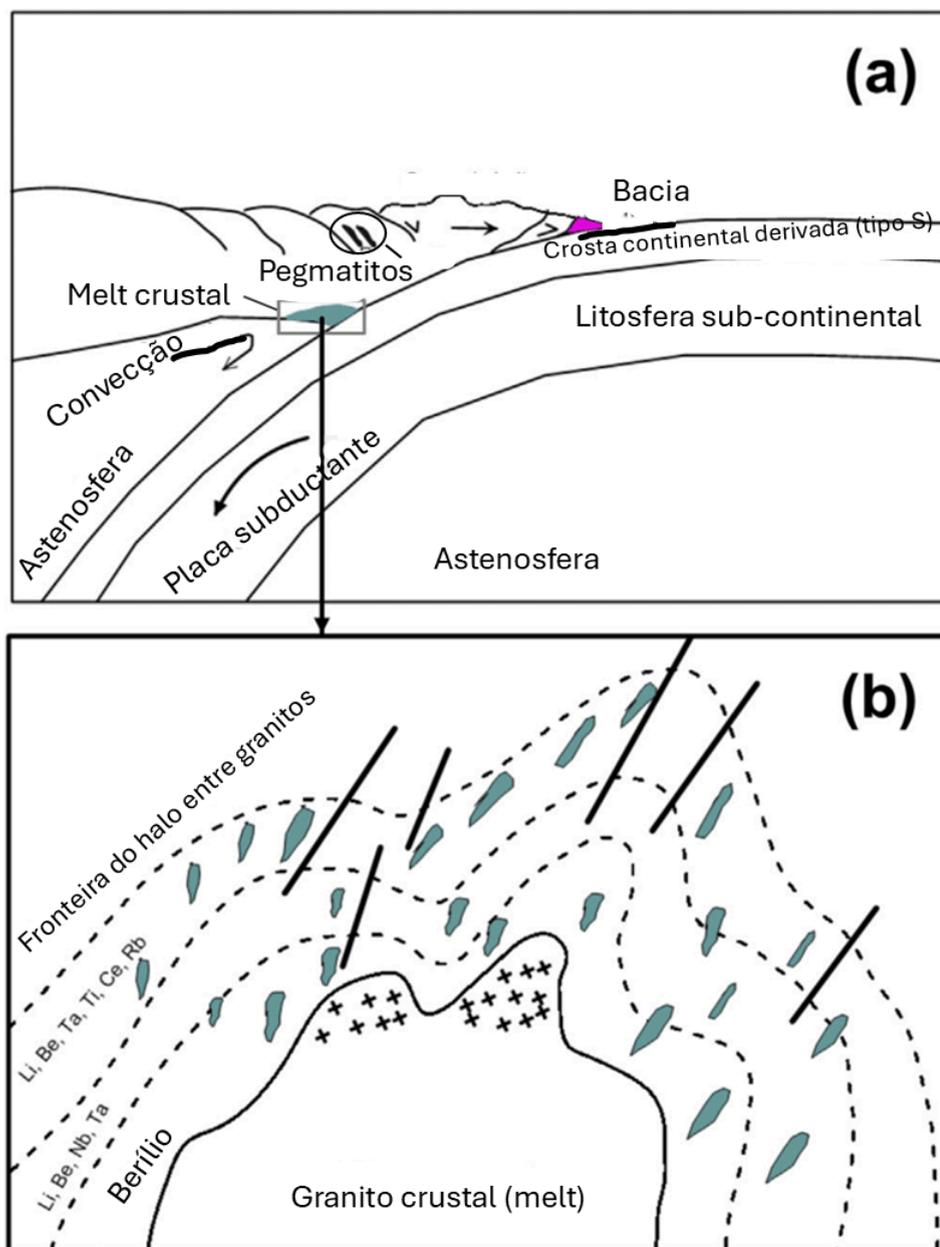
	Gadolinita-f	
	ergusonita	
Li	Berilo-topázi	
	o	
	Espodumêni	
	o	LCT
	Petalita	
	Lepidolita	

---

Fonte: Adaptado de (Cerný *et al.*, 2012).

O lítio tende a se acumular nos últimos diques diferenciados dos complexos graníticos, durante o estágio final de consolidação e, por isso, se concentra em quantidades significativas nos pegmatitos, conforme explicado no diagrama esquemático conforme visto na Figura 3.

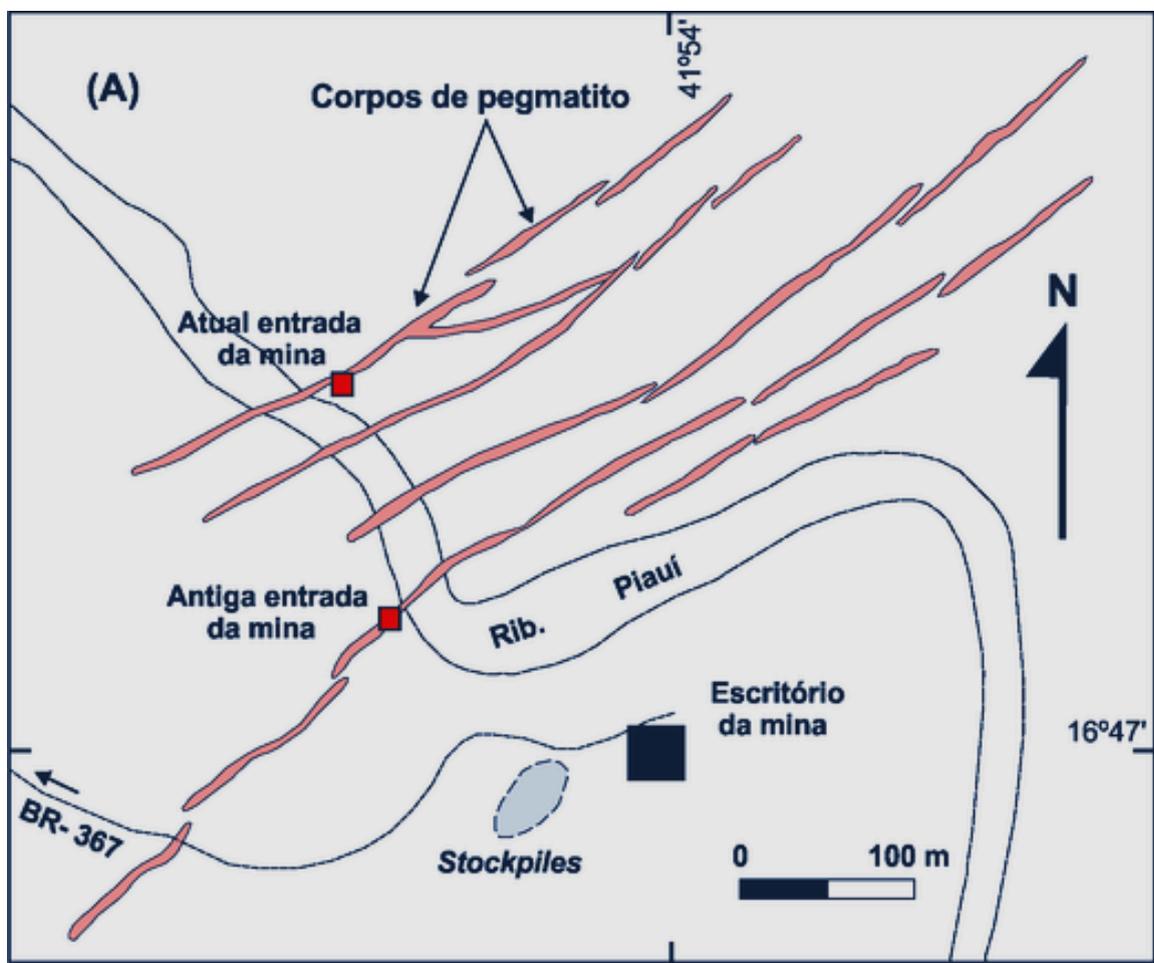
Figura 3 - (a) Exemplo de diagrama esquemático representando um mecanismo de impulso e extensão facilitando a formação de fusão granítica e intrusão de pegmatitos. (b) Representação de uma região concêntrica regional idealizada de configuração de zoneamento dentro de um pegmatito formado a partir de fusão. Os elementos raros distintivos são delineados das composições dos pegmatitos mais enriquecidos dentro de cada zona. Notavelmente, os pegmatitos mais enriquecidos exibem uma tendência a se manifestar distalmente posições relativas ao granito fonte.



Fonte: Modificado de (V. Balaram *et al.*, 2024; Serri *et al.*, 1993)

As reservas de lítio em Minas Gerais estão concentradas principalmente na região de Araçuaí/Itinga, próximo à área de estudo. O Campo Pegmatítico de Itinga é composto por pegmatitos graníticos simples e complexos, sendo que os pegmatitos complexos se destacam pela grande abundância de metais raros, incluindo lítio. A Companhia Brasileira de Lítio (CBL) lavra espodumênio na Mina da Cachoeira desde 1991, demonstrado no esquema da Figura 4.

Figura 4 - Mapa esquemático mostrando o alinhamento dos cinco principais corpos de pegmatito (“enxame de diques”) da Mina da Cachoeira (Araçuaí-Itinga).



Fonte: Adaptado de Romeiro (1998).

## 2.2 Panorama econômico

O preço do lítio sofreu uma queda significativa em 2023 e 2024 devido a uma combinação de fatores, incluindo o aumento da oferta global e a desaceleração da demanda por veículos elétricos, especialmente na China.

Esse cenário resultou em uma queda de mais de 80% no valor do lítio desde o pico registrado em 2022. Essa redução no preço tornou insustentáveis várias minas, principalmente aquelas com altos custos de produção, como algumas operações na China e Austrália, que agora operam com margens negativas, levando à interrupção de projetos ou ao adiamento de expansão (Carbon Credits, 2024; CRU Commodity Market, 2024).

Além disso, a desaceleração na adoção de veículos elétricos (EVs), impulsionada pela retirada de subsídios governamentais na China, contribuiu para a diminuição da demanda, embora a expectativa de crescimento a longo prazo para o mercado de lítio ainda seja positiva (MINING.COM, 2024).

Apesar do recente reajuste do preço do metal, há exemplos de projetos otimistas, um exemplo é o projeto da Sigma Lithium, que recebeu um financiamento de R\$ 486,7 milhões do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Esse investimento será utilizado para ampliar a produção de lítio em 250 mil toneladas por ano nas cidades de Araçuaí/Itinga, com destaque para o uso de energia limpa, reutilização de água e eliminação de barragens de rejeitos, características que reforçam a aposta em um futuro industrial verde.

A Sigma Lithium promete uma produção de lítio com as melhores práticas ambientais, sociais e produtivas, visando a descarbonização da economia e o fortalecimento da cadeia produtiva de baterias para veículos elétricos (BNDES, 2024).

No entanto, essa expansão do setor de lítio ocorre em um contexto global complexo, como destacado por Sun *et al.* (2022), onde a flutuação dos preços das matérias-primas, como lítio, cobalto e níquel, tem impacto direto sobre os custos das baterias.

Em 2021, o custo dos materiais representou 25% do preço dos pacotes de baterias de veículos elétricos, que estavam avaliados em cerca de \$118/kWh. A contínua redução dos custos tecnológicos pode tornar o preço das baterias ainda

mais sensível às oscilações de preços dos materiais, levando a um aumento dessa proporção nos próximos anos.

Com a expectativa de que a demanda por baterias continue a crescer exponencialmente, essas flutuações de preço poderiam afetar toda a cadeia de produção de veículos elétricos.

Para mitigar esses riscos, Sun *et al.* (2022) sugerem uma série de recomendações. Entre elas, a criação de uma plataforma global de comércio de lítio, semelhante à existente para cobalto e níquel na London Metal Exchange. Essa plataforma poderia proporcionar uma maior transparência e estabilidade nos preços, reduzindo a especulação excessiva e ajudando a equilibrar a oferta e demanda global.

Além disso, a diversificação das fontes de fornecimento é vista como uma medida essencial para mitigar os riscos associados à extrema concentração geográfica da produção de lítio.

Em 2020, os três maiores países produtores de lítio foram responsáveis por 90% da oferta global. Embora essa concentração deva cair para 70% até 2025, ainda é crucial aumentar a resiliência da cadeia de fornecimento.

Outro aspecto importante é o aprimoramento da capacidade de reciclagem. Atualmente, a reciclagem de baterias de íon-lítio (LIBs) está mais focada em cobalto e níquel, enquanto a recuperação de lítio enfrenta desafios tecnológicos e comerciais.

Com incentivos políticos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a reciclagem do lítio pode se tornar uma solução viável para suprir parte da demanda crescente e reduzir a pressão sobre as minas e os recursos naturais.

Paralelamente, a substituição de materiais em baterias e o gerenciamento da demanda por baterias, por meio de práticas como troca rápida de baterias e carregamento rápido, também são estratégias sugeridas para conter o aumento da demanda por lítio.

Essas medidas reforçam a importância de investimentos estratégicos como o realizado pelo BNDES no Brasil, que posiciona o país na vanguarda da produção de lítio com práticas socioambientais avançadas. Como destacam Sun *et al.* (2022), o preço do lítio pode ter grandes flutuações, mas a indústria de veículos elétricos tem recursos suficientes para lidar com essas variações e continuar a crescer.

O avanço de tecnologias de reciclagem e a diversificação das cadeias de fornecimento são essenciais para garantir a sustentabilidade desse crescimento.

### 2.2.1 Demanda por lítio

O preço do lítio experimentou mudanças dramáticas na última década. Entre 2010 e 2015, os preços permaneceram relativamente estáveis, refletindo uma demanda e oferta equilibradas. No entanto, a partir de 2015, a explosão do mercado de veículos elétricos (EVs) e a crescente demanda por soluções de armazenamento de energia renovável impulsionaram os preços para cima (Laude-Salcedo, 2024).

Em 2017, o preço do lítio já havia triplicado em comparação com 2015, impulsionado principalmente pela expansão rápida do mercado de EVs na China e o aumento dos investimentos em mineração e produção de lítio. Contudo, após um pico em 2018, o mercado enfrentou um excesso de oferta, levando a uma queda acentuada nos preços em 2019 (Laude-Salcedo, 2024).

De 2019 a 2021, os preços ficaram mais contidos, refletindo um período de correção do mercado. Em 2022, no entanto, houve uma alta histórica devido a um déficit significativo de oferta. Essa pressão nos preços foi exacerbada pelo modelo de fornecimento baseado em contratos a longo prazo, que limitou a oferta no curto prazo, fazendo os preços dispararem até cinco vezes o valor original.

O preço do carbonato de lítio atingiu o pico de 575.000 CNY (80.000 USD) por tonelada. No entanto, com o aumento da inflação e a produção de EVs superando a demanda, os preços despencaram novamente em 2023, estabilizando-se por volta de 100.000 CNY (14.000 USD) (Laude-Salcedo, 2024).

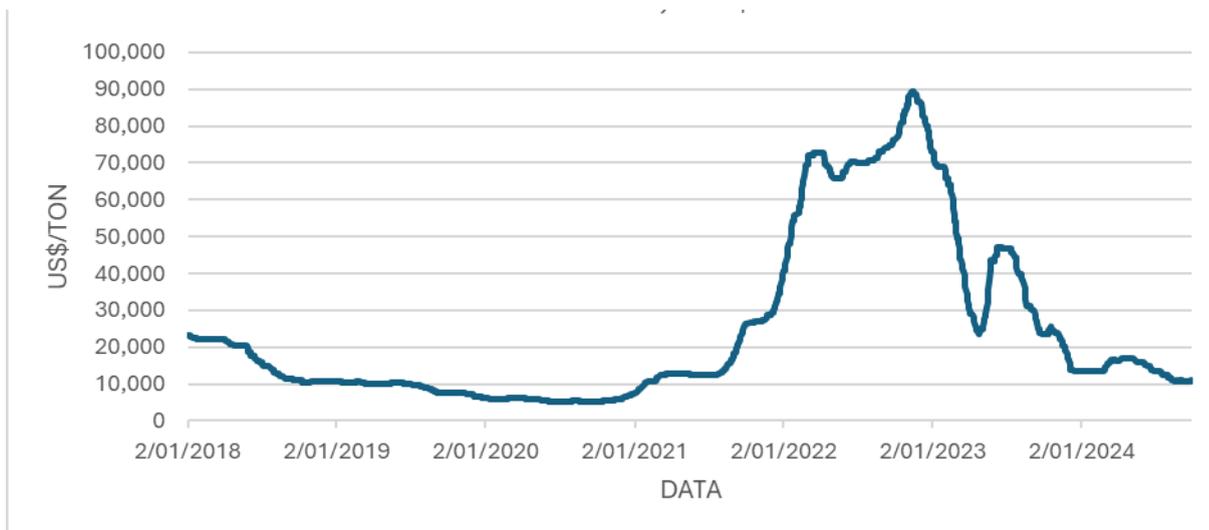
Nos últimos anos, o mercado de lítio passou por ajustes significativos. Os produtores aumentaram a oferta, antecipando uma demanda contínua alta, mas o mercado não cresceu tão rapidamente quanto o esperado. Isso levou a um excedente de lítio, derrubando os preços. Além disso, melhorias tecnológicas na mineração e processamento ajudaram a reduzir os custos de produção (Laude-Salcedo, 2024).

A volatilidade dos preços do lítio é, em grande parte, atribuída ao fato de o mercado ainda ser relativamente jovem e o mercado à vista (spot) pouco estabelecido. Atualmente, muitos consumidores preferem firmar contratos de fornecimento de longo prazo com mineradoras, garantindo um preço fixo.

No entanto, a tendência recente de leilões de lítio, como os realizados pela Albemarle em 2024, busca criar um modelo de preços mais dinâmico e refletivo da oferta e demanda atuais. Isso lembra a transição do mercado de minério de ferro no início dos anos 2000, quando a explosão da demanda da China levou a mudanças

no modelo de precificação. O Histórico 2018 – 2024 pode ser visto na Figura 5(Laude-Salcedo, 2024).

Figura 5 - Cotação histórica do carbonato de lítio.



Fonte: autor.

### 2.2.2 Eletrificação da economia

A eletrificação da economia tem se tornado um tema central no contexto global, especialmente à medida que o mundo avança para uma transição energética que visa substituir combustíveis fósseis por fontes renováveis.

Nesse cenário, as matérias-primas desempenham um papel crucial, não apenas na fabricação de tecnologias de energia renovável, como turbinas eólicas e painéis solares, mas também na mobilidade elétrica, defesa, aeroespacial e tecnologias digitais.

Certos materiais, classificados como matérias-primas críticas pela Comissão Europeia (2023), são essenciais para o desenvolvimento de setores estratégicos conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Setor da economia matérias primas críticas.

Setor da economia	Matérias primas críticas para União europeia (UE) (2023)
Minerais industriais e de construção	agregados, barita, bentonita, boratos, diatomito, feldspato, espatoflúor, gesso, argila caulínica, calcário, magnesita, grafite natural, perlita, rocha fosfática, fósforo, potássio, areia silicosa, enxofre, talco
Metais de ferro e ligas ferrosas	cromo, cobalto, manganês, molibdênio, níquel, nióbio, tântalo, titânio, ligas de titânio, tungstênio, vanádio
Metais preciosos	ouro, prata, e Metais do Grupo da Platina (irídio, paládio, platina, ródio, rutênio)
Terras raras pesadas	terras raras pesadas - ETRPE (disprósio, érbio, európio, gadolínio, hólmio, lutécio, térbio, túlio, itérbio, ítrio)
Terras raras	terras raras leves - ETRL (cério, lantânio, neodímio, praseodímio e samário); e escândio
Outros metais não ferrosos	alumínio/bauxita, antimônio, arsênio, berílio, bismuto, cádmio, cobre, gálio, germânio, ouro, háfnio, índio, chumbo, <b>lítio</b> , magnésio, rênio, selênio, silício metálico, prata, estrôncio, telúrio, estanho, zinco, zircônio
Bio materiais e outros	cortiça natural, borracha natural, madeira de teca natural, madeira de sapele, coque de carvão, hidrogênio, hélio, madeira redonda, néon, criptônio, xenônio

Fonte: Adaptado da comissão europeia (2023).

A dependência da indústria da em relação à importação desses materiais expõe a vulnerabilidades na cadeia de suprimentos, especialmente quando

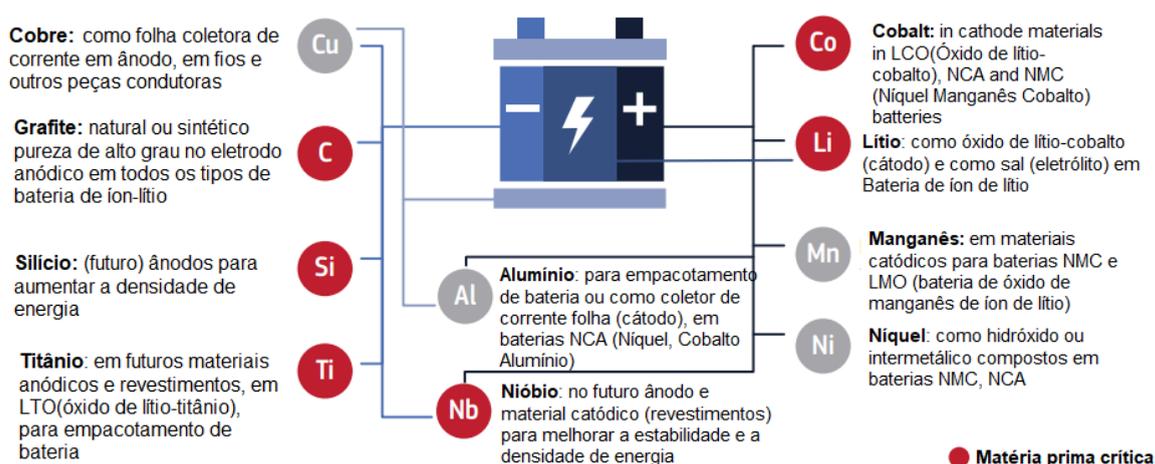
consideramos o aumento da demanda causado pela transição energética global. O aumento da demanda por metais necessários, principalmente para a produção de baterias de íon-lítio, células de combustível e motores elétricos leves para veículos elétricos (EVs), além de sistemas de armazenamento de hidrogênio, exigirá um grande volume de recursos.

Este crescimento não será restrito apenas a carros elétricos, mas também a bicicletas elétricas, scooters e transporte pesado. Além disso, os setores de defesa e aeroespacial, historicamente estratégicos, continuam na vanguarda das inovações tecnológicas, utilizando praticamente todas as tecnologias analisadas em estudos recentes.

A análise detalhada dessas cadeias de valor, considerando a dependência da oferta de materiais essenciais e suas vulnerabilidades, é crucial para garantir que a eletrificação da economia ocorra de forma sustentável e equilibrada (Comissão europeia, 2020).

Uma tecnologia essencial para a transição é a bateria, que encontra em sua composição uma série de matérias primas específicas e algumas raras, para as baterias atuais, e eventuais sofisticções em suas composições, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Matérias primas usadas na bateria.

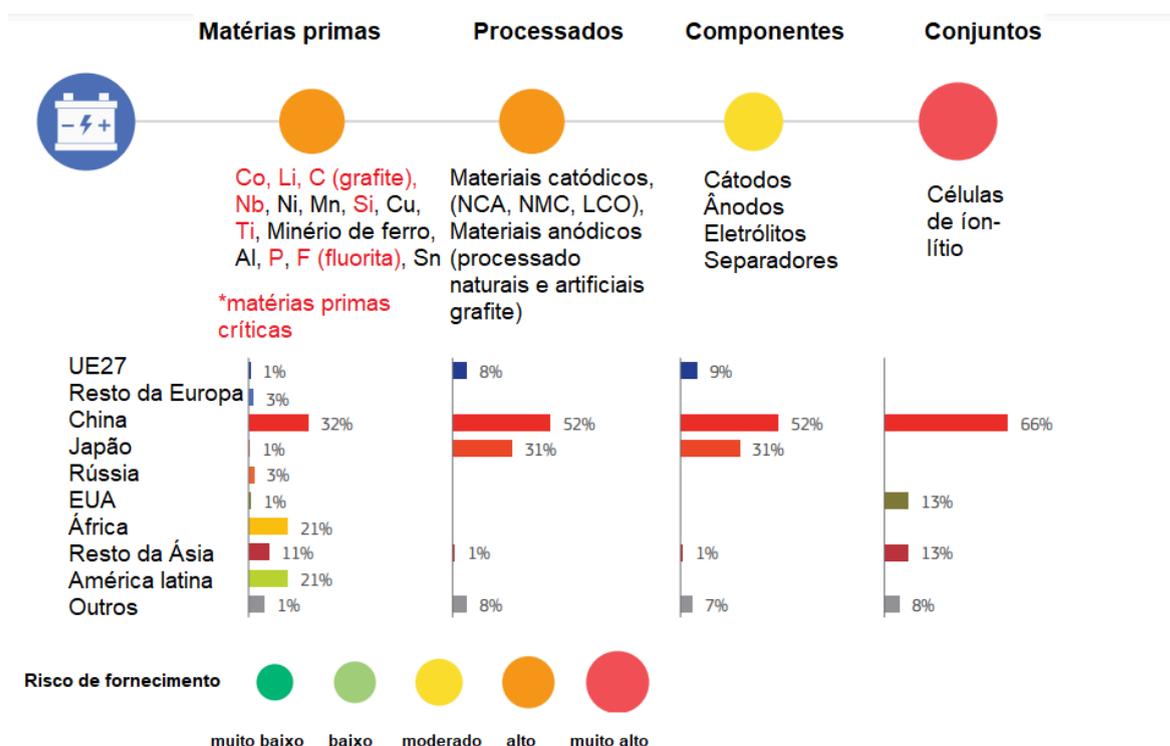


Fonte: Adaptado de Comissão europeia (2020).

A cadeia de fornecimento desta tecnologia crucial é vasta, pois além de matéria prima, são necessários variados componentes, de vários locais do mundo, botando em xeque o fornecimento destes materiais estritamente necessários para

confeção da bateria. A cadeia de fornecimento analisada do ponto de vista da UE pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Baterias de íon-lítio: uma visão geral dos riscos de fornecimento, gargalos e principais atores ao longo da cadeia de fornecimento.



Fonte: Adaptado da comissão europeia (2020).

Portanto, a relevância do tema e urgência é uma questão geopolítica mais do que tudo, ainda mais quando se caminha para bens mais sofisticados, onde há uma relevante concentração de fornecimento chinês, levando a uma dependência econômica concentrada e conseqüentemente frágil do ponto de vista geopolítico.

### 2.3 Sensoriamento remoto aplicado à prospecção mineral

O uso de dados de satélite abrange diversas aplicações. Por exemplo, Pantoja *et al.* (2023) avaliaram a aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de cobertura do solo, enquanto Fontgalland *et al.* (2023) analisaram a cobertura vegetal utilizando índices como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), com dados do sensor Operational Land Imager (OLI) do satélite Landsat 8.

Em particular, para a discriminação litológica e mapeamento mineral, os dados adquiridos pelos sensores Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+), OLI e Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) são amplamente utilizados para esses fins (Tangestani & Shayeganpour, 2020). Um uso bem conhecido do Thematic Mapper (TM) é a determinação de minerais que contêm  $\text{Fe}^{3+}$  (Crosta & Moore, 1989) e para minerais relacionados à alteração hidrotermal (Loughlin, 1991).

A Análise de Componentes Principais (ACP) ou Principal Component Analysis (PCA). é uma técnica estatística multivariada utilizada no sensoriamento remoto, que seleciona combinações lineares não correlacionadas (cargas dos autovetores) de variáveis, de modo que cada combinação linear sucessiva, ou componente principal (PC), apresenta uma variância menor (Loughlin, 1991). A metodologia denominada Seleção de Componentes Principais Orientada a Características (FPCS) baseia-se no exame das cargas dos autovetores da análise de componentes principais (PCA) para decidir quais imagens de componentes principais concentraram informações diretamente relacionadas às assinaturas espectrais teóricas de alvos específicos (Crosta & McMoore, 1989).

Um conceito importante utilizado por esses autores foi a análise do último componente principal gerado pela PCA, que explica a menor variação na cena, geralmente associada ao espectro mineral. Outro ponto relevante foi a previsão de como o espectro do alvo se manifesta no componente principal, considerando o sinal e a carga do coeficiente linear; caso o espectro do alvo tenda a ser escuro (resultado negativo da regressão), o histograma seria invertido multiplicando-o por -1.

A abordagem de sensoriamento remoto baseada em dados dos satélites ASTER, Landsat e Sentinel 2 tem desempenhado um papel fundamental na investigação para mapear litologias mal expostas e zonas de alteração mineral em áreas remotas de ambientes antárticos (Pour *et al.*, 2019).

Gabr *et al.* (2015) concluíram que a técnica de razão de bandas e a técnica de Crosta utilizando as bandas VNIR e SWIR do ASTER validaram a ocorrência de zonas mineralizadas ao longo de falhas e zonas de falha na área de Gabal El-Hoteib.

Liu *et al.* (2017) demonstraram as vantagens de combinar dados do Landsat com a técnica de Crosta e dados de sensoriamento remoto Hyperion na detecção de

zonas de alteração hidrotermal e até mesmo minerais de alteração associados à mineralização de Au e Cu na área de Wushitala.

Kumar *et al.* (2015) ilustraram a eficácia da análise de componentes independentes em comparação à análise de componentes principais e à transformação de fração mínima de ruído em dados SWIR do ASTER para discriminar unidades litológicas no terreno hostil da área de Udaipur. Novaes *et al.* (2024) aplicaram o conceito das componentes principais para mapeamento de zonas de alteração hidrotermal na mina Uruguai, localizada em Caçapava do Sul-RS.

O uso das técnicas de razão de bandas e da técnica de Crosta também mostrou ser eficiente na delimitação de zonas de minerais de alteração hidrotermal associadas à mineralização de ouro no distrito de Pala, região de Mayo Kebbi, no sudoeste do Chade (Osinowo *et al.*, 2021).

A determinação de zonas de alteração argílica, fílica e propilítica também se mostrou possível com dados do ASTER e análises de PCA e razão de bandas (Pazand & Pazand, 2022).

Além disso, o uso dos sensores ASTER e Sentinel 2 MSI foi bem-sucedido no mapeamento litológico usando PCA e razão de bandas em Suriyan, sudoeste do Irã, na identificação de basaltos, xistos verdes, xistos micáceos e xistos, rochas que apresentaram características de absorção devido à presença de Al-OH, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> e Mg-OH, correspondendo à resolução espectral dessas bandas dos sensores (Tangestani & Shayeganpour, 2020).

Uma técnica também utilizada para destacar espectros de rochas alteradas hidrotermalmente é a entropia de Shannon. O conceito foi comprovado ao analisar espectros de rochas não alteradas e alteradas hidrotermalmente e, como esperado, as rochas alteradas manifestaram características de absorção mais profundas na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Ao calcular a entropia de Shannon da característica de absorção, foi observado que as rochas alteradas hidrotermalmente, por apresentarem maior probabilidade de absorção, mostraram valores de entropia mais baixos quando comparadas às rochas não alteradas (Van Ruitenbeek *et al.*, 2020).

### 2.3.1 ASTER

ASTER é um dos cinco instrumentos de imageamento a bordo do satélite Terra e captura informações da superfície da Terra através de 14 bandas espectrais distintas, distribuídas em três subsistemas: o radiômetro visível e infravermelho próximo (VNIR), o infravermelho de onda curta (SWIR) e o infravermelho termal (TIR) (Abrams *et al.*, 2002).

Após o lançamento do satélite Terra, foi observado no subsistema SWIR um vazamento de radiação dos detectores da banda 4 para os detectores das bandas vizinhas 5 e 9. O vazamento de radiação foi atribuído à banda 4, que pode estar relacionado às características desta banda, que possui maior amplitude e maior poder de refletividade, com um registro de radiação cerca de quatro a cinco vezes mais intenso que as outras bandas.

Esse efeito de vazamento foi chamado de "crosstalk". Com o objetivo de tentar minimizar o vazamento de sinal, os dados L1T são fornecidos com dados de radiância corrigidos.

O ASTER produz três tipos de dados de nível 1: L1A, L1B e L1T. Os produtos L1A são compostos de dados (DN), reconstruídos a partir dos três subsistemas, ou seja, são os dados originais da radiância capturada pelos subsistemas, sem nenhum tipo de calibração dos coeficientes, seja radiométrica, geométrica ou erro de paralaxe, bem como qualquer tipo de correção para os efeitos de fenômenos naturais ou correções do próprio subsistema (Baptista *et al.*, 2016). Os dados L1B são dados de radiância do sensor que passaram por calibração radiométrica (precisão nas medições de energia) e co-registro geométrico (alinhamento espacial das bandas espectrais), contudo possuem o efeito crosstalk não corrigido.

Os produtos L1T, utilizados neste trabalho, registram radiância no topo da atmosfera (TOA), os coeficientes de terreno, geométricos, calibração radiométrica com base nos bancos de dados radiométricos mais recentes disponíveis, paralaxe e correção para efeito crosstalk já são aplicados (Meyer *et al.*, 2005).

## 2.4 Classificação não supervisionada K-means

O algoritmo k-means é um método de agrupamento amplamente empregado e estudado, cujo objetivo é organizar os dados em clusters, minimizando a variância dentro de cada grupo (Tzortzis e Likas, 2014). O método segue quatro etapas principais: (1) inicialização, onde o número de clusters (K) é definido e os centros

iniciais são selecionados aleatoriamente; (2) divisão, que atribui cada ponto ao cluster mais próximo, com base na distância euclidiana (ED) entre os pixels e os centros; (3) atualização, que recalcula os centros dos clusters usando a média dos valores de reflectância dos pixels; e (4) iteração, repetindo as etapas anteriores até que os centros se estabilizem ou o número máximo de iterações seja alcançado.

Embora seja rápido e simples, o k-means tradicional apresenta algumas limitações. A dependência da distância euclidiana (ED) para medir similaridade torna o método sensível a dimensões, limitando sua aplicação a casos com métricas uniformes. Em imagens de sensoriamento remoto, a presença de pixels mistos, com variações nos valores de reflectância para um mesmo tipo mineral, pode comprometer os resultados do agrupamento (Ren *et al.*, 2020).

Além disso, a escolha do número de clusters (K) e a dependência dos resultados em relação aos centros iniciais são desafios significativos, já que diferentes pontos de partida podem gerar resultados distintos (Peña *et al.*, 1999; Likas *et al.*, 2003).

### 3. ESTUDO DE CASO

O presente trabalho visa caracterizar os pegmatitos litiníferos do orógeno Araçuaí, com ênfase na Província Pegmatítica Oriental do Brasil. Para tanto, foram realizadas diversas etapas, incluindo coleta de amostras em campo, preparação das amostras em laboratório, análise petrográfica, geoquímica por fluorescência de raios X e análise espectral. As amostras foram coletadas em duas áreas com histórico de prospecção de lítio, e os dados obtidos permitirão uma melhor compreensão da mineralogia, geoquímica e geocronologia dos pegmatitos, contribuindo para a avaliação da técnica nas prospecção mineral.

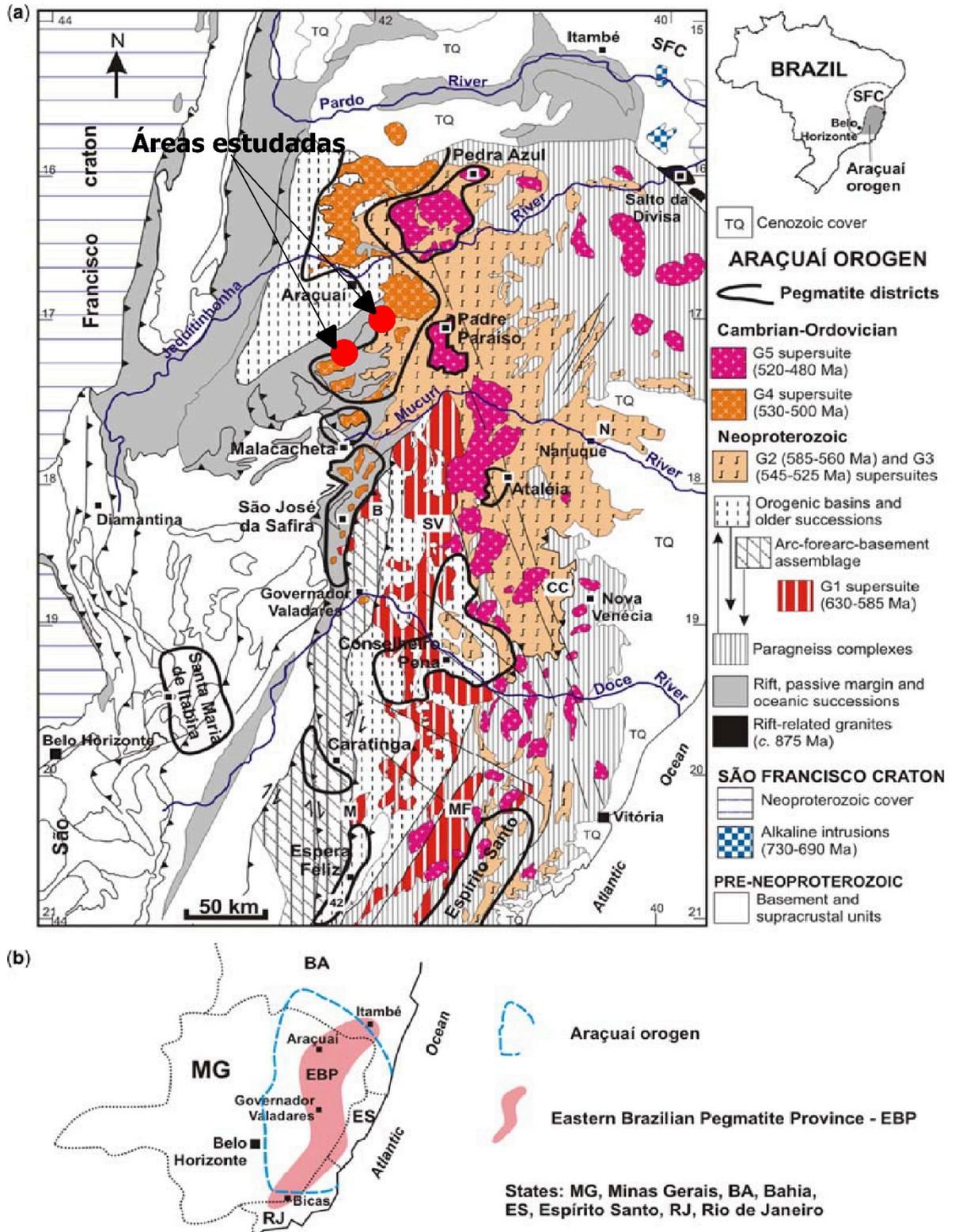
#### 3.1 Geologia Regional

O Orógeno Araçuaí, formado no Neoproterozóico Tardio e Cambriano, estende-se entre o cráton do São Francisco e a margem continental atlântica, ao norte da latitude 21°S, no leste do Brasil (Figura 8a) (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011). Estudos sobre a definição, estratigrafia, magmatismo, tectônica e evolução deste orógeno foram realizados por Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000), Pedrosa-Soares *et al.* (2001a,b,c, 2007, 2008), De Campos *et al.* (2004), Silva *et al.* (2005) e Alkmim *et al.* (2006).

Uma característica marcante desta região é a presença de um grande volume de rochas ígneas plutônicas que datam do Neoproterozóico Tardio ao Cambriano-Ordoviciano, representando uma sequência prolongada (aproximadamente 630–480 Ma) de eventos de produção de granitos. As rochas graníticas, segundo Pedrosa-Soares *et al.* (2011), ocupam cerca de um terço da área do orógeno, constituindo a proeminente Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Figura 8b), além de formar a principal província produtora de rochas ornamentais do país.

Essa ampla exposição de níveis crustais, desde áreas superficiais até zonas profundas, cobre uma área superior a 350.000 km<sup>2</sup>. Assim, os granitos registrados representam a história evolutiva completa do orógeno Araçuaí, desde a fase pré-colisional, controlada por subducção, até o colapso gravitacional pós-colisional. A localização das áreas estudadas pode ser vista na Figura 8a.

Figura 8 - Identificação da área de estudo mapa geológico simplificado do orógeno Araçuaí e região cratônica adjacente, destacando as super suítes graníticas Neoproterozóicas e Cambrianas (a) e localização da EBPP em escala menor (b).



Fonte: modificado de Pedrosa Soares *et al.* 2011, de Pedrosa-Soares *et al.* 2008; distritos pegmatíticos modificados de Netto *et al.* 2001.

O conhecimento sobre os eventos de gênese dos granitos do orógeno Araçuaí e seus depósitos minerais associados, com foco na Província Pegmatítica Oriental do Brasil (EBPP), foi complementado com novos dados geoquímicos, geotermobarométricos e geocronológicos (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011).

Com base em observações de campo, características estruturais, geoquímicas e geocronológicas, os granitos do orógeno Araçuaí foram inicialmente classificados em seis suítes (G1, G2, G3S, G3I, G4 e G5), conforme proposto por Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000), Pedrosa-Soares *et al.* (2001a) e Silva *et al.* (2005). Posteriormente, novos dados permitiram o reagrupamento dessas suítes em cinco supersuítes (G1 a G5), conforme sugerido por De Campos *et al.* (2004) e Pedrosa-Soares *et al.* (2008).

O evento orogênico Brasileiro no Orógeno Araçuaí é subdividido em quatro estágios geotectônicos distintos (Pedrosa-Soares *et al.*, 2008): pré-colisional (c. 630–585 Ma), sin-colisional (c. 585–560 Ma), tardi-colisional (c. 560–530 Ma) e pós-colisional (c. 530–480 Ma). Devido à complexidade do magmatismo, foram consideradas transições prolongadas entre esses estágios, uma vez que variações nos processos tectônicos e na cronologia influenciam diretamente a geração do magma. A supersuíte G1 é considerada pré-colisional, associada à formação de um arco magmático cálcio-alcálico, resultado da subducção da litosfera oceânica, ocorrendo entre c. 630 e c. 585 Ma. A supersuíte G2, classificada como sin-colisional, foi gerada predominantemente por fusão parcial de pilhas metassedimentares, em resposta ao espessamento crustal provocado por empurrões e dobramentos, datando de c. 585 a c. 560 Ma.

A supersuíte G3, de caráter tardi-colisional a pós-colisional (c. 545–525 Ma), marca a transição entre o enfraquecimento das forças convergentes e o relaxamento extensional do orógeno, geralmente acompanhado por delaminação e remoção convectiva do manto litosférico. As supersuítes G4 (c. 530–500 Ma) e G5 (c. 520–480 Ma) são pós-colisionais, caracterizadas por plutons que atravessam e modificam as estruturas tectônicas regionais, além de corpos concordantes intrudidos ao longo de estruturas de diferentes idades (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000; De Campos *et al.*, 2004; Pedrosa-Soares *et al.*, 2001a, 2008).

A área de estudo está situada em zonas de transição de unidades, conforme indicam as cartas geológicas locais, mas as características observadas em campo sugerem que a região pertence aos corpos ígneos Mangabeiras e Teixeira. Esses corpos fazem parte da supersuíte G4, localizada no setor centro-norte do Orógeno Araçuaí, onde afloram níveis crustais intermediários a rasos, com fácies metamórficas que variam de anfíbolito a xisto verde.

A supersuíte G4 é composta por plútons zonados, com núcleos de granitos biotíticos e leucogranitos nas bordas, e seu mecanismo de colocação gerou estruturas curvilíneas, visíveis em imagens de sensoriamento remoto.

Além disso, essa supersuíte inclui pegmatitos, cujas assembleias minerais formadas por metamorfismo de contato e a presença de petalita, em vez de espodumênio, em alguns pegmatitos, indicam profundidades de colocação entre 5 e 15 km. (Pedrosa 1997a, b; Pedrosa & Oliveira 1997; Basílio *et al.* 2000; Pinto *et al.* 2001; Heineck *et al.* 2008; Paes *et al.* 2008).

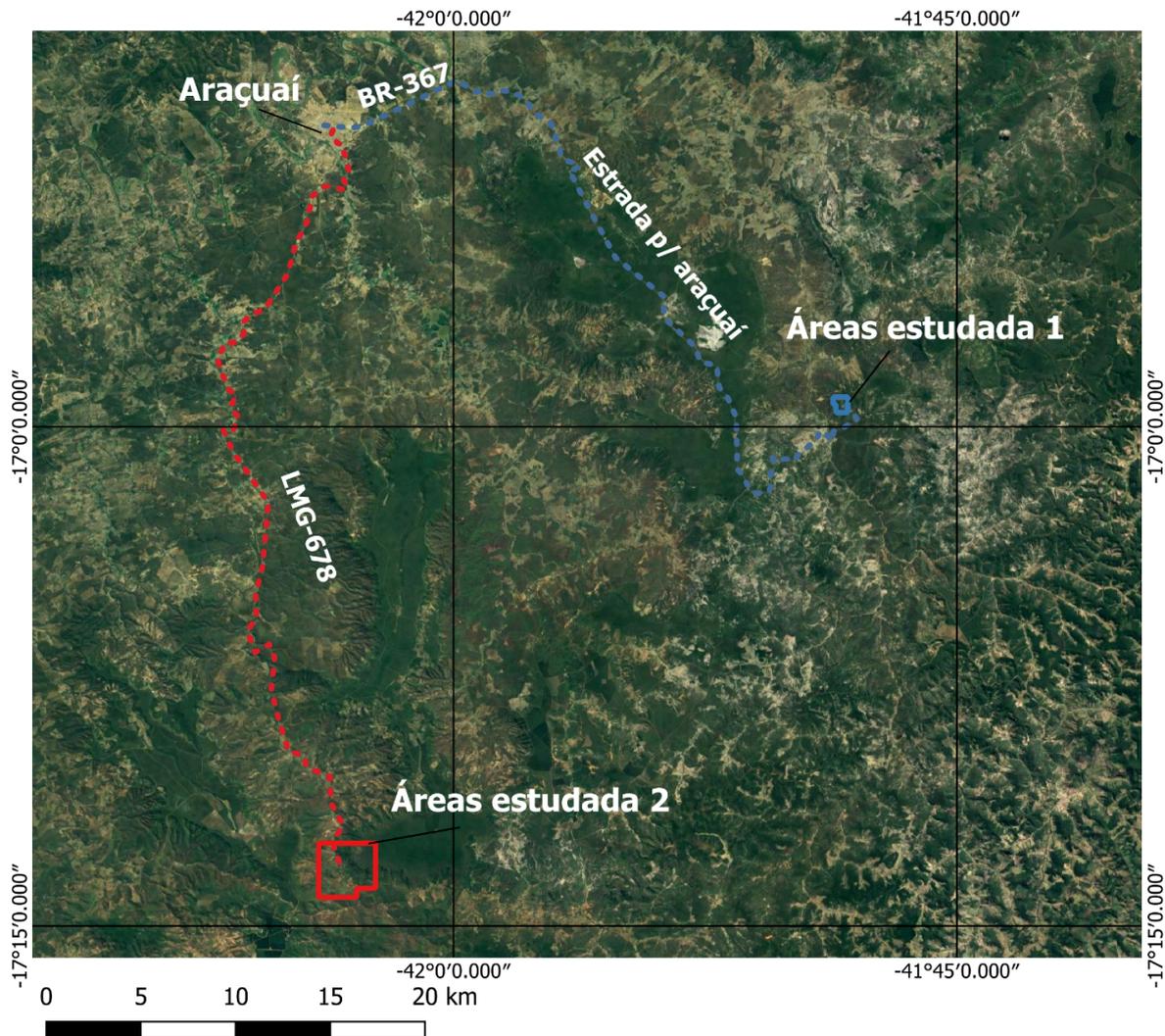
Em termos gerais, a área de estudo é caracterizada pela presença de rochas pegmatíticas ligadas ao granitos da supersuíte G4, que possuem granulometria grosseira. O principal mineral de interesse é o espodumênio, que ocorre em cristais de hábito prismático e, em alguns casos, atinge grandes dimensões. A coloração desse mineral é bastante variada, podendo apresentar tons de cinza, branco, incolor, amarelo, verde (conhecido como Hiddenita), rosa a lilás e roxo (denominado Kunzita).

Em rochas com elevado grau de alteração, é possível observar minerais argilizados que ainda preservam o formato dos grandes cristais do pegmatito original. Esses minerais apresentam coloração branca a amarela, típica dos argilominerais resultantes do processo de intemperismo. É comum que essas rochas estejam encaixadas em xistos, os quais representam o potencial encaixante desses corpos pegmatíticos.

### 3.2 Área de estudo

As áreas de estudo 1 e 2 pertencem ao município de Araçuaí -MG. A área 1 está na localidade de Quati e a área 2 na localidade de Capão, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Áreas estudadas demonstradas por pontos, e polígonos minerários associados (EPSG: 4326).

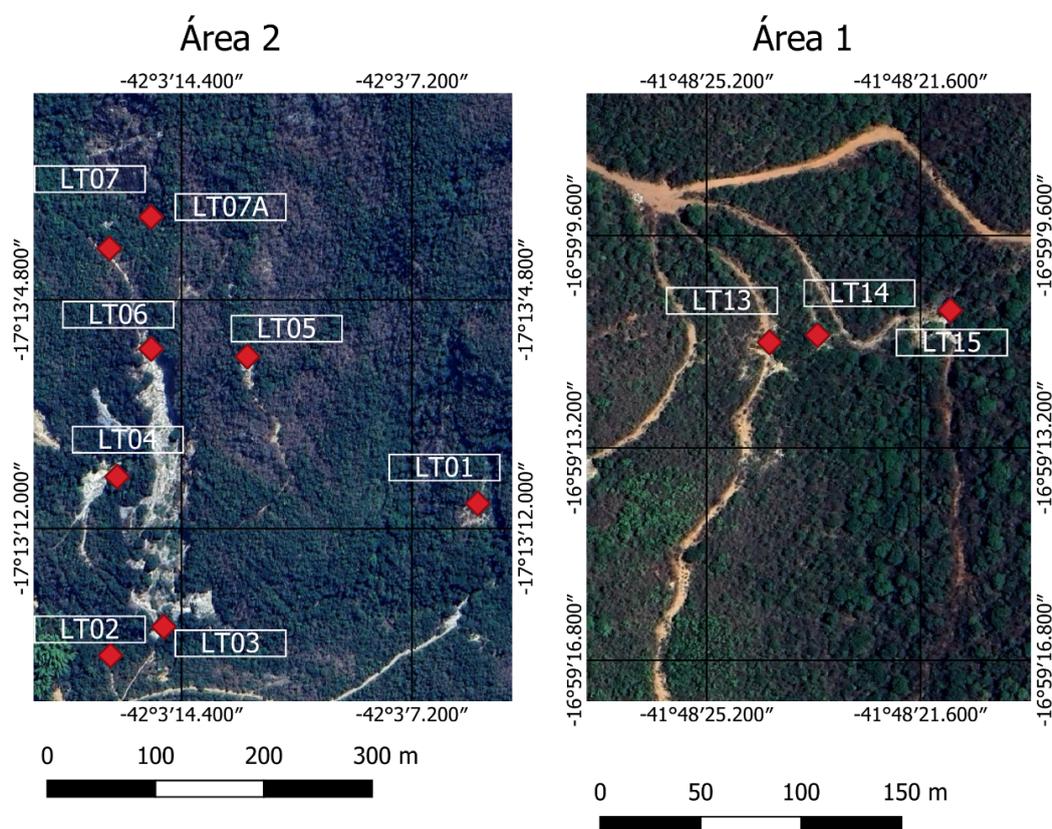


Fonte: Autor.

### 3.3 Coleta de amostras no campo

Foram visitados duas áreas de projetos greenfield negociados como prospectos de pegmatitos litiníferos, as amostras coletadas e enviadas para análise laboratorial são demonstradas na Figura 10, os valores de teor de lítio dos pontos de coleta para o prospecto estão apresentados na Tabela 4, destacando os locais de coleta das amostras estudadas neste trabalho.

Figura 10 - Áreas amostradas para teores do prospecto disponibilizado pelo proprietário do projeto (EPSG: 4326).



Fonte: Autor.

Tabela 4 - Dados de teores disponibilizados pelo proprietário dos projetos[sic].\* - Amostras 1, 2, 3, 4 e 5 coletadas para este trabalho. \*\* - Amostra 6 coletada para este trabalho.

Local	Amostra	Pureza química LiO2 (%)	SGS Li (ppm)	SGS LiO2 (% - calculado)
Área 2	LT-01	0.77	4042	0.87
	LT-04A	0.92	6004	1.29
	LT-04B	0.05	577	0.12
	LT-05A	0.08	226	0.05
	LT-05B	0.35	1833	0.39
	LT-06 (A1-A5)*	1.16	9392	2.02
	LT-07	0.06	266	0.06
Área 1	LT-13(A6)**	0.44	3015.00	0.65
	LT-14	0.01	54.00	0.01
	LT-15A	0.08	192.00	0.04
	LT-15B	0.48	3844.00	0.83

Fonte: Autor, modificado de Tabela original.

A diferença de teores de amostras do mesmo local pode ser explicada pela seleção de amostras diferentes pelos envolvidos, não caracterizando duplicatas retiradas de quarteamento. Contudo, as amostras colhidas para este trabalho, relacionadas às anomalias de lítio foram retiradas do túnel garimpeiro, da área 1, e de garimpo a céu aberto na área 2, as identificações das amostras são demonstradas na Tabela 5.

Tabela 5 - identificação das amostras coletadas.

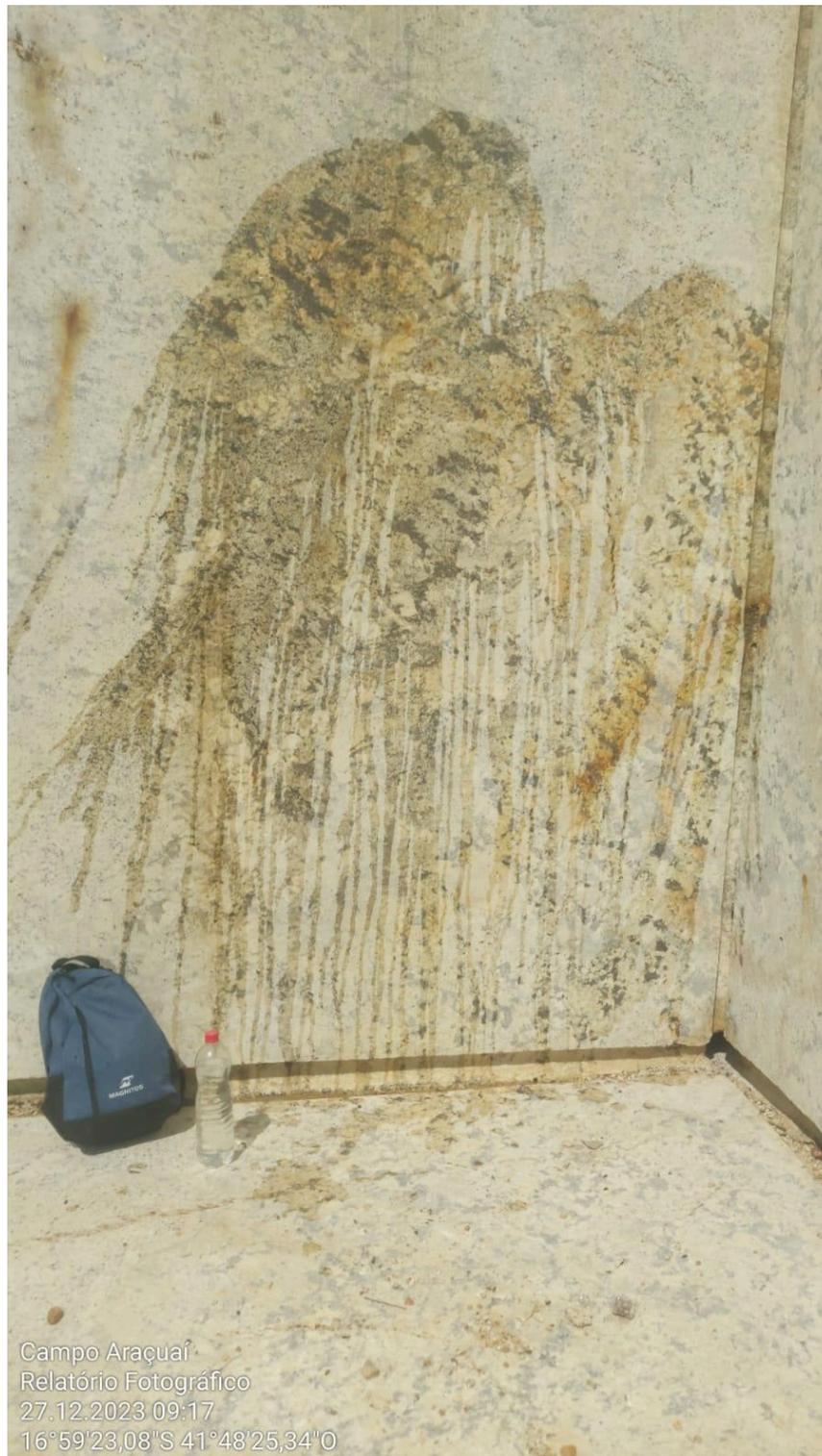
Área	Amostra	Descrição
1	A1	“Zona 1” do pegmatito da área 1 (túnel), amostra de mineral, de coloração preta oxidado/alterado
	A2	“Zona 2” do pegmatito da área 1 (túnel) em amostra de minerais prismáticos alterados, lembrando espodumênio.
	A3	Solo cobertura do túnel da área 1- Horizonte B
	A4	Solo saprolítico entre horizonte B e túnel.
	A5	Xisto(túnel) contato abrupto com pegmatito da área 1
2	A6B	Pegmatito da área 2, garimpo em maciço aflorante.

Fonte: Autor.

### 3.3.1 Reconhecimento da área

Na área 1, havia uma pedreira de rocha ornamental abandonada, de material pegmatítico, de superfície amarelada provavelmente por conta do intemperismo acelerado devido à face exposta, conforme demonstrado na Figura 11.

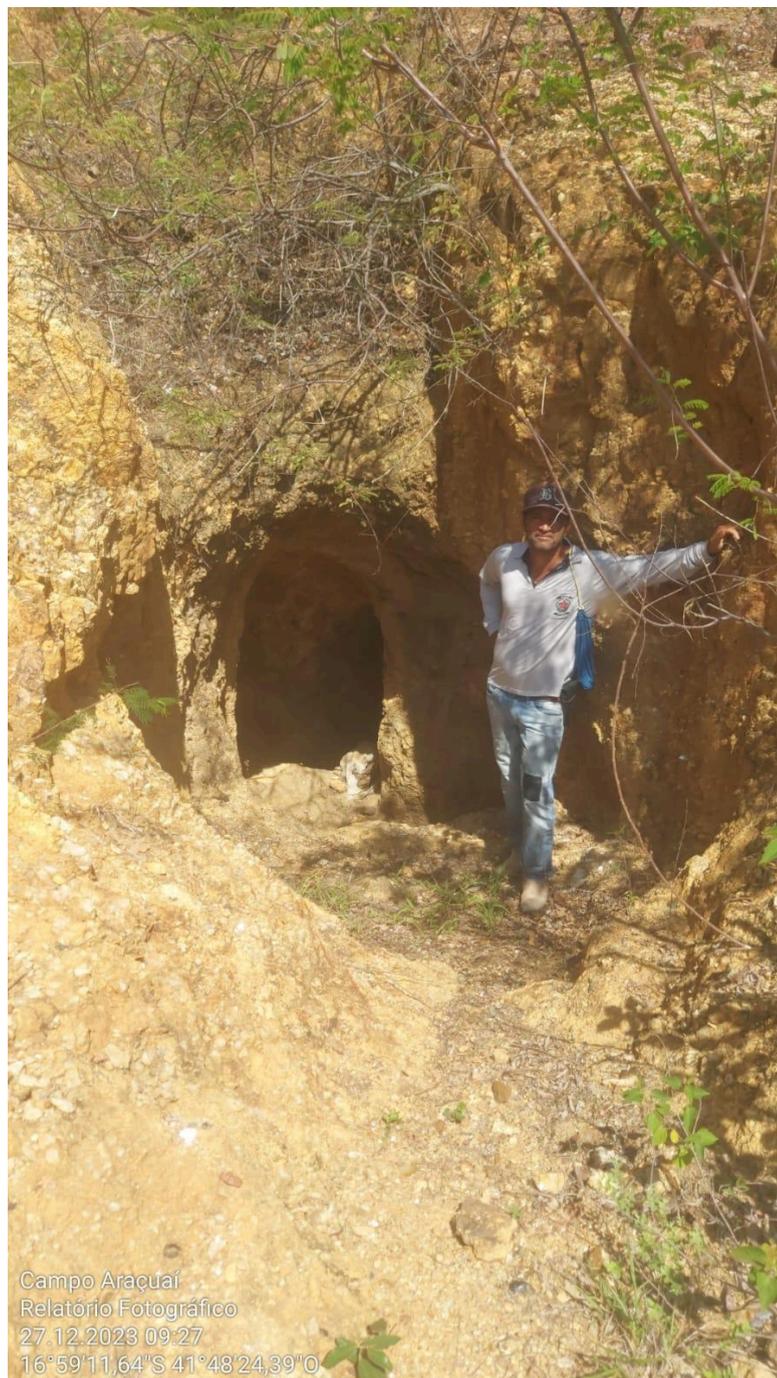
Figura 11 - Corte ortogonal de pedreira de pegmatito abandonada.



Fonte: Autor.

O túnel garimpeiro de onde as amostras da área 1 foram coletadas, era um antigo garimpo de turmalinas, e pode ter sua entrada visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Embocamento de túnel garimpeiro.

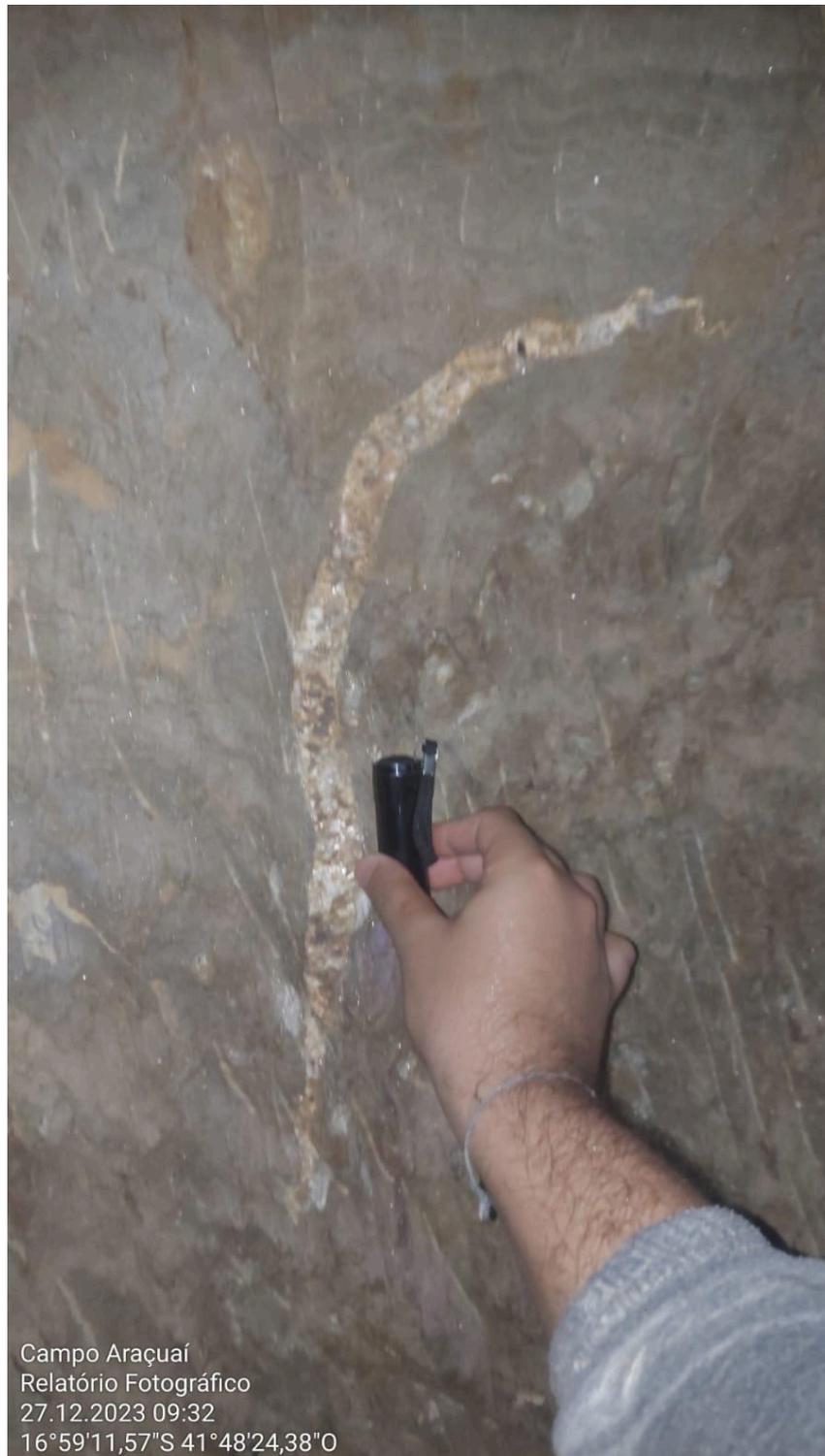


Fonte: Autor.

No túnel, foram encontrados um xisto em contato de capa do pegmatito (amostra 5), uma zona intermediária com ocorrência de mineral aparentemente ferruginoso altamente oxidado (amostra 1), uma zona de minerais muito oxidados mas de formato prismático, onde se infere ser espodumênio (amostra 3), e solo

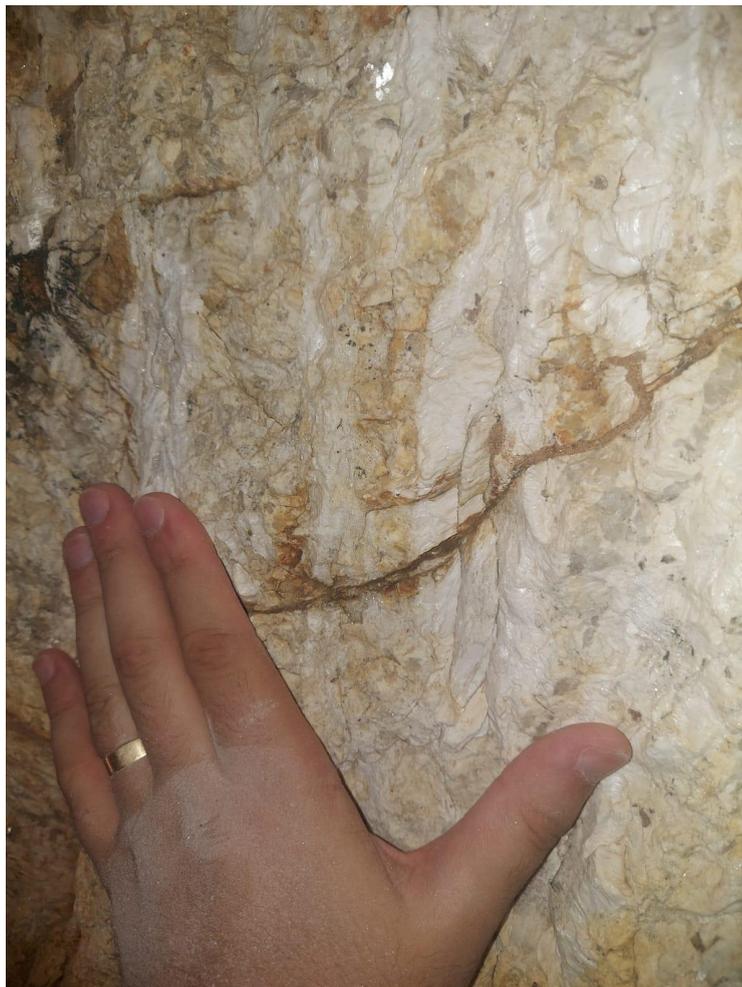
saprolítico em contato com túnel (amostra 4) e horizonte B acima do pegmatito (amostra 3). Os locais de coleta podem ser vistos nas Figuras de 13 à 17.

Figura 13 - Zona do xisto (capa – amostra 5) com intrusão pegmatítica.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Zona de minerais prismáticos intemperizados (amostra 2).



Fonte: Autor.

Figura 15 - Mineral de coloração preta com sinais de alteração (amostra 1).



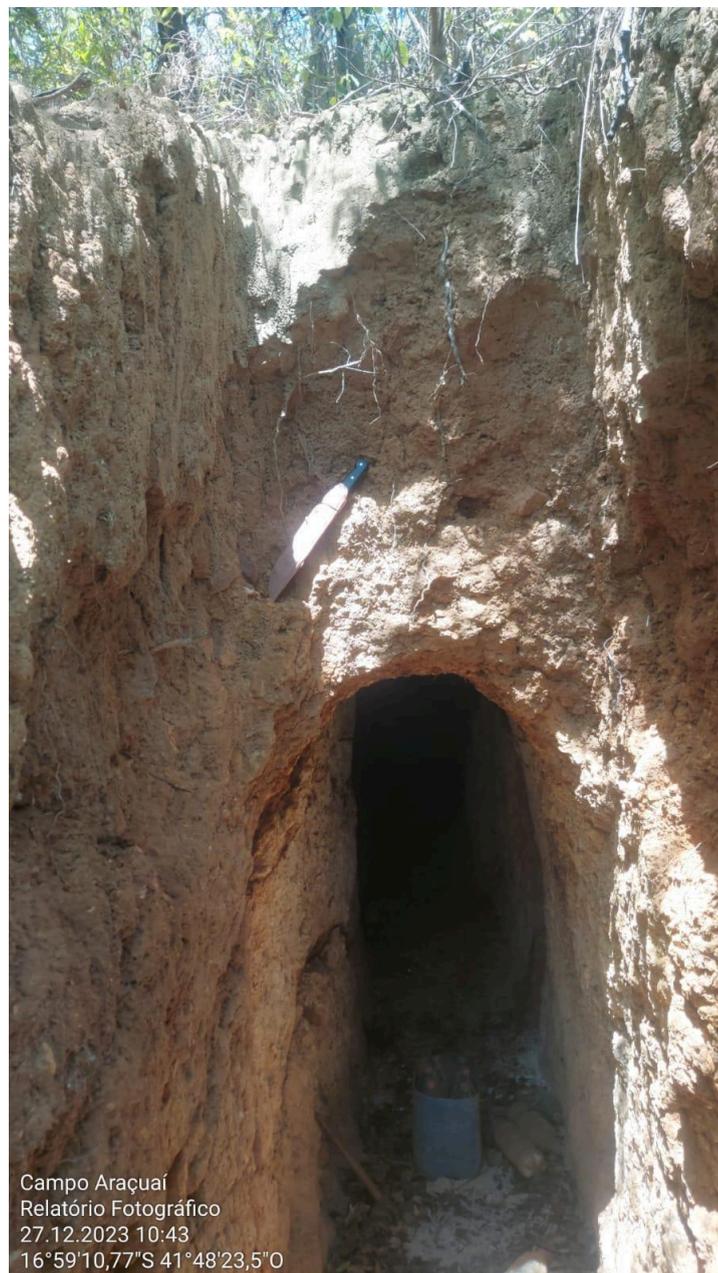
Fonte: Autor.

Figura 16 - Horizonte B amostrado, acima do saprolito (amostra 3).



Fonte: Autor.

Figura 17 - Amostragem de saprolito em quase contato total com a saída do túnel (amostra 4).



Fonte: Autor.

Na área 2, o pegmatito encontrava-se semi aflorante, haviam locais com túneis e locais como uma massa intemperizada aflorante de onde a amostra 6 foi coletada. Apresentava-se sempre em contato com quartzito fortemente intemperizado, nas Figuras 18 a 20 é possível verificar as ocorrências.

Figura 18 - Encontrado próximo ao local de coleta da amostra, provável lepidolita (mica rosa à direita) e albita (coloração branca, em cristais tabulares se cruzando à esquerda).



Fonte: Autor.

Figura 19 - Aspecto do local semi-aflorante de coleta de amostra, mineral verde exposto em massa pegmatítica intemperizada.



Fonte: Autor.

Figura 20 - Local de coleta da amostra, acima do local escavado, rocha foliada representando o quartzito micáceo.



Fonte: Autor.

### 3.4 Preparação das amostras.

As amostras totais eram de solo e de rochas altamente intemperizadas, com alguns poucos grandes cristais dentro as amostras, e, portanto, para obter-se massa homogênea representativa, todas amostras foram moídas no moinho de discos cerâmicos, e quarteadas, conforme imagens a seguir, para retirada de alíquotas para os ensaios propostos, conforme pode ser visto nas Figura 21 e 22.

Figura 21 - Moinho de discos utilizado.



Fonte: Autor.

Figura 22 - Quarteamento em pilha cônica para retirada das alíquotas.



Fonte: Autor.

### 3.5 Análise petrográfica.

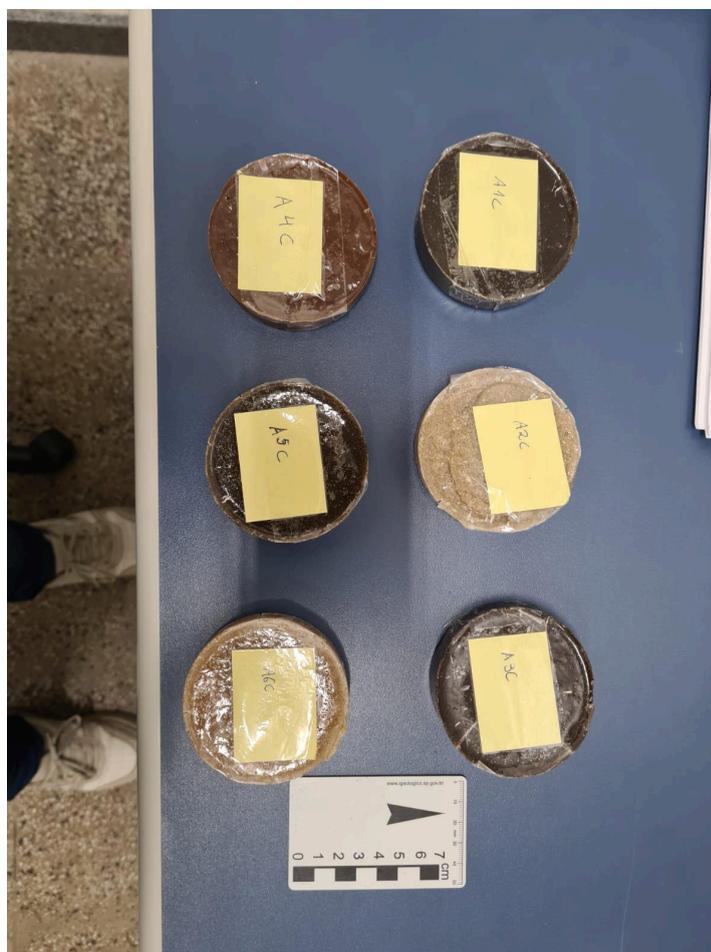
Parte das amostras foram quarteadas, impregnadas com resina epóxi para confecção de lâminas petrográficas. As amostras foram impregnadas, cortadas, coladas em vidro e lixadas até a espessura de 30 microns para análise em microscópio petrográfico de luz transmitida. A metodologia utilizada pode ser visualizada nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Alíquotas a serem impregnadas.



Fonte: Autor.

Figura 24 - Amostras após cura da resina, prestes a serem enviadas ao laboratório de laminação.



Fonte: Autor.

### 3.6 Análise química.

Parte das amostras, cerca de 200 gramas, foram quarteadas do montante, cominuídas totalmente em almofariz, e peneiradas a 150# para preparação para análise de fluorescência de raios x (FRX). As amostras foram analisadas no laboratório da UNIPAMPA, utilizando a pistola S1TITAN em bancada. A TITAN, da marca Bruker, vem com biblioteca pré programada generalista para minerais denominada “GeoChem General”, e faz uma análise aproximada dos teores contidos na alíquota. Foram feitas 5 análises por amostra, e para dados médios foi calculado o desvio padrão por amostras, valores fora do limite de tolerância de um desvio padrão foram desconsiderados para o cálculo de valores médios. A cominuição foi feita através da re-moagem em almofariz como pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Almofariz utilizado para moagem manual até 150#.



Fonte: Autor.

Foram realizadas 5 análises de cada amostra obtida, para realização da média representativa, foram retiradas amostras com valores de um desvio padrão para mais ou para menos, como forma de manter a acurácia do ensaio. As amostras foram preparadas em copo e filme específicos para análise de FRX como pode ser visto na Figura 26 e a utilização do equipamento pode ser visto na Figura 27.

Figura 26 - Amostras preparadas para análise por FRX.



Fonte: Autor.

Figura 27 -S1 TITAN FRX.

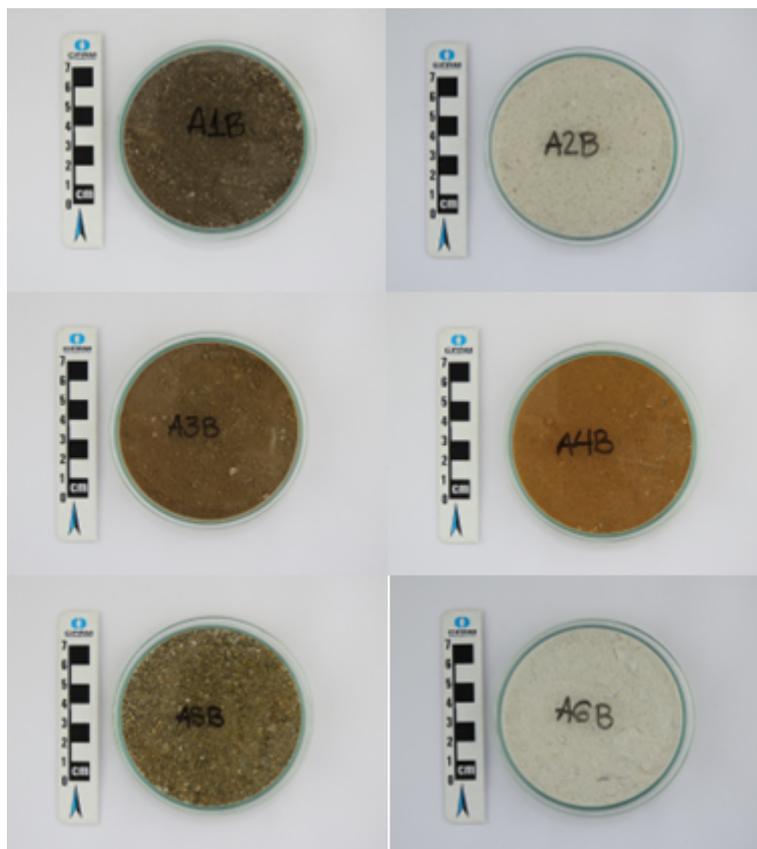


Fonte: Autor.

### 3.7 Análise espectral.

Parte das amostras foram devidamente quarteadas e enviadas para o laboratório de análise espectral do serviço geológico brasileiro (SGB), onde foram analisadas a reflectância das amostras nas faixas de 350-2500 nm. As leituras foram efetuadas em um espectrorradiômetro portátil ASD FieldSpec-3 High-Resolution. A amostras preparadas para análise espectral podem ser vistas na Figura 28.

Figura 28 - Alíquotas submetidas à análise espectral.



Fonte: Autor.

As análises espectrais foram feitas baseadas nas regiões onde as feições espectrais características se manifestavam, ou seja, região do comprimento de onda onde as absorções de energia eletromagnética se concentram. Para isto, foram levantados os mínimos dos espectros, e comparados com dados da literatura para discussão dos efeitos de transição e vibracionais responsável pelos comportamento espectrais, bem como comparação de bibliotecas espectrais para correlação com espectros de minerais correlatos.

### 3.7.1 Reamostragem dos dados para ASTER

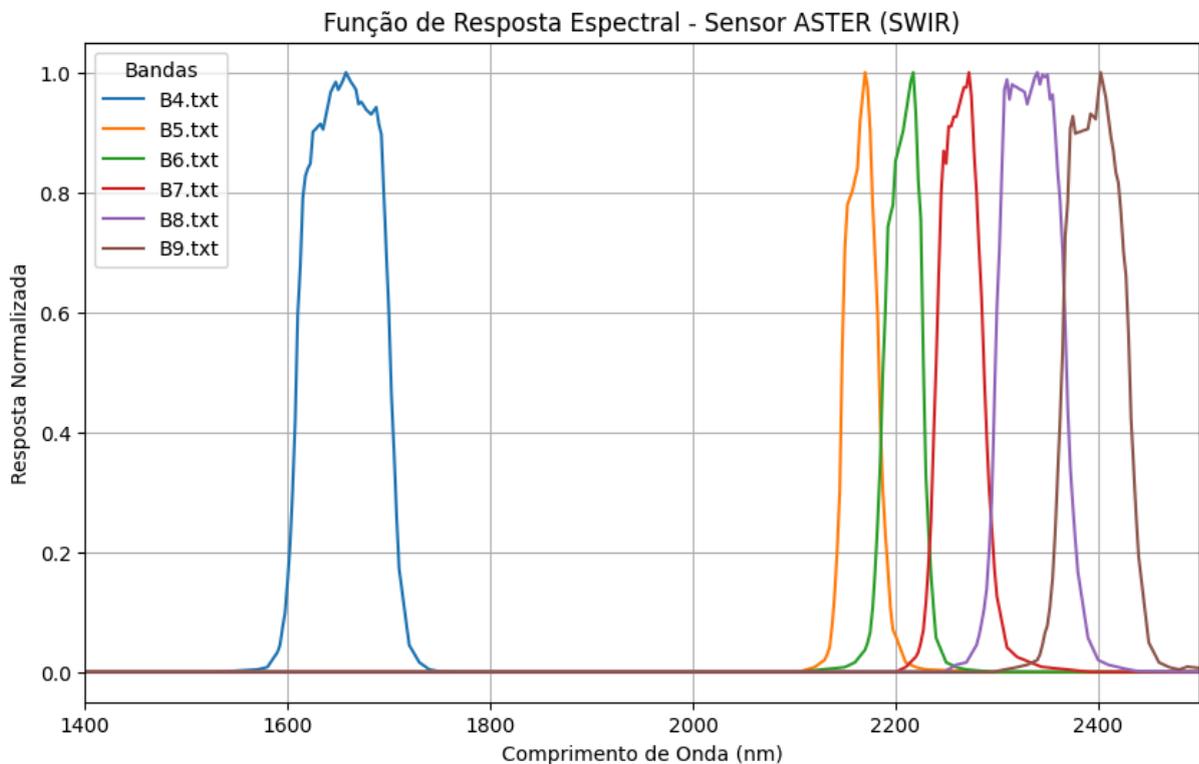
Para estimar o comportamento espectral da amostra estudada de forma mais precisa, os espectros foram reamostrados à resolução espectral do ASTER. A reamostragem foi realizada utilizando a Equação 1, conforme proposto por Meer *et al.* (2002), que prevê que um valor de banda reamostrado é a integral de uma resposta de canal, que pode ser descrita pela multiplicação na região de sobreposição entre a função de resposta para cada banda (função resposta) e o

espectro contido dentro de seus limites FWHM ("Full Width at Half Maximum" e se refere à largura da função de resposta da banda na metade de sua altura máxima), dividido pela integral de sua própria resposta.

$$\rho_{res}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) x R_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Onde "p" é o espectro de refletância a ser reamostrado e "R" é a função de resposta para a banda "i" selecionada. Para este estudo foi utilizado a função de resposta de cada banda, as funções respostas do sensor ASTER para região do infravermelho de ondas curtas podem ser vistas na Figura 29.

Figura 29 - Função resposta do sensor ASTER para região de infravermelho de ondas curtas (SWIR).



Fonte: Autor.

### 3.8 Pré processamento dos dados.

As técnicas de pré-processamento foram aplicadas usando o Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, 2021), no *software* Qgis (QGIS, 2024). O pré-processamento foi realizado calibrando os dados por seus coeficientes de calibração usando a equação proposta no guia do usuário do ASTER por Meyer *et al.* (2015), que é simplesmente subtrair o valor da banda por 1 e multiplicar pelo coeficiente.

Em seguida, com os dados calibrados de radiância no sensor, a correção atmosférica foi aplicada com a subtração do objeto escuro, que toma como suposição que os 1% pixels mais escuros dos dados devem ser um valor de "sem radiação", portanto, os pixels de alvos escuros indicam a quantidade de radiância do caminho ascendente nesta banda, e é removida pelo algoritmo (Chavez Jr, 1988). Este método foi realizado usando o Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, 2021), no *software* Qgis (QGIS, 2024), que a radiância do caminho em Equação 2 é proposta por (Sobrino *et al.*, 2004):

$$L_{P=} L_{min} - L_{D01\%} \quad (2)$$

Onde "  $L_{min}$  " é a radiância que corresponde a um valor de contagem digital para o qual a soma de todos os pixels com contagens digitais menores ou iguais a este valor é igual a 0,01% e " $L_{D01\%}$ " é a radiância de um objeto escuro, assumido como tendo um valor de refletância de 0,01, que pode ser calculado, assumindo que a atmosfera na direção de visualização e iluminação tem uma transmitância de 100% e não há irradiância difusa descendente em nossos dados, manipulando a equação de refletância proposta pela NASA (2011), que é mostrado na Equação 3:

$$L_{D01\%} = 0.01x \frac{ESU N_{\lambda} x \cos \theta_s}{\pi x d^2} \quad (3)$$

onde "  $ESU N_{\lambda}$  " é a irradiância solar exo-atmosférica média por cada banda (valores fixos por banda), " $\theta_s$ " é o ângulo zenital solar, dado por  $90 - \theta_e$  (ângulo de elevação do sol, presente nos metadados) , "d" é a distância Terra-Sol em unidades

astronômicas. Portanto, a refletância do fundo da atmosfera (BOA), com a mesma suposição mencionada acima, pode ser calculada conforme segue na Equação 4:

$$\rho = \frac{\pi x d^2 x (L_\lambda - L_p)}{ESU N_\lambda x \cos\theta_s} \quad (4)$$

onde " $L_\lambda$ " é a radiância em cada banda, e os demais termos foram citados acima.

A cena ASTER utilizada foi "AST\_L1T\_00312022002130910\_20150428191935\_37678", disponível na plataforma earth data search da NASA.

### 3.9 Métodos de clusterização das áreas estudadas

As técnicas de processamento de dados foram realizadas usando o Google Colab, uma iniciativa gratuita do Google que é especialmente adequada para aprendizado de máquina, ciência de dados e educação. É um serviço hospedado de Jupyter Notebook que não requer configuração para usar e fornece acesso gratuito a recursos computacionais, incluindo GPUs e TPUs.

Escolhido por ser uma plataforma gratuita, que integra e gerencia compatibilidade entre diferentes bibliotecas e possui uma interface amigável para programação e é bem construído, facilitando correções de código, além de ser amplamente utilizado, principalmente para pesquisa, e possuir uma comunidade interativa que interage cooperando para boas práticas de programação.

Para estudo é proposto uma análise dos dados multiespectrais, utilizando uma técnica de clusterização e classificação espectral. Inicialmente, os dados foram submetidos ao algoritmo de clusterização para identificar grupos homogêneos de amostras.

Para tanto, foi empregado o Kmeans, da biblioteca em python "spectral". Após a análise dos dados através da análise espectral e espectros reamostrados, notou-se que os dados diferenciam-se principalmente na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), portanto para esta análise foram utilizadas as bandas de 4 a 6 do ASTER.

Para uma métrica sugestiva do número de clusters foi utilizado o Método Within-Cluster Sum of Squares (WSS) – método do cotovelo. Este método calcula a

soma dos quadrados das distâncias intra-cluster para cada cluster e plota o resultado em função do número de clusters. O ponto de inflexão (cotovelo) nesse gráfico indica o número ideal de clusters.

A função kmeans retorna a imagem classificada, e os espectros médios de cada classe como dados de saída. Com os dados classificados, buscou-se a distribuição real por classe em cada banda da imagem, e foram calculados os quartis primeiro e terceiro, a distância interquartil entre eles, e parametrizado como outlier 1,5 vezes a distância interquartil acima do terceiro quartil e abaixo do segundo quartil. Os valores considerados outliers foram retirados e uma nova média para cada classe foi calculada como representativa, da população.

Os espectros das classes representativas das áreas estudadas foram classificados angularmente utilizando a biblioteca espectral de referência do serviço geológico norte americano, spec lib 7 USGS (Kokaly *et al.*, 2017). A classificação angular ocorreu pela similaridade do cosseno, como demonstrado na equação 5.

A métrica de similaridade, encarada como erro de classificação nesta técnica, foi calculada como a diferença angular entre o espectro da classe e o espectro classificado da biblioteca.

### 3.9.1 Métodos de mapeamento dos espectros alvo.

O método de mapeamento utilizado será o de similaridade do cosseno, conforme comentado por Carvalho e Meneses (2000), o método calcula o ângulo no espaço multibanda entre reflectância de um espectro (vetor referência, representado pela classe clusterizada relacionada a área a) e os demais, através do cosseno entre eles, quanto mais próximo de 1 o valor do cosseno, mais similares os espectros são. O cosseno é calculado através da equação 5:

$$\text{Cos}(\theta_{AxB}) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (5)$$

Onde "A<sub>i</sub>" é o espectro de reflectância de referência e "B<sub>i</sub>" o espectro que se deseja comparar.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização mineralógica das amostras de pegmatito apresentou desafios significativos devido ao avançado grau de alteração e fraturamento. A microscopia óptica permitiu a identificação preliminar de minerais como feldspato e muscovita, enquanto a análise química forneceu informações sobre a composição elementar.

A espectroscopia, por sua vez, revelou-se uma ferramenta fundamental para a discriminação de minerais, especialmente na identificação de caulinita e possíveis indicativos de espodumênio. No entanto, a complexidade dos espectros e a falta de uma biblioteca espectral completa para a região limitaram a precisão das identificações.

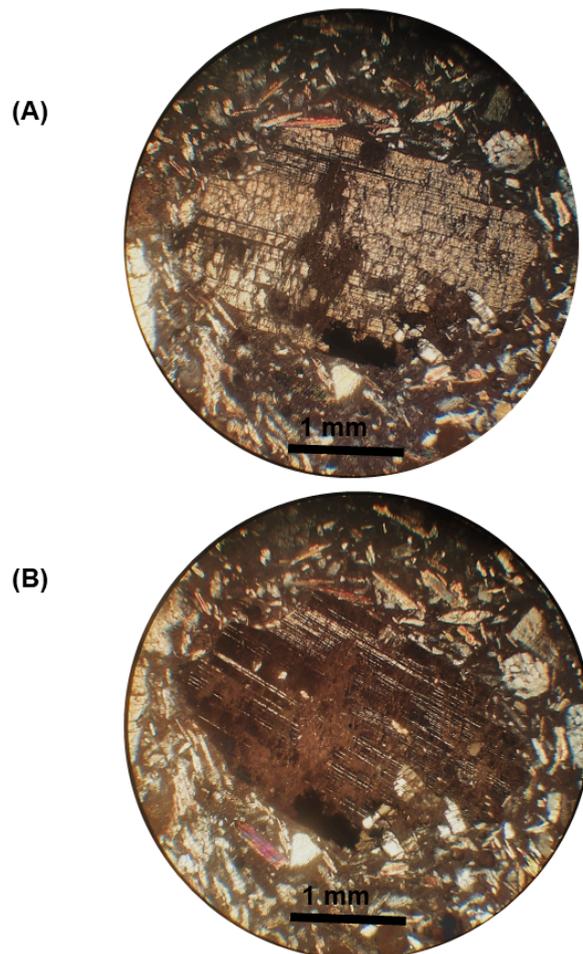
Os resultados processados obtidos demonstram o potencial da análise espectral para a caracterização de pegmatitos, e mapeamento de potenciais áreas alvo de prospecção.

### 4.1 Descrição petrográfica

Das lâminas preparadas, as que apresentaram padrões mínimos de reconhecimento de características dos minerais foram as amostras pegmatíticas, representadas pelas amostras 2 (área 1) e 6 (área 2). Em nenhuma das amostras foi possível a realização de Figuras de interferência, o motivo pode ser o estado de alteração das amostras assim como a preparação das amostras, intensamente fraturadas devido à britagem e moagem, portanto as descrições são meramente sugestivas.

Na amostra 2, foi encontrado um mineral de relevo baixo, aparentemente de forma anédrica sem pleocroísmo a nicóis descruzados, e a nicóis cruzados apresentou coloração acinzentada, aspecto quebradiço, podendo estar relacionado a preparação da amostra, na posição de extinção fica mais visível macla polissintética em forma de pretas alternadas, de largura às vezes mais finas e às vezes mais grossas, de extinção oblíqua. As características são condizentes com os plagioclásios do grupo dos feldspatos, sendo que as fotos da lâmina podem ser vistas na Figura 30.

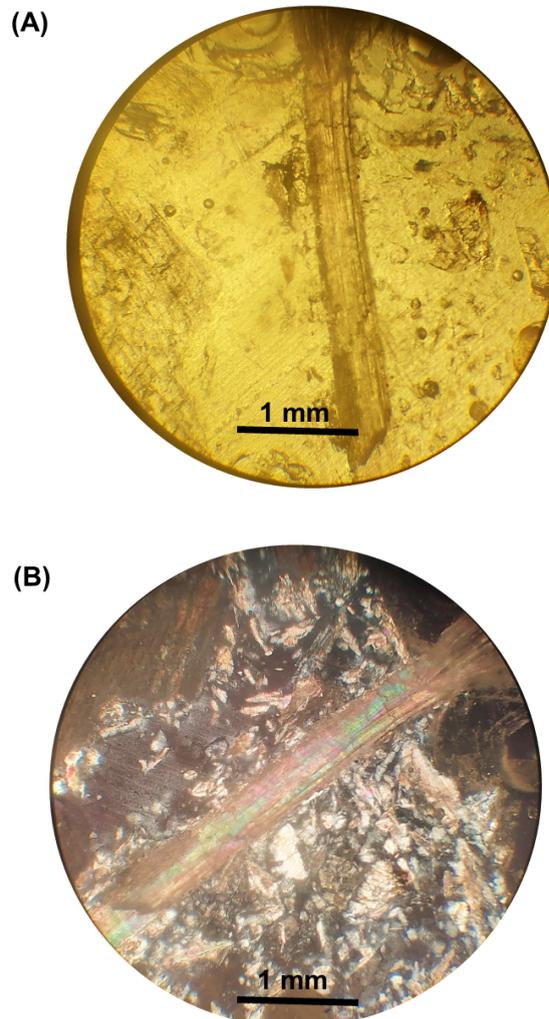
Figura 30 - Cristal de possível feldspato encontrado na lâmina da amostra 2 da área 1, a nicóis cruzados, mostrando cor acinzentada (a) e macla polissintética (b).



Fonte: Autor.

Ainda na lâmina da área 1, foi encontrado um mineral com relevo moderado e forma lamelar e incolor a nicóis cruzados, e a nicóis cruzados apresentou extinção paralela, e cores aparentemente de segunda ordem. A descrição é condizente com as características da muscovita e as fotos da lâmina são apresentadas na Figura 31.

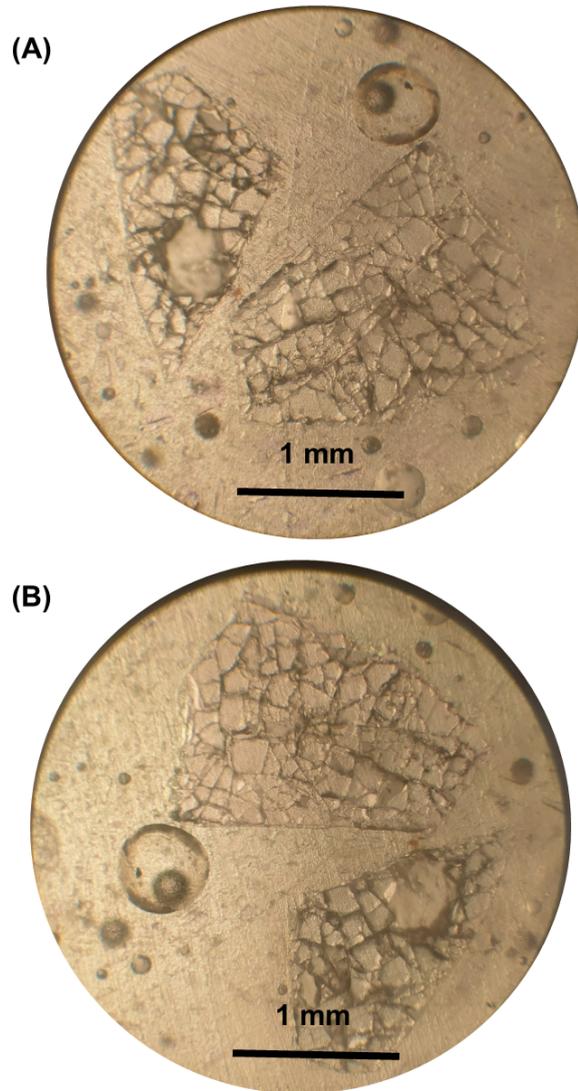
Figura 31 - Cristal de possível muscovita encontrado na lâmina da amostra 2 da área 1, a nicóis descruzados, mostrando aspecto incolor e (a) cores de interferência de segunda/terceira ordem. Formas arredondadas são bolhas na lâmina.



Fonte: Autor.

Também foi encontrado um mineral de relevo médio bem destacado, com um discreto pleocroísmo esverdeado, cristais anédricos de forma indefinida e intensamente fraturado, ficando difícil assumir posição de clivagem, como pode ser visualizado na Figura 32.

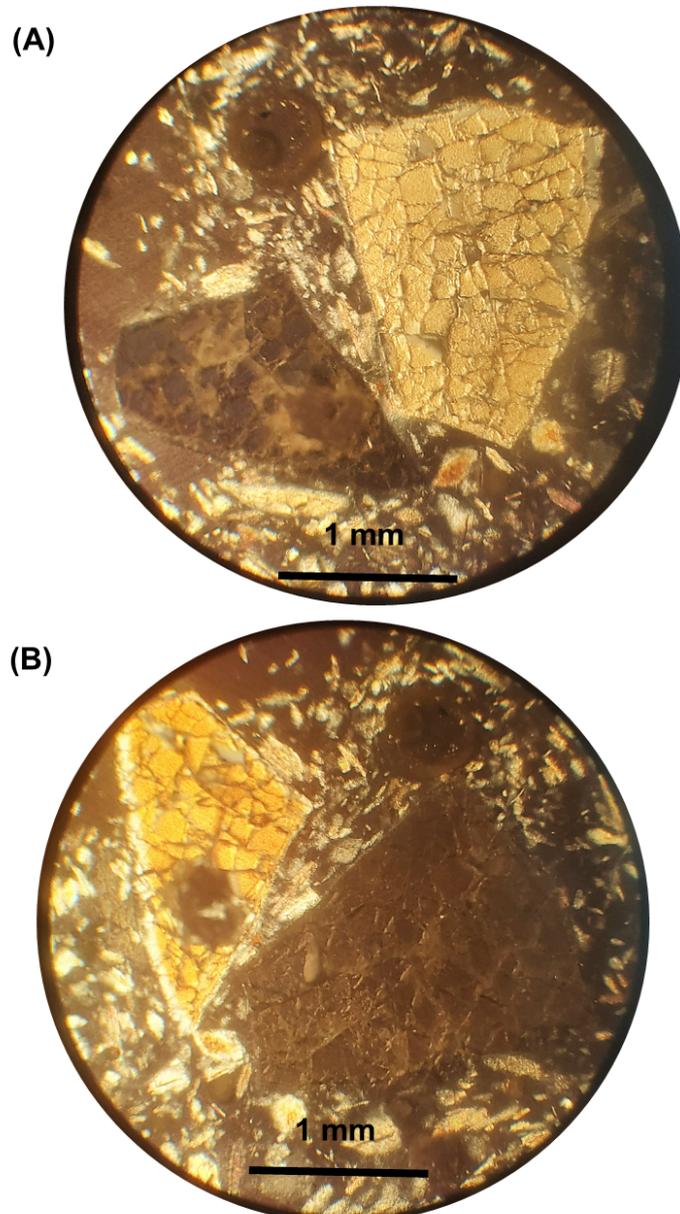
Figura 32 - Cristal de mineral mostrando relevo bem definido (a) e discreto pleocroísmo discretamente esverdeado (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.



Fonte: Autor.

Por não ser possível delimitar uma direção de clivagem, não é possível fazer observação sobre a posição de extinção. Demonstra cor de interferência alaranjada, possivelmente de primeira ordem, como pode ser observado na Figura 33. Caso fosse confirmado direção de extinção oblíqua, seria uma forte evidência de que possa se tratar de um clinopiroxênio, grupo onde o espodumênio se encontra.

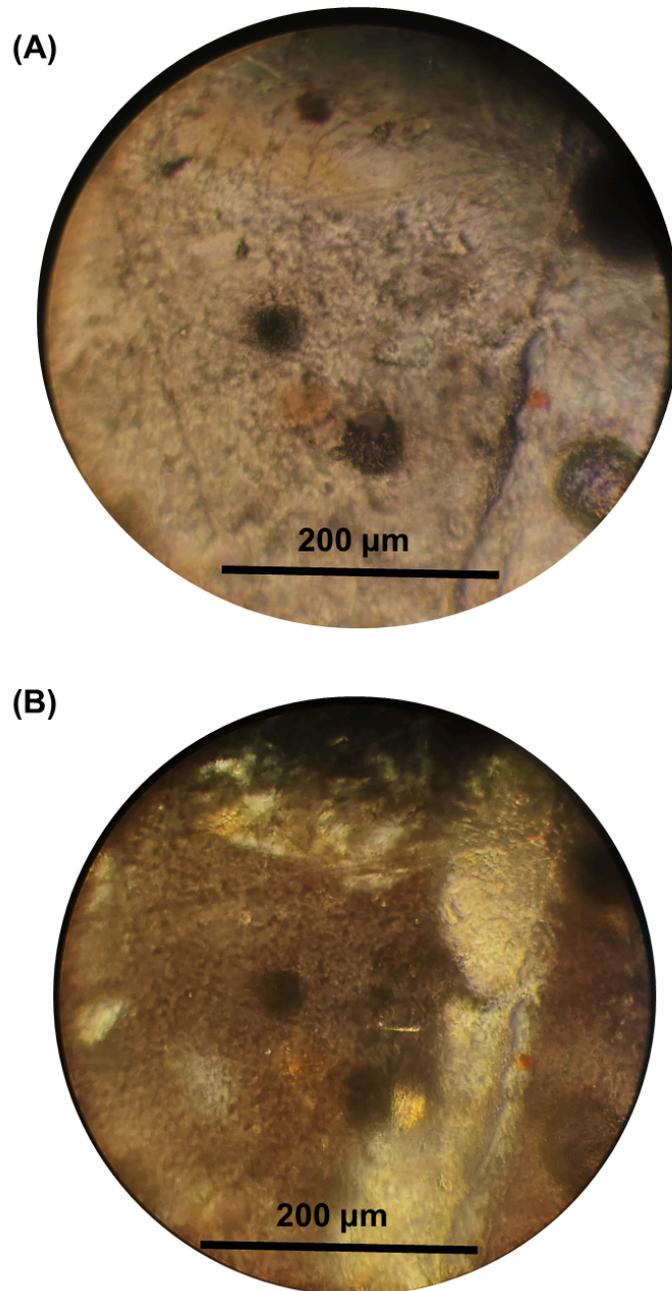
Figura 33 - Cristais mostrando posição de extinção e cores alaranjadas (a) e (b).  
Formas arredondadas são bolhas na lâmina.



Fonte: Autor.

Na lâmina da área 2, poucos cristais foram possíveis ser observados com características, podendo estar relacionado ao avançado grau de intemperismo das amostras, gerando argilominerais que misturam-se com a resina usada, dificultando a análise. Foi observado um mineral de incolor de baixo relevo a nicóis descruzados, sem pleocroísmo. A nicóis cruzados, observa-se que o mineral apresenta forma tabular, de cor de interferência cinza, mostrando feições de deterioração, podendo representar um feldspato passando por processo de argilização/caulinização. As feições podem ser observadas na Figura 34.

Figura 34 - Cristais mostrando baixo relevo a nicóis descruzados (a) e cor cinza e aspecto deteriorado a nicóis cruzados (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.



Fonte: Autor.

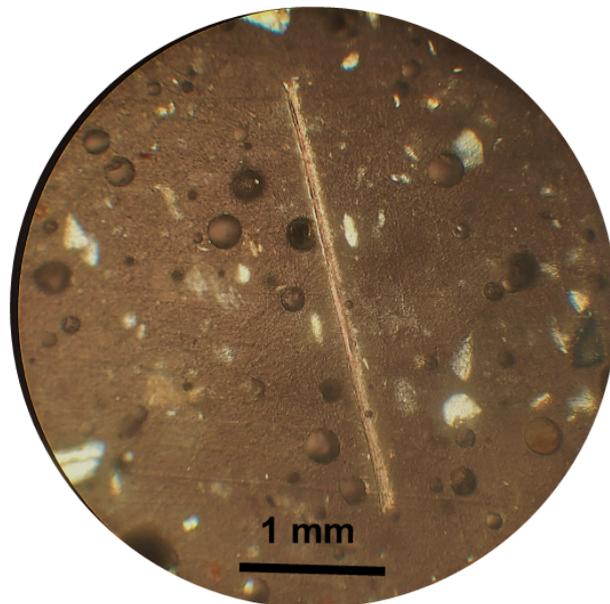
Ainda na lâmina da área 2, foi encontrado um mineral com relevo moderado e forma lamelar e incolor a nicóis cruzados, e a nicóis cruzados apresentou extinção paralela, e cor amarelada. A descrição é condizente com as características da muscovita. Fotos da lâmina podem ser vistas na Figura 35.

Figura 35 - Cristal mostrando relevo médio e forma lamelar incolor a nicóis descruzados (a) cor amarelada a nicóis cruzados (b). Formas arredondadas são bolhas na lâmina.

(A)



(B)

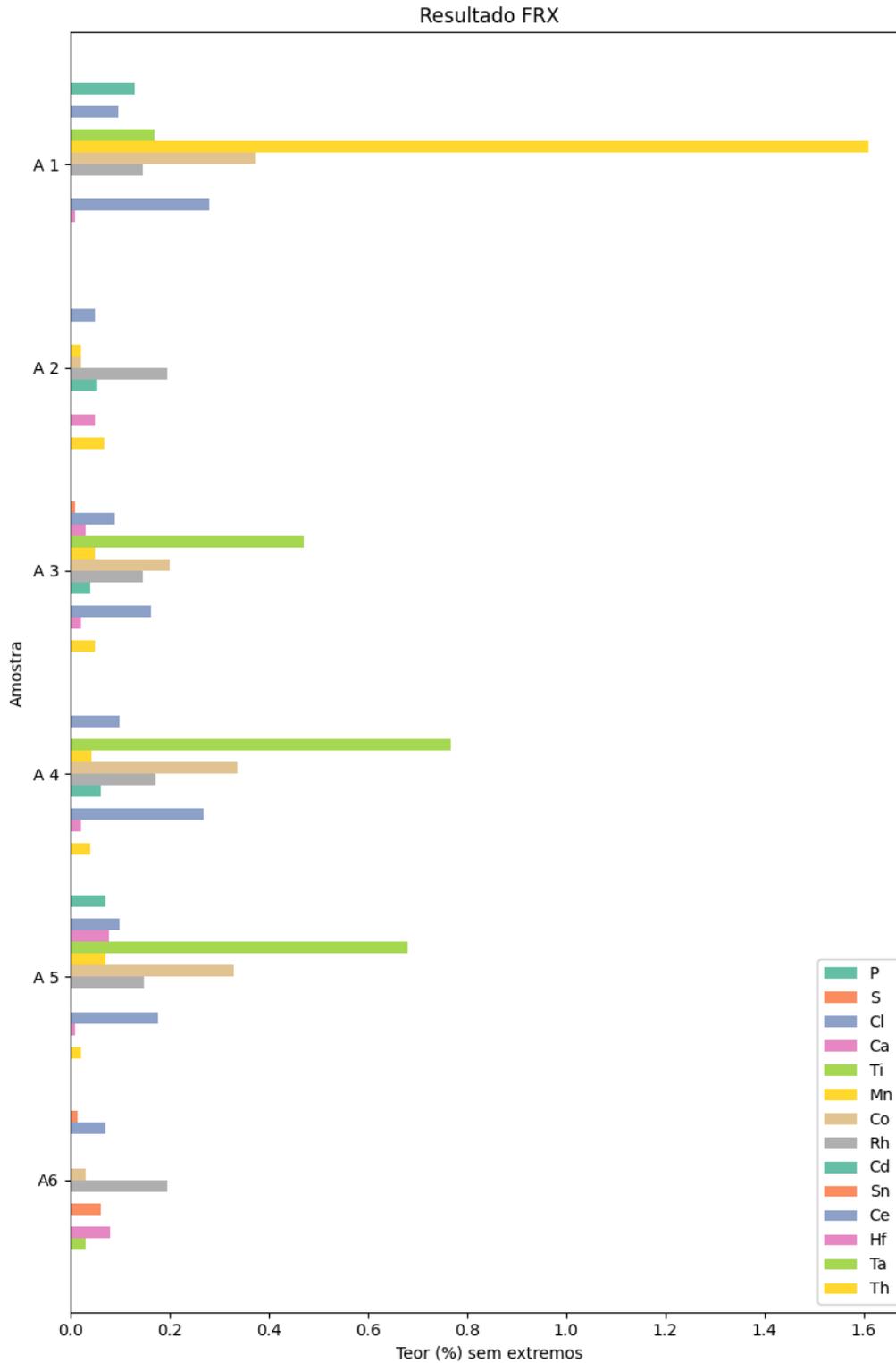


#### 4.2 Descrição química composicional

As análises químicas foram realizadas com o equipamento FRX Titan (Item 3.6), utilizando a biblioteca "Geochem". Como essa biblioteca não é calibrada especificamente para as amostras deste estudo, os resultados da composição química são aproximados. As análises foram feitas 5 vezes para cada amostra e foram excluídos valores afastados 1 desvio da média para maior confiabilidade nos resultados.

Os resultados das análises podem ser vistos na Figura 36, sem os dados de 'Si', 'Mg', 'Al', 'Fe', 'K' para não prejudicar a visualização dos dados, que serão posteriormente apresentados em Tabela específica.

Figura 36 - Teor de elementos encontrados no FRX.

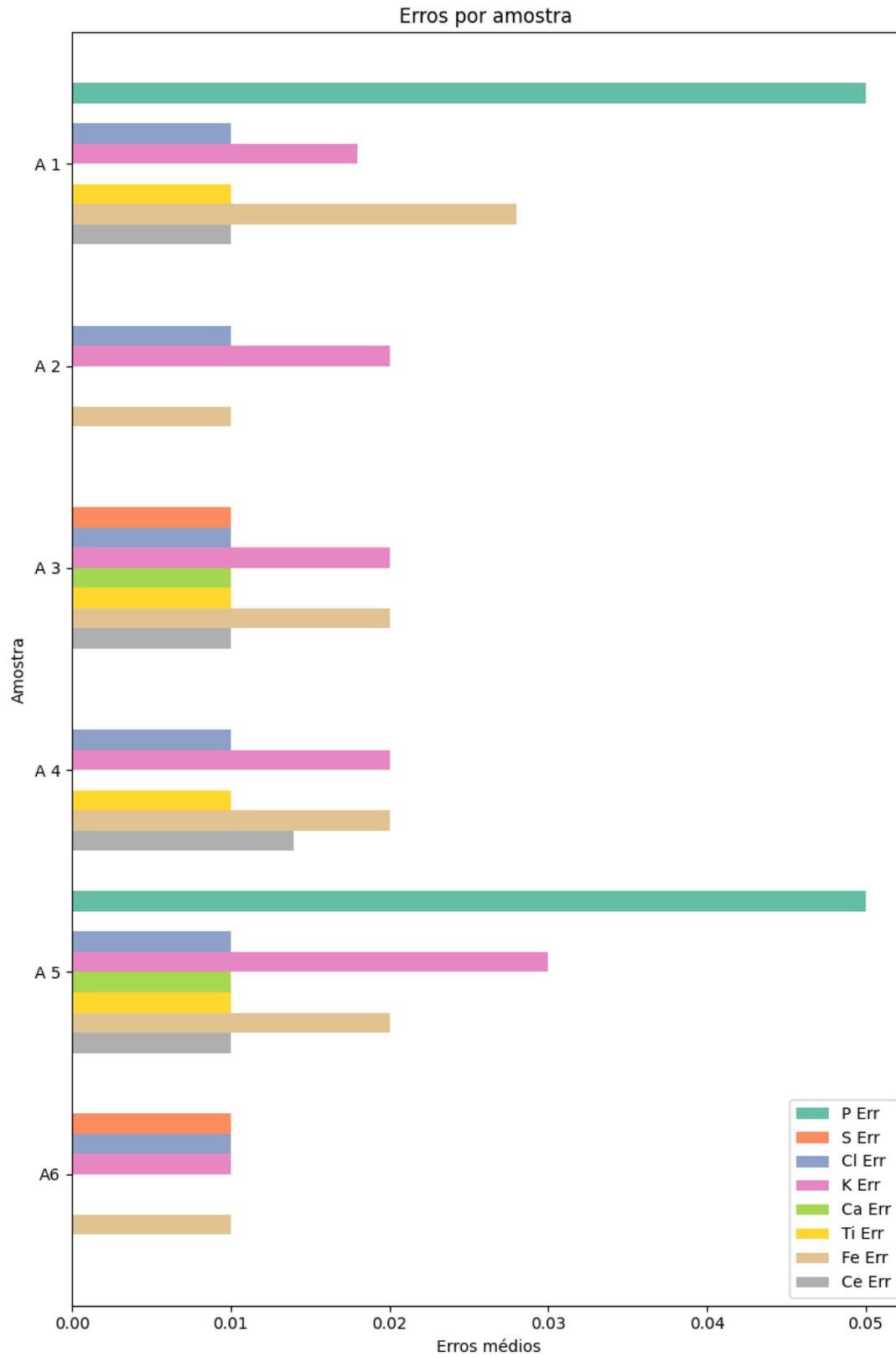


Fonte: Autor.

Os erros relacionados às medidas são dados de saída do próprio equipamento, e podem ser visualizados na Figura 37, sem os dados de erro de 'Si'.

'Mg', 'Al', para não prejudicar a visualização dos dados. Os dados integrais serão posteriormente apresentados na Tabela 6.

Figura 37 - Erros amostrais da análise FRX.



Fonte: Autor.

Os erros relacionados às medidas são dados de saída do próprio equipamento, e podem ser visualizados na Figura 37, sem os dados de erro de 'Si', 'Mg', 'Al', para não prejudicar a visualização dos dados. Os dados integrais serão posteriormente apresentados em Tabela específica.

Foi possível notar um alto erro para as medidas de magnésio, portanto os valores não foram considerados. O valor de potássio foi relativamente alto para o pegmatito da área um, mas foi baixo para o pegmatito da área 2, mostrando que nem sempre esta relação é direta, além do fato de que os pegmatitos podem ser zonados, e o potássio é elemento constituinte dos feldspatos potássicos que em pegmatitos LCT complexos ocorrem preferencialmente em determinadas zonas.

O cobalto e o cloro apresentaram-se como valores baixos nos pegmatitos quando comparados com as demais amostras, que pode indicar, principalmente para área 1, em que as amostras A3 e A4, que são amostras de solo e saprolito relacionados ao pegmatito A2, podem ter herdado estes elementos do xisto, provavelmente A5, que possui altos valores de Co e Cl.

Os resultados de Háfnió e Ródio apresentam-se como valores maiores em ambos pegmatitos quando comparados com as demais amostras, podendo se confirmado em estudos de maior detalhamento, ser utilizado como indicador de prospecção mineral.

Os resultados podem ser visualizados na Tabela 6, tendo sido considerados nas Tabelas apenas valores que resultaram em medidas simultâneas para todas as amostras, para fins de comparação.

Tabela 6 - Tabela de dados médios integral, valores em vermelho são valores em que os pegmatitos apresentaram valores inferiores que as demais amostra, e verde superiores.

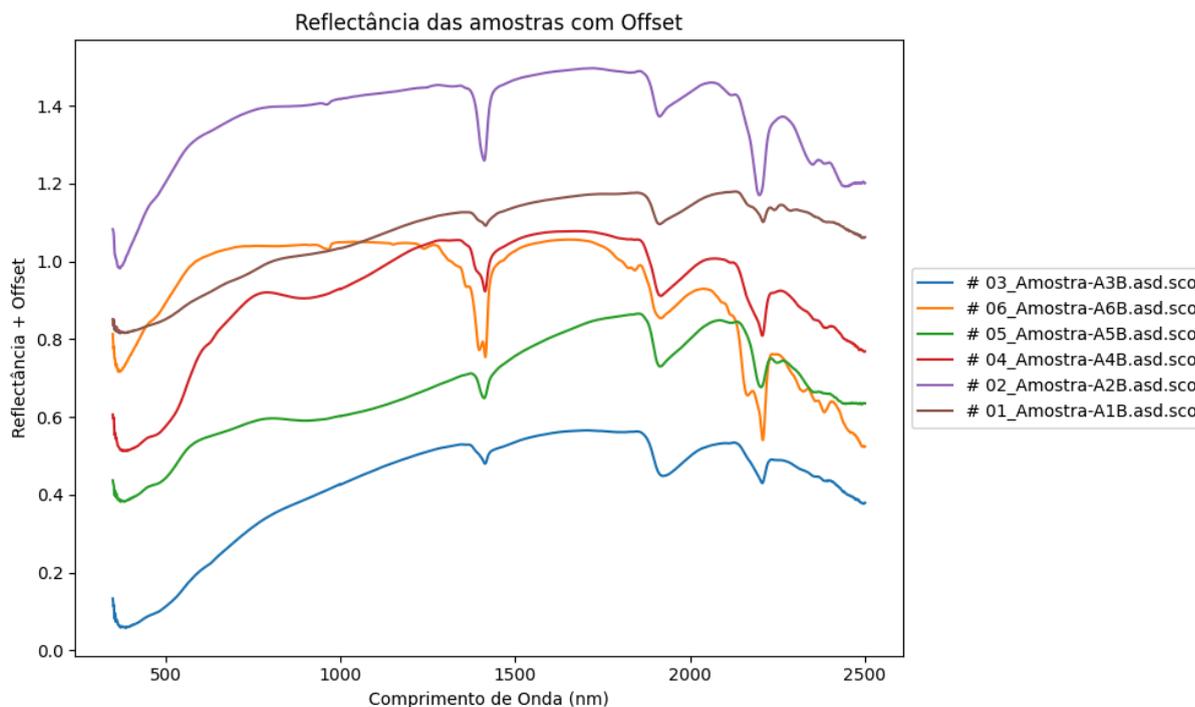
<b>Amostra</b>	<b>A 1 (%)</b>	<b>A 2 (%)</b>	<b>A 3 (%)</b>	<b>A 4 (%)</b>	<b>A 5 (%)</b>	<b>A6 (%)</b>
<b>Mg</b>	4.127	2.387	3.433	3.215	3.925	3.425
<b>Mg Err</b>	3.718	2.210	2.812	3.656	3.312	2.636
<b>Al</b>	17.025	22.125	22.200	25.167	19.733	29.300
<b>Al Err</b>	0.618	0.582	0.610	0.680	0.618	0.658
<b>Si</b>	39.250	50.433	50.267	39.025	43.400	45.767
<b>Si Err</b>	0.522	0.570	0.580	0.510	0.542	0.538
<b>Cl</b>	0.098	<b>0.050</b>	0.090	0.100	0.100	<b>0.070</b>
<b>Cl Err</b>	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
<b>K</b>	1.233	2.638	2.700	2.175	3.763	0.400
<b>K Err</b>	0.018	0.020	0.020	0.020	0.030	0.010
<b>Fe</b>	7.687	0.385	3.397	5.820	5.697	0.460
<b>Fe Err</b>	0.028	0.010	0.020	0.020	0.020	0.010
<b>Co</b>	0.373	<b>0.020</b>	0.200	0.338	0.330	<b>0.030</b>
<b>Co Err</b>	0.010	0.000	0.000	0.010	0.010	0.000
<b>Rh</b>	0.145	<b>0.195</b>	0.147	0.173	0.148	<b>0.195</b>
<b>Rh Err</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Hf</b>	0.010	<b>0.050</b>	0.020	0.020	0.010	<b>0.080</b>
<b>Hf Err</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010

Fonte: Autor.

### 4.3 Análise de feições espectrais

Os espectros coletados em campo analisados no laboratório do Serviço Geológico do Brasil (SGB) podem ser vistos na Figura 38.

Figura 38 - Espectros de reflectância das amostras coletadas em campo.



Fonte: Autor.

Os dados espectrais totais têm cerca de 2150 dados de reflectância ao longo de 350 até 2500 nm, tornando um desafio comparar dados com bibliotecas espectrais de maneira automática. Para este estudo, foi proposta metodologia de mapeamento de mínimos (vales de absorção dos gráficos) para mapeamento das regiões de interesse.

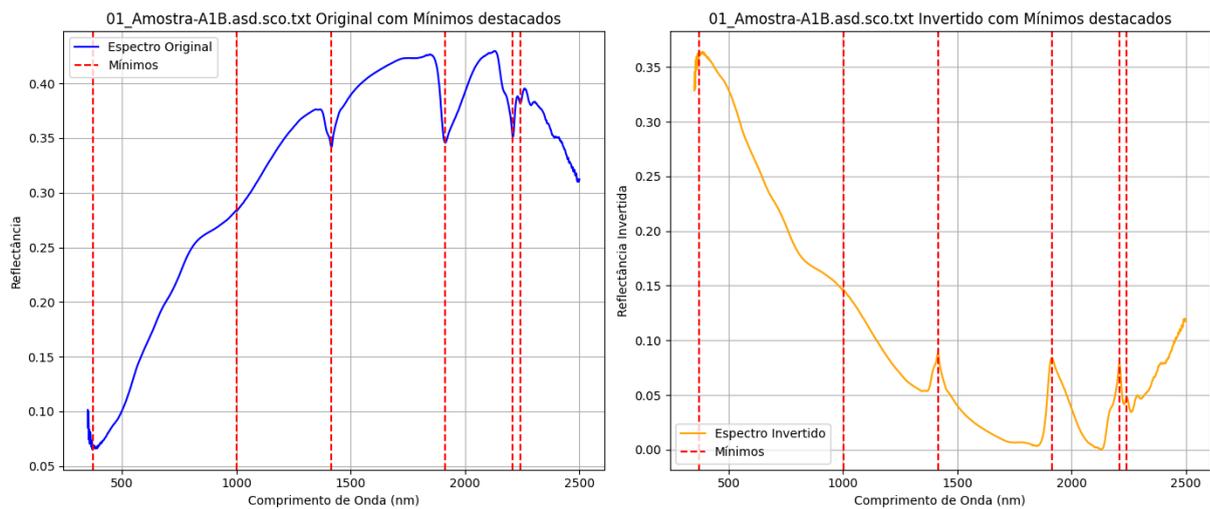
A rotina foi implementada usando a função *find\_peaks* da biblioteca *scipy.signal* que busca picos em funções, invertendo cada espectro através da diminuição de cada dado do dado máximo do próprio espectro, desta forma os picos usuais, se tornaram vales e os vales se tornam picos, possibilitando que a função mapeie os comprimentos de ondas dos vales da função.

A sensibilidade dos picos é passada como argumento da função denominada “proeminência”, quanto menor mais sensível. Como os espectros possuem diferentes comportamentos para cada região do comprimento de onda, foram

divididos cada espectro em 4 regiões, para que se adequasse a sensibilidade da função para melhor ajuste na detecção dos picos.

Para os picos do entre 350 e 800 nm foi utilizado proeminência 0.025, entre 800 e 1100 nm, proeminência de 0.0001, entre 1100 nm e 2000 nm proeminência de 0.005 e entre 2000 e 2500 nm proeminência de 0.0035. O gráfico demonstrando a metodologia pode ser visto na Figura 39.

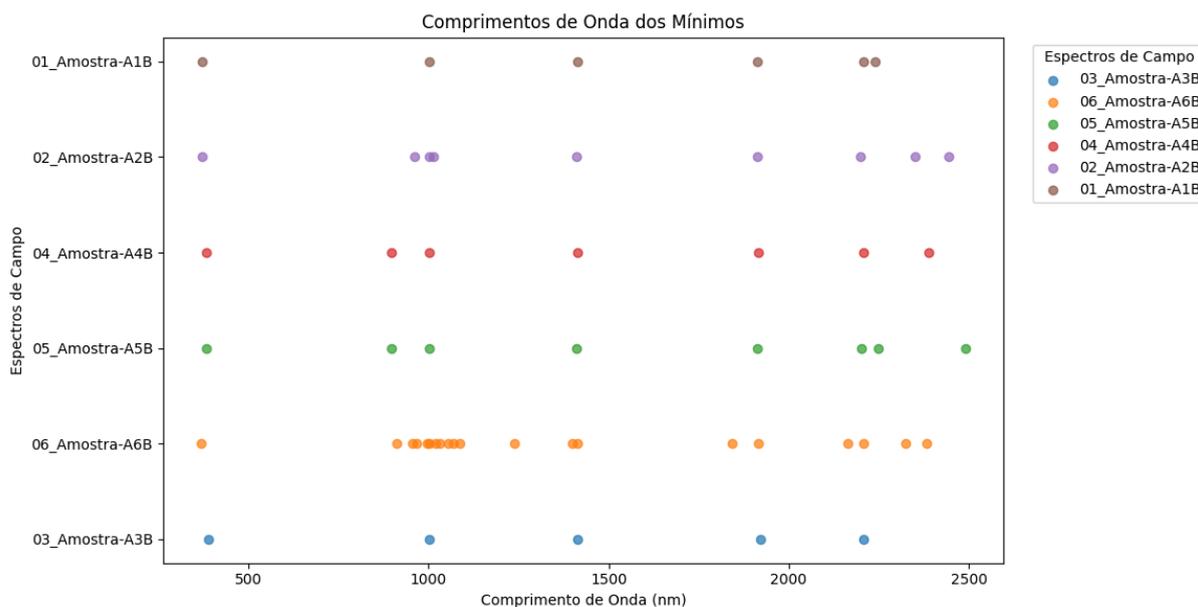
Figura 39 - Lógica para aplicação da função de encontrar picos.



Fonte: Autor.

A lógica foi aplicada a todos os espectros e os resultados podem ser vistos na Figura 40.

Figura 40 - Mínimos espectrais mapeados através de pontos nas regiões estudadas.



Fonte: Autor.

Cada espectro teve seus mínimos marcados individualmente em cada região do espectro.

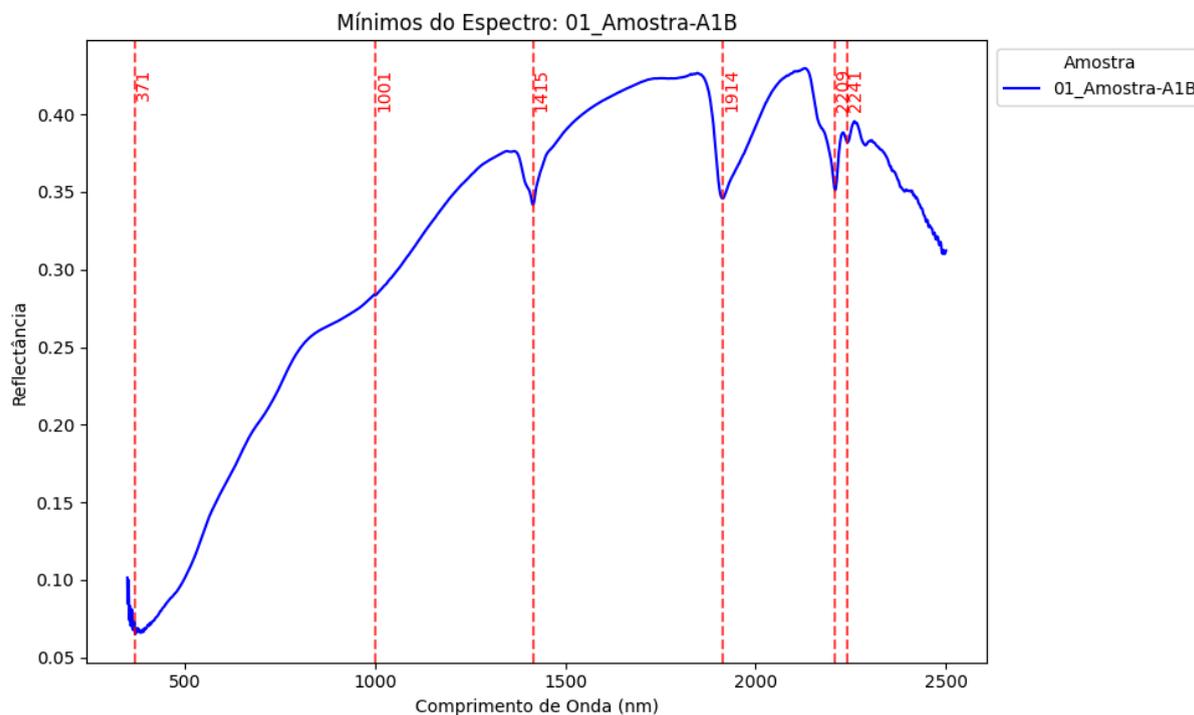
Quase todos os espectros apresentaram uma feição de absorção entre 365 nm e 390 nm, características de absorção de sulfatos ricos em Fe (por exemplo jarosita) e óxidos ricos em Fe (por exemplo goethita, mais comum para o caso em tela) (Schaefer *et al.*, 2021).

Aproximadamente em ~1000 nm há uma feição de ombro, não proeminente, também podendo estar relacionado a  $Fe^{3+}$ , goethita e a hematita também apresentam feições de absorção características entre 850 e 1000 nm (Morris, 1985).

As feições 1400 nm estão relacionadas às vibrações de íons hidroxila ( $OH^-$ ), e 1900 nm (água molecular) (Binotto, 2015).

Comumente “AlOH”, “FeOH” são usadas para definir grupos com características de absorção centradas em cerca de ~2.200 nm, ~2.250 nm respectivamente (Laukamp *et al.*, 2021). Estas feições são observadas nos espectros da amostra 1, como demonstrado na Figura 41.

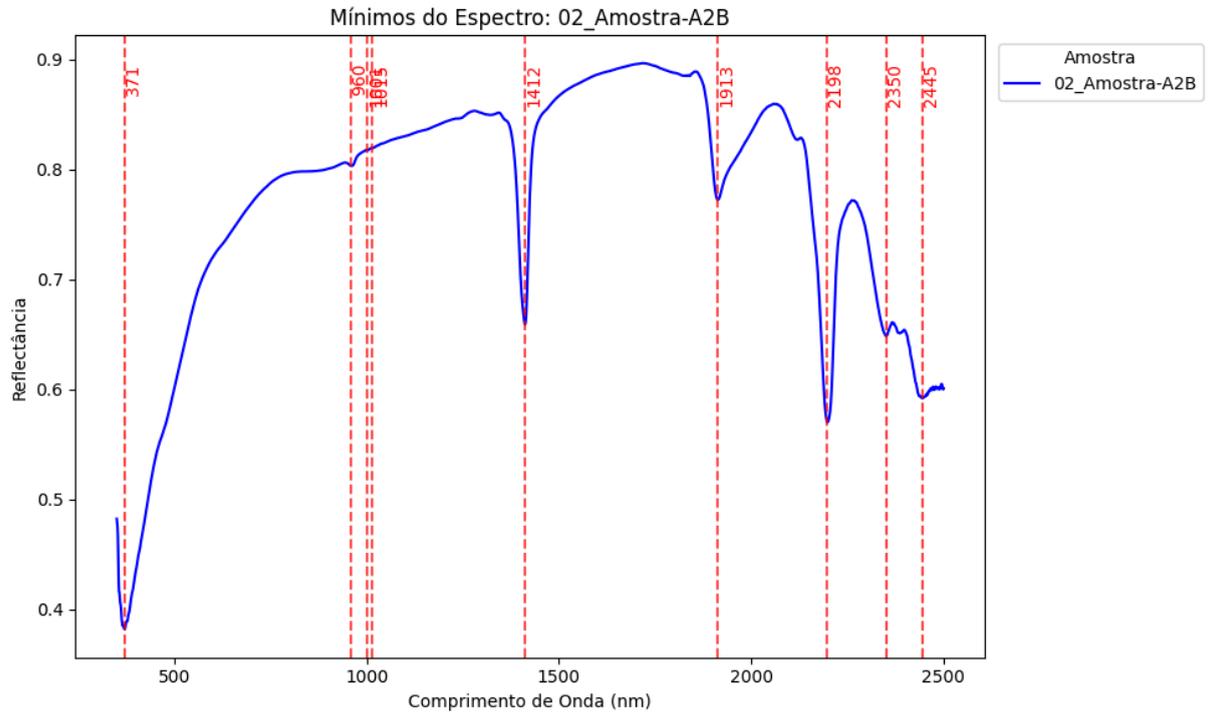
Figura 41 - Mínimos do espectro da amostra 1.



Fonte: Autor.

As feições do espectro 2 apresentaram um cluster de mínimo entre 960-1000 nm, com feição pouco acentuada, podendo estar relacionada a presença de  $Fe^{3+}$ , como também as feições ~370 nm, ~1400 nm, ~1900 nm e 2200 nm. Feições presentes ~2350 nm, são geralmente usadas para representar a presença de Mg-OH e ~2450 nm usada como feição diagnósticas das micas (Laukamp *et al.*, 2021). O espectro da amostra 2 pode ser visto na Figura 41.

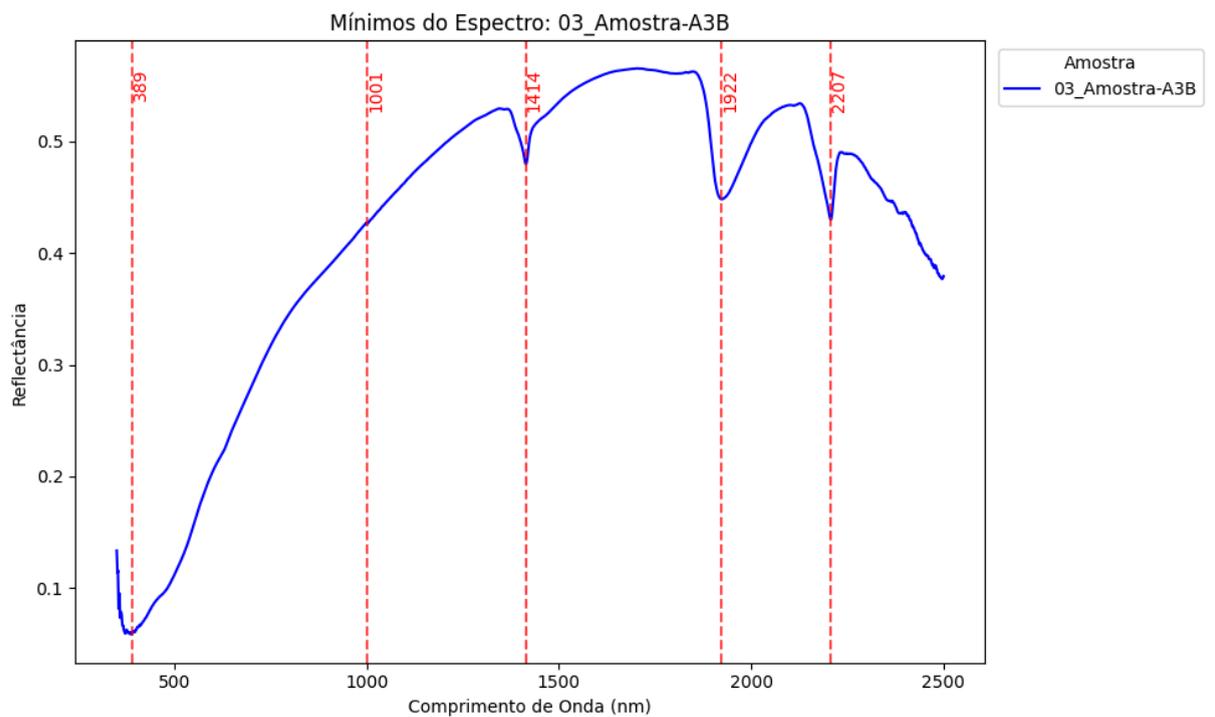
Figura 41 - Feições espectrais da amostra 2.



Fonte: Autor.

Os espectros da amostra 3 podem apresentar feições comuns às demais e podem ser observadas na Figura 42.

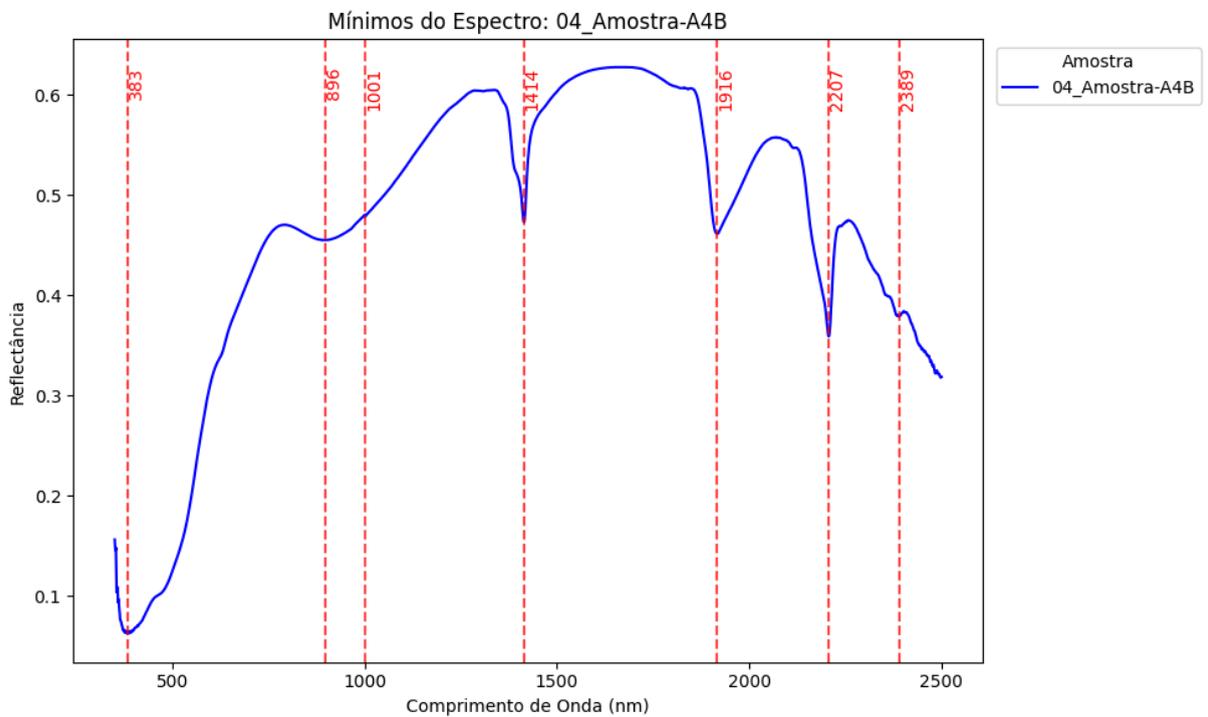
Figura 42 - Feições espectrais da amostra 3.



Fonte: Autor.

O espectro da amostra 4 conforme observado na Figura 43 apresenta feição centrada em ~896 nm mais proeminente, podendo estar relacionadas a teores mais expressivos de  $Fe^{3+}$ , uma vez que intensidade relativa (isto é, profundidade) de uma feição de absorção está correlacionada com a abundância relativa do respectivo responsável pelo fenômeno, há pequena feição de absorção ~2390nm, não muito relevante, mas observada em filossilicatos ricos em  $Fe^{2+}$  (Laukamp *et al.*, 2021).

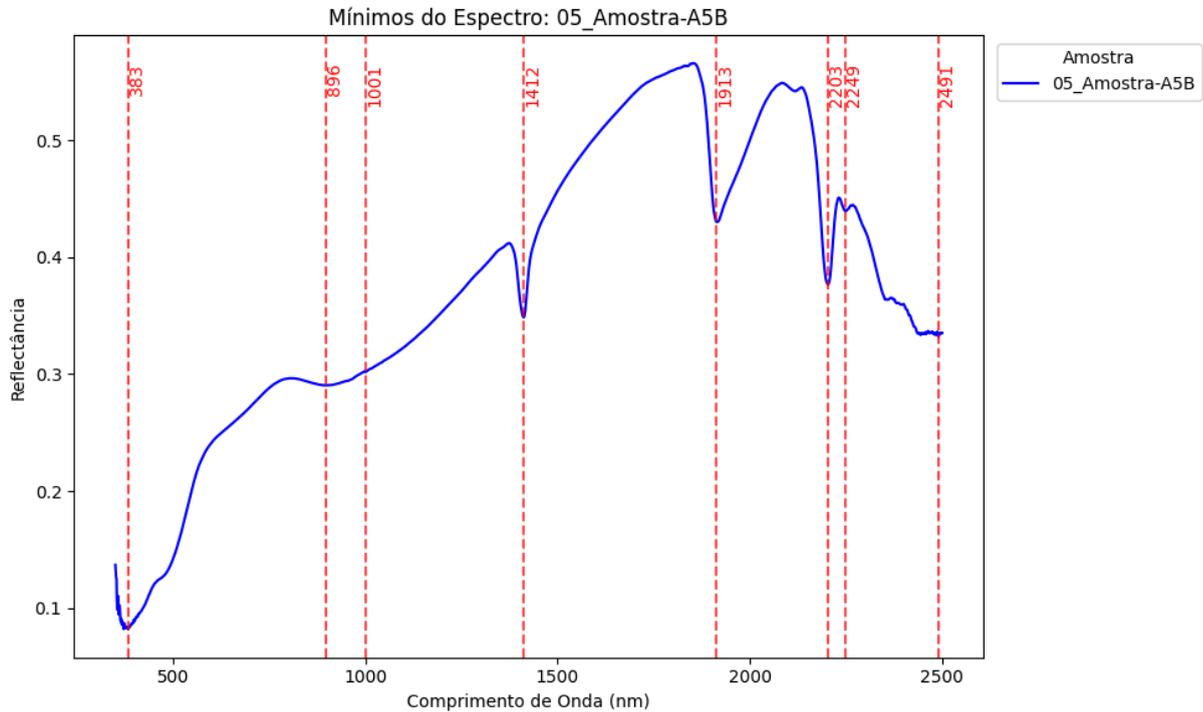
Figura 43 - Feições espectrais da amostra 4.



Fonte: Autor.

As feições da amostra 5 apresentam feições previamente comentadas, além de uma pequena marcação de feição ~2490nm, abordada como ruído por ter absorção irrelevante. Os resultados podem ser vistos na Figura 44.

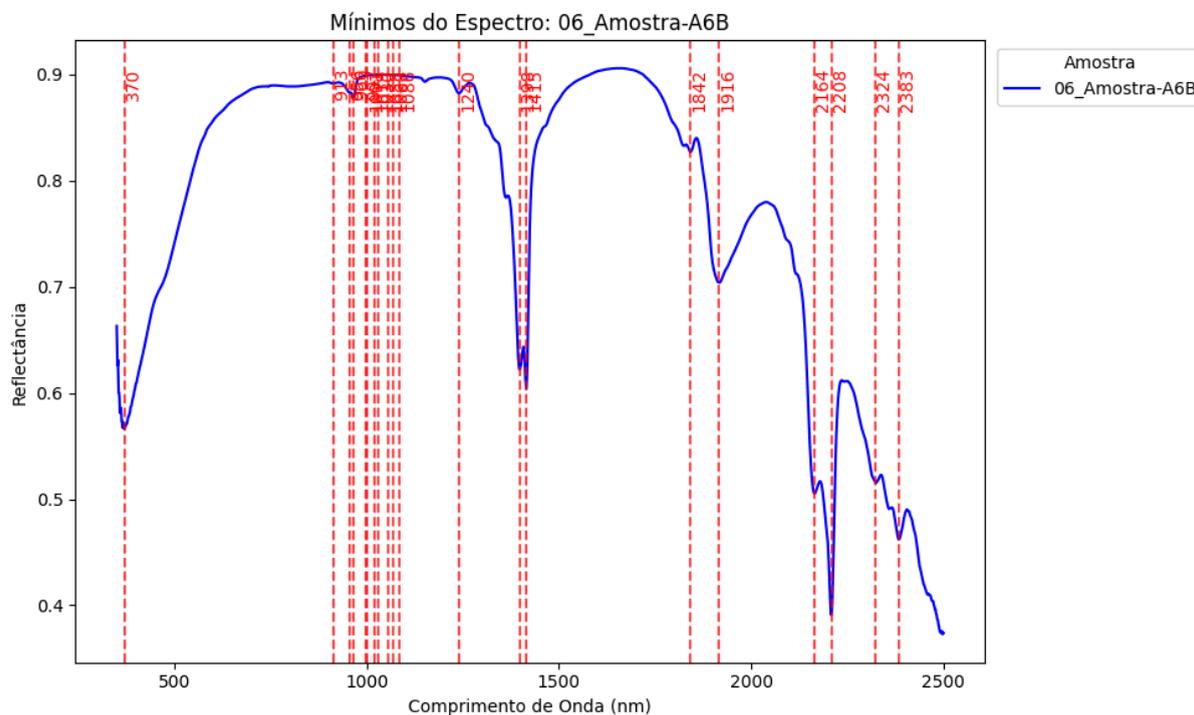
Figura 44 - Feições espectrais da amostra 5.



Fonte: Autor.

A amostra 6 apresenta feições já comentadas, cluster de mínimos ~1000 nm, e diferencia-se por dupla absorção ~1400 nm e ~2200 nm típicas da caulinita A. A feição dupla em ~1400 nm é função das vibrações nos íons hidroxilas ( $OH^-$ ) e moléculas de água ( $H_2O$ ), enquanto a feição dupla em ~2200 nm deve-se à energia vibracional da ligação Al-OH (Binotto, 2015). o resultado pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 - Feições espectrais da amostra 6.



Fonte: Autor.

#### 4.4 Análise espectrais com biblioteca espectral

Com os mínimos mapeados (região de comprimento de onda e reflectância correspondente) de cada espectro, a mesma metodologia foi aplicada a biblioteca espectral do serviço geológico norte americano, spec lib 7 USGS (Kokaly *et al.*, 2017). Com estes dados foram calculadas as distâncias euclidianas entre os mínimos entre espectro avaliado e o da biblioteca espectral, ordenando desta forma os 15 espectros mais similares da biblioteca espectral para comparação e classificação mineral. O espectro foi dividido em 4 regiões para visualização das feições características dos minerais presentes na biblioteca. As regiões foram 350 a 800 nm, entre 800 e 1100 nm, entre 1100 nm e 2000 nm e entre 2000 e 2500.

Cada espectro teve uma região selecionada de acordo com a feição espectral diagnóstica, que para os casos estudados foram as regiões 1100 nm e 2000 nm e entre 2000 e 2500.

Para amostra 1 entre 1100 nm e 2000 nm, as absorções referente a  $OH^-$  (~1400 nm) e  $H_2O$  (~1900 nm), é possível observar uma semelhança da forma com a goethita, contudo estas feições não são diagnósticas da mesma, o espectro

de muscovita semelhante não apresenta feição bem marcada em 1900 nm, e tão pouco o espectro de campo apresenta proeminente absorção em ~1400 nm característico do mineral.

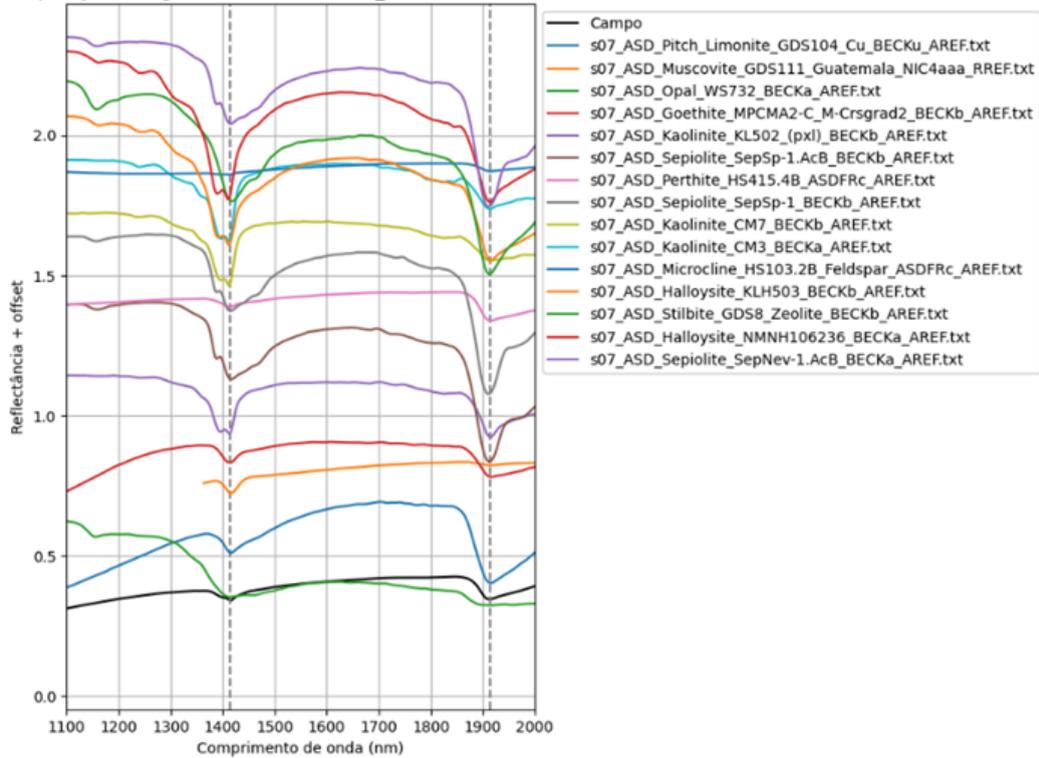
Dentre os espectros seleccionados o que mais faz sentido é a pertita, descrita como microclina com albita exsolvida, que são minerais do grupo dos feldspatos, coerentes de estarem presentes na região pegmatítica.

Na região do espectro entre 2000 nm e 2500 nm, o espectro se assemelha ao da turmalina, o que condiz com a realidade da região, onde o túnel de onde foi amostrado costumava ser garimpo de turmalinas, e a as características de coloração do material amostrado (mineral preto oxidado).

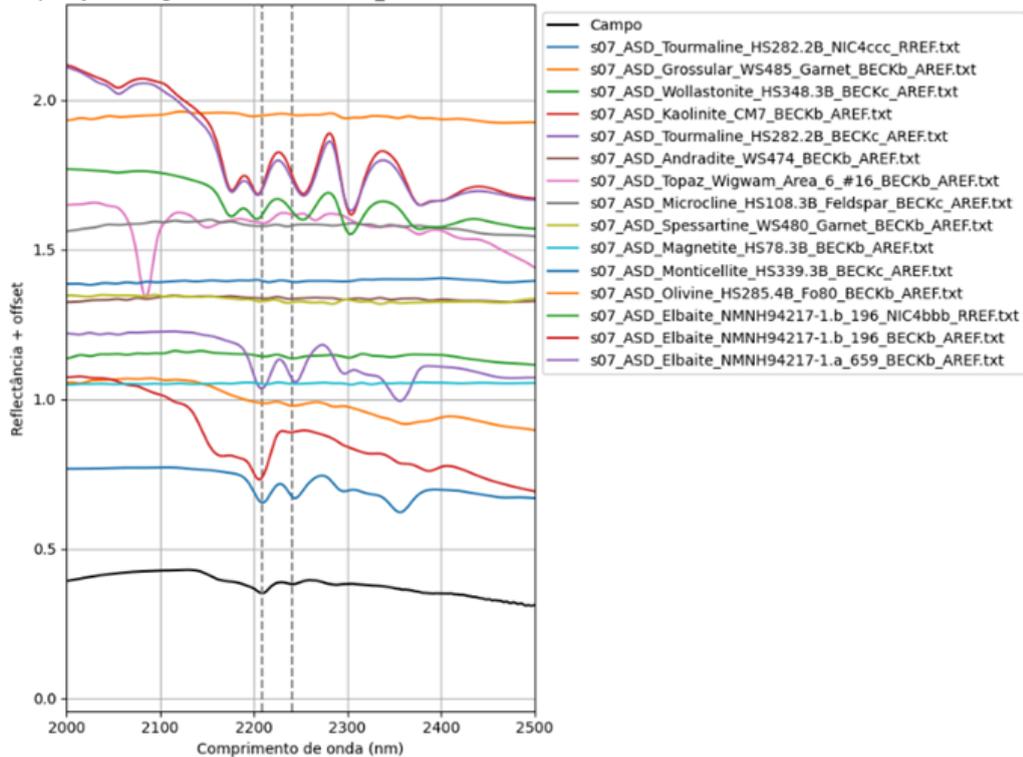
Os resultados podem ser verificados na Figura 46. Os dados de distância euclidiana usados para calcular os espectros semelhantes podem ser vistos na Tabela 7.

Figura 46 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 1, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.

Comparação da região 1100-2000 nm - 01\_Amostra-A1B.asd.sco.txt



Comparação da região 2000-2500 nm - 01\_Amostra-A1B.asd.sco.txt



Fonte: Autor.

Tabela 7 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 1.

Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 1.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Pitch_Limonite_GDS104_Cu_BECKu_AR	2.003306
s07_ASD_Muscovite_GDS111_Guatemala_NIC4aaa	2.054485
s07_ASD_Opal_WS732_BECKa_AREF	2.090899
s07_ASD_Goethite_MPCMA2-C_M-Crsgrad2_BECK	3.004497
s07_ASD_Kaolinite_KL502_(pxl)_BECKb_AREF	3.005375
s07_ASD_Sepiolite_SepSp-1.AcB_BECKb_AREF	3.014759
s07_ASD_Perthite_HS415.4B_ASDFRc_AREF	3.079986
s07_ASD_Sepiolite_SepSp-1_BECKb_AREF	3.232793
s07_ASD_Kaolinite_CM7_BECKb_AREF	3.316312
s07_ASD_Kaolinite_CM3_BECKa_AREF	3.40563
s07_ASD_Microcline_HS103.2B_Feldspar_ASDFRc	3.455667
s07_ASD_Halloysite_KLH503_BECKb_AREF	4.00081
s07_ASD_Stilbite_GDS8_Zeolite_BECKb_AREF	4.012365
s07_ASD_Halloysite_NMNH106236_BECKa_AREF	4.017627
s07_ASD_Sepiolite_SepNev-1.AcB_BECKa_AREF	4.021444
Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 1.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Tourmaline_HS282.2B_NIC4ccc_RREF	3.208876
s07_ASD_Grossular_WS485_Garnet_BECKb_AREF	4.107206
s07_ASD_Wollastonite_HS348.3B_BECKc_AREF	4.138652
s07_ASD_Kaolinite_CM7_BECKb_AREF	5.002975
s07_ASD_Tourmaline_HS282.2B_BECKc_AREF	5.020775
s07_ASD_Andradite_WS474_BECKb_AREF	5.055633
s07_ASD_Topaz_Wigwam_Area_6_#16_BECKb_AR	5.118258
s07_ASD_Microcline_HS108.3B_Feldspar_BECKc_A	5.442781
s07_ASD_Spessartine_WS480_Garnet_BECKb_ARE	6.003019
s07_ASD_Magnetite_HS78.3B_BECKb_AREF	6.038462
s07_ASD_Monticellite_HS339.3B_BECKc_AREF	11.001284
s07_ASD_Olivine_HS285.4B_Fo80_BECKb_AREF	16.018954
s07_ASD_Elbaite_NMNH94217-1.b_196_NIC4bbb_	17.000505
s07_ASD_Elbaite_NMNH94217-1.b_196_BECKb_AR	17.000808
s07_ASD_Elbaite_NMNH94217-1.a_659_BECKb_AR	17.004576

Fonte: Autor.

Para o espectro 2, na região de 1100 a 2000 alguns mínimos das funções acusaram similaridade para caulinita, que é descartada como sendo possível candidato, pois tem como feição diagnóstica uma absorção dupla, como pode ser notado na Figura 47. Um dos minerais indicados como possível é o espodumênio, que tem forma correlata com o espectro de campo, e coerente com a

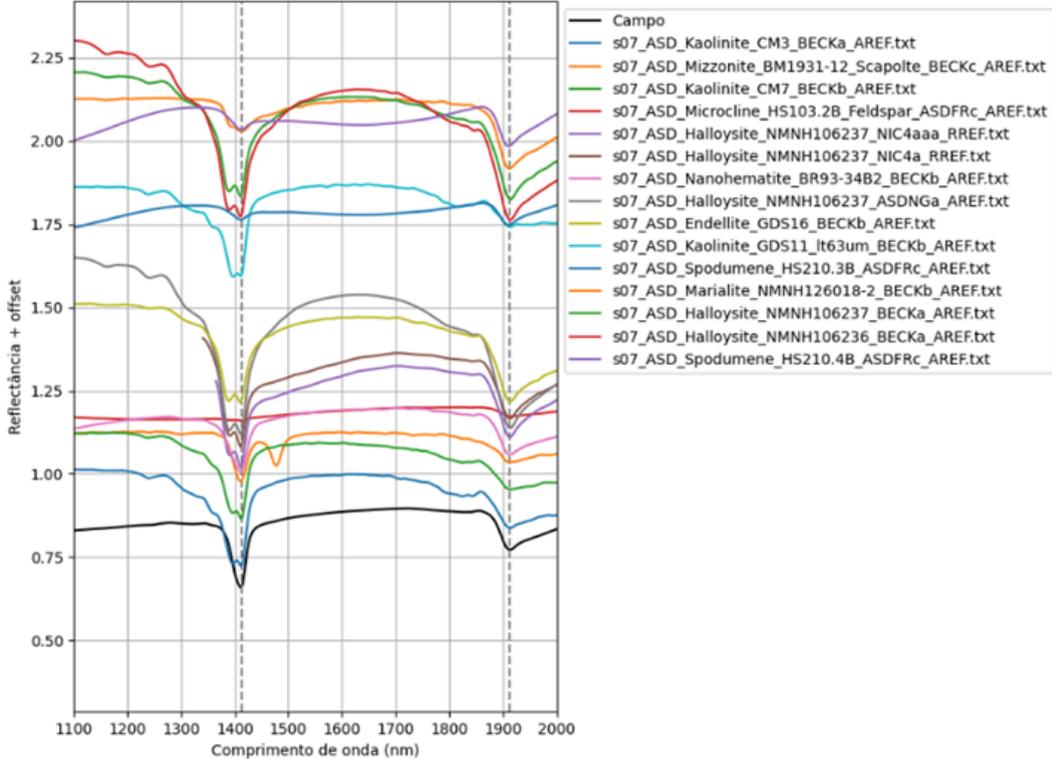
amostra, que foi coletada em zona de minerais que apesar de bem alterados, apresentavam forma prismática alongada.

Na região de 2000 nm a 2500 nm, os minerais similares encontrados são muscovita e lepidolita (mica que contém Li), contudo ambos os minerais apresentam uma boa adequação, sendo, portanto, necessário mais detalhamento espectral nos instrumentos utilizados para distinguir o comportamentos de ambos os minerais.

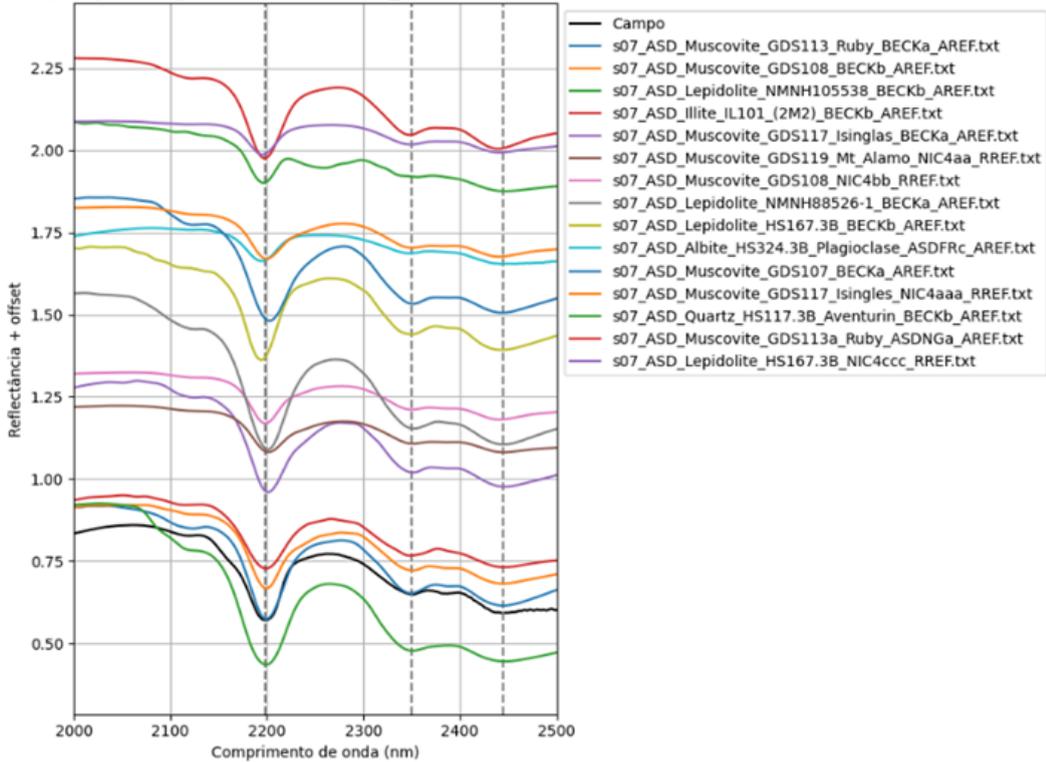
Os principais mínimos juntando ambas as regiões foram 1412 nm, 1913 nm, 2198 nm e 2350 nm e 2445 nm, bem próximos dos descritos como característico do espodumênio por Ding *et al.* (2023a e 2023b), que são 1412 nm, 1913 nm e 2205 nm, com absorções secundárias em 2352 nm e 2440 nm, os resultados podem ser vistos na Figura 47. As distâncias euclidianas podem ser vistas na Tabela 8.

Figura 47 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 2, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.

Comparação da região 1100-2000 nm - 02\_Amostra-A2B.asd.sco.txt



Comparação da região 2000-2500 nm - 02\_Amostra-A2B.asd.sco.txt



Fonte: Autor.

Tabela 8 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 2.

Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 2.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Kaolinite_CM3_BECKa_AREF	1.036377
s07_ASD_Mizzonite_BM1931-12_Scapolte_BE	1.07017
s07_ASD_Kaolinite_CM7_BECKb_AREF	1.100283
s07_ASD_Microcline_HS103.2B_Feldspar_AS	1.101243
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_NIC4aaa_	1.171064
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_NIC4a_R	1.222432
s07_ASD_Nanohematite_BR93-34B2_BECKb_	1.474435
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_ASDNGa_	1.490865
s07_ASD_Endellite_GDS16_BECKb_AREF	1.512059
s07_ASD_Kaolinite_GDS11_It63um_BECKb_A	2.002593
s07_ASD_Spodumene_HS210.3B_ASDFRc_A	2.007947
s07_ASD_Marialite_NMNH126018-2_BECKb_	2.015686
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_BECKa_A	2.038033
s07_ASD_Halloysite_NMNH106236_BECKa_A	2.120731
s07_ASD_Spodumene_HS210.4B_ASDFRc_A	2.14777
Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 2.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Muscovite_GDS113_Ruby_BECKa_	2.086753
s07_ASD_Muscovite_GDS108_BECKb_AREF	3.121186
s07_ASD_Lepidolite_NMNH105538_BECKb_A	3.291463
s07_ASD_Illite_IL101_(2M2)_BECKb_AREF	4.082302
s07_ASD_Muscovite_GDS117_Isinglas_BECK	5.01698
s07_ASD_Muscovite_GDS119_Mt_Alamo_NIC	5.121836
s07_ASD_Muscovite_GDS108_NIC4bb_RREF	5.144343
s07_ASD_Lepidolite_NMNH88526-1_BECKa_A	5.322072
s07_ASD_Lepidolite_HS167.3B_BECKb_AREF	6.112403
s07_ASD_Albite_HS324.3B_Plagioclase_ASDF	7.002765
s07_ASD_Muscovite_GDS107_BECKa_AREF	7.043833
s07_ASD_Muscovite_GDS117_Isingles_NIC4a	7.149208
s07_ASD_Quartz_HS117.3B_Aventurin_BECK	8.000642
s07_ASD_Muscovite_GDS113a_Ruby_ASDNG	8.005695
s07_ASD_Lepidolite_HS167.3B_NIC4ccc_RRE	8.010942

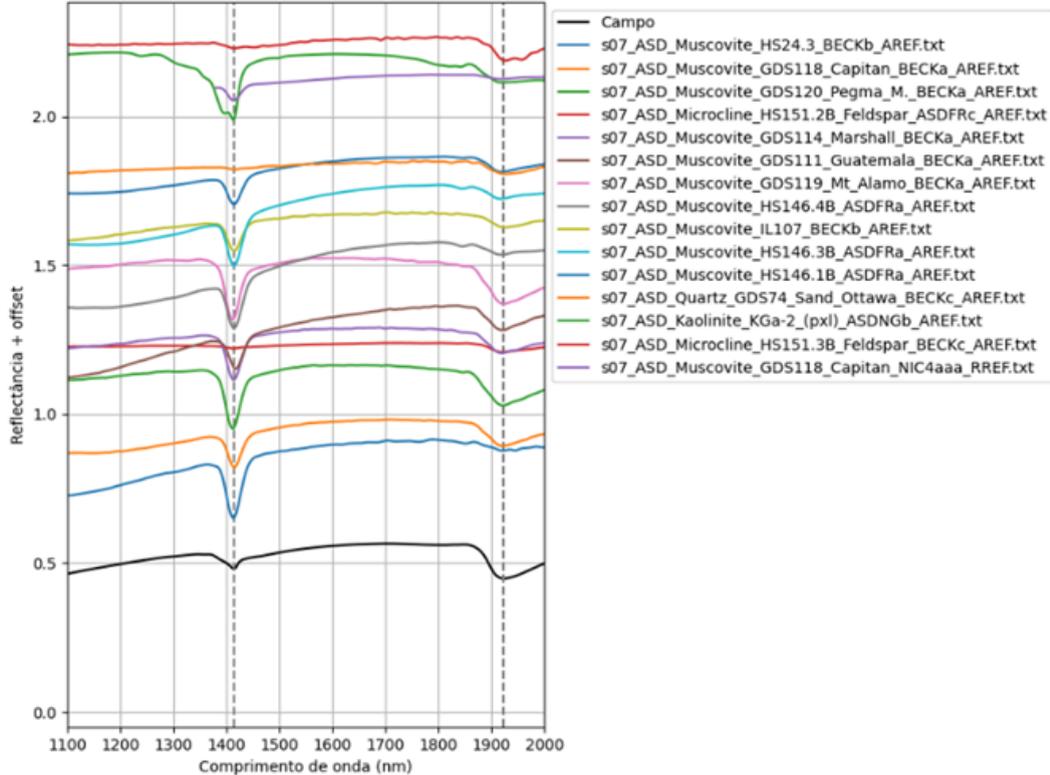
Fonte: Autor.

A amostra 3 apresenta feições características de muscovita e caulinita na região 1100 nm a 2000 nm e mais características de caulinita na região 2000 nm a 2500 nm, apesar de não apresentar uma dupla absorção bem marcada, a concavidade a absorção apresenta assimetria lembrando a forma caulinita. Esta

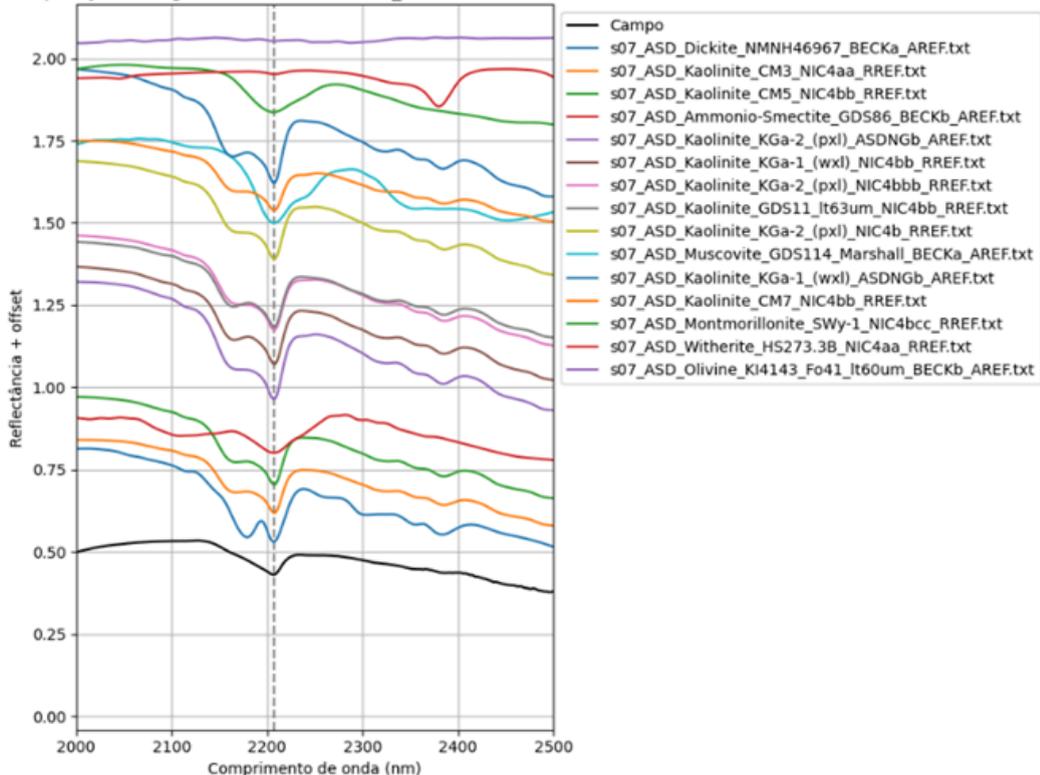
interpretação faz sentido com os dados de campo, uma vez que se trata de solo residual acima do pegmatito escavado em forma de túnel na área 1. Os espectros podem ser vistos na Figura 48, e as distâncias euclidianas na Tabela 9.

Figura 48 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm (acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 3, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.

Comparação da região 1100-2000 nm - 03\_Amostra-A3B.asd.sco.txt



Comparação da região 2000-2500 nm - 03\_Amostra-A3B.asd.sco.txt



Fonte: Autor.

Tabela 9 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 3.

Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 3.	
<b>Espectro</b>	<b>Distância Euclidiana</b>
s07_ASD_Muscovite_HS24.3_BECKb_AREF	1.331655
s07_ASD_Muscovite_GDS118_Capitan_BECKa_A	2.039556
s07_ASD_Muscovite_GDS120_Pegma_M._BECK	2.288279
s07_ASD_Microcline_HS151.2B_Feldspar_ASDF	3.088669
s07_ASD_Muscovite_GDS114_Marshall_BECKa_	3.146126
s07_ASD_Muscovite_GDS111_Guatemala_BECK	3.234888
s07_ASD_Muscovite_GDS119_Mt_Alamo_BECKa	4.01696
s07_ASD_Muscovite_HS146.4B_ASDFRa_AREF	4.019134
s07_ASD_Muscovite_IL107_BECKb_AREF	4.026946
s07_ASD_Muscovite_HS146.3B_ASDFRa_AREF	4.027599
s07_ASD_Muscovite_HS146.1B_ASDFRa_AREF	4.133402
s07_ASD_Quartz_GDS74_Sand_Ottawa_BECKc_	5.01321
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_ASDNGb_AREF	5.03806
s07_ASD_Microcline_HS151.3B_Feldspar_BECKc	5.073362
s07_ASD_Muscovite_GDS118_Capitan_NIC4aaa	5.075894
Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 3.	
<b>Espectro</b>	<b>Distância Euclidiana</b>
s07_ASD_Dickite_NMNH46967_BECKa_AREF	0.000277
s07_ASD_Kaolinite_CM3_NIC4aa_RREF	0.011894
s07_ASD_Kaolinite_CM5_NIC4bb_RREF	0.025882
s07_ASD_Ammonio-Smectite_GDS86_BECKb_A	0.029227
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_ASDNGb_AREF	0.033327
s07_ASD_Kaolinite_KGa-1_(wxi)_NIC4bb_RREF	0.040563
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_NIC4bbb_RREF	0.04429
s07_ASD_Kaolinite_GDS11_It63um_NIC4bb_RRE	0.045599
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_NIC4b_RREF	0.060523
s07_ASD_Muscovite_GDS114_Marshall_BECKa_	0.070246
s07_ASD_Kaolinite_KGa-1_(wxi)_ASDNGb_AREF	0.091238
s07_ASD_Kaolinite_CM7_NIC4bb_RREF	0.091901
s07_ASD_Montmorillonite_SWy-1_NIC4bcc_RRE	0.106702
s07_ASD_Witherite_HS273.3B_NIC4aa_RREF	0.122267
s07_ASD_Olivine_KI4143_Fo41_It60um_BECKb	0.122507

Fonte: Autor.

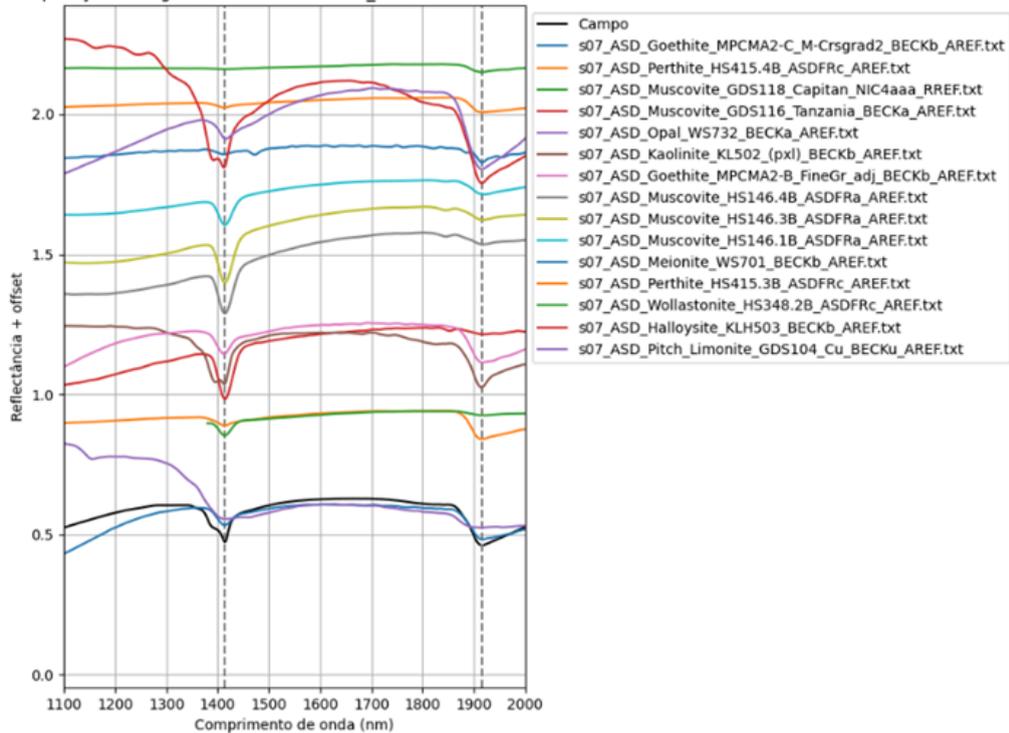
A amostra 4, conforme a amostra 3, apresenta espectros de concavidade assimétrica nas regiões de 1100 a 2000 e 2000 a 2500. Apesar desta assimetria estar melhor marcada na amostra 4 do que na amostra 3, ainda não é perfeitamente definida, conforme poderá ser visto na amostra 6. A amostra está

relacionada a solo saprolítico entre túnel e solo residual, e sugere que quanto mais proximal da rocha pegmatítica, mais caulínica apresenta-se a assinatura espectral da amostra.

Contudo no túnel da área 1, a amostra representativa do pegmatito ser a amostra 2, que não apresentou assinatura tão caulínica, o que pode ser explicado como uma amostra preferencial da zona mineralizada, que apresentou assinatura mais relacionadas ao espodumênio. Os resultados podem ser visualizados na Figura 49 e Tabela 10.

Figura 49 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm (abaixo) da amostra 4, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.

Comparação da região 1100-2000 nm - 04\_Amostra-A4B.asd.sco.txt



Comparação da região 2000-2500 nm - 04\_Amostra-A4B.asd.sco.txt

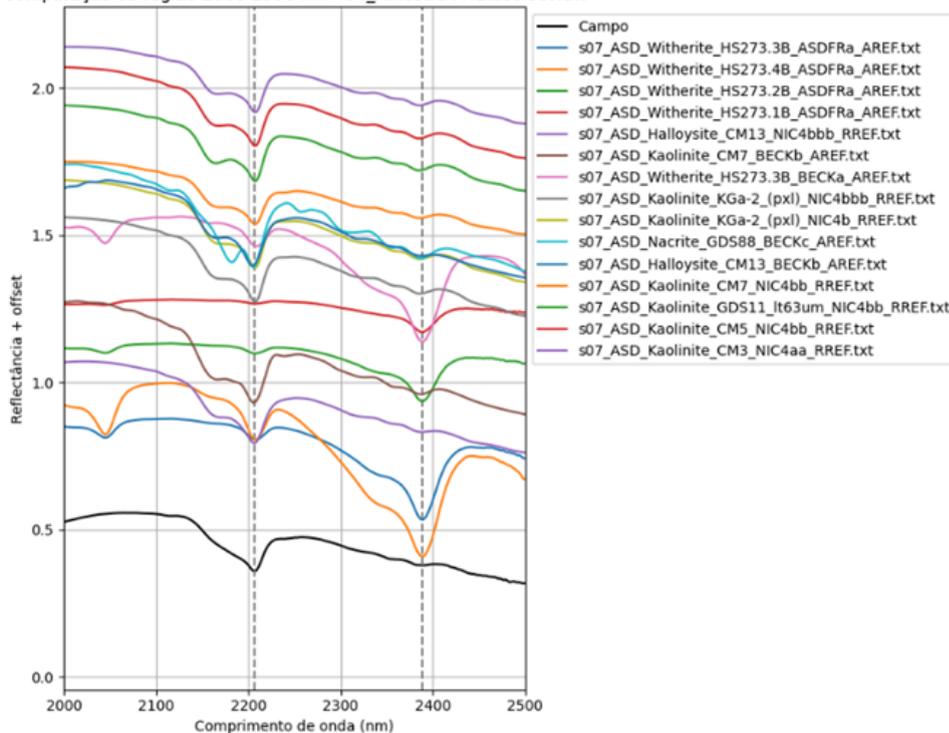


Tabela 10 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 4.

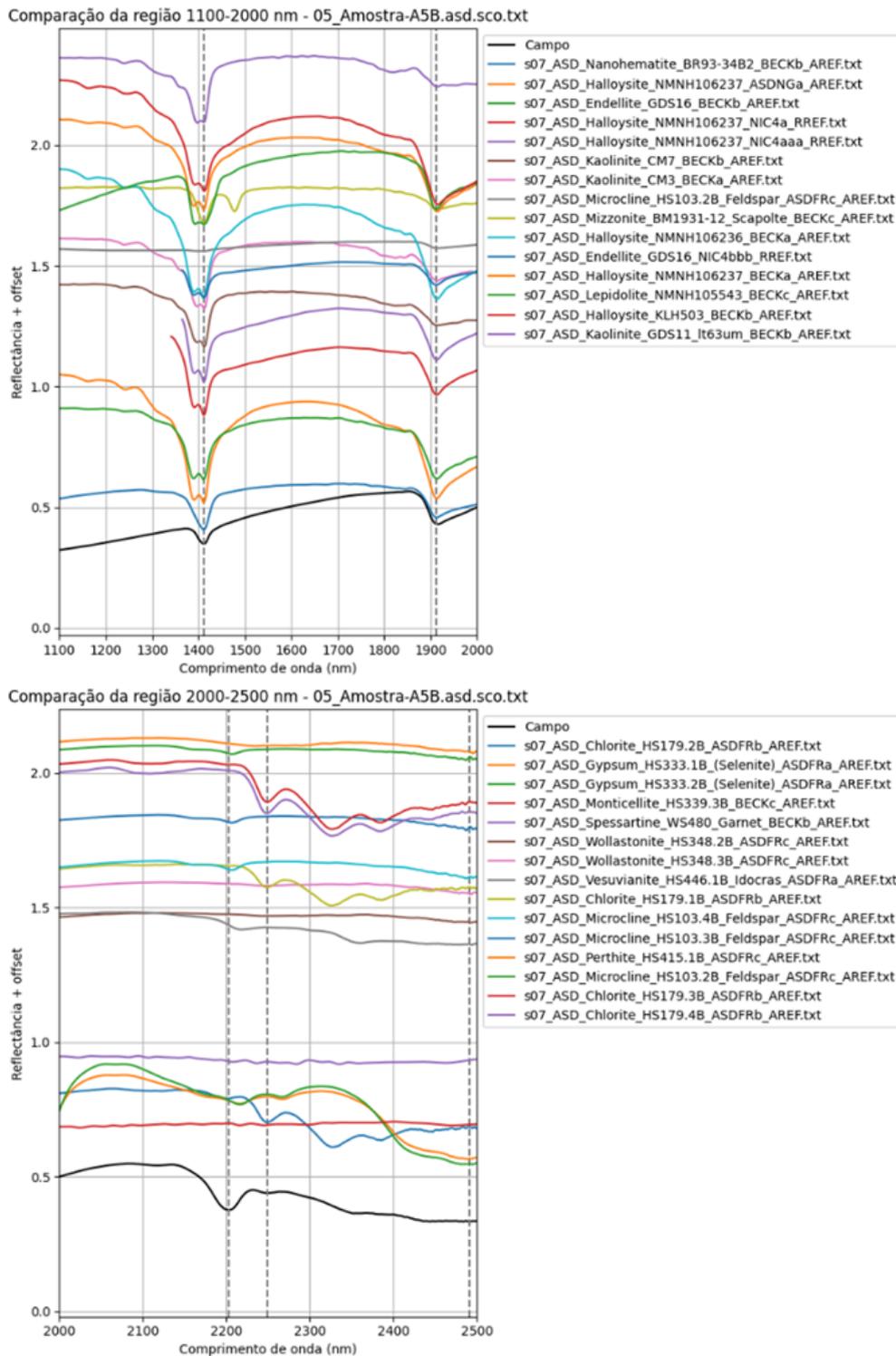
Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 4.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Goethite_MPCMA2-C_M-Crsgrad2_BE	0.119321
s07_ASD_Perthite_HS415.4B_ASDFRc_AREF	0.394338
s07_ASD_Muscovite_GDS118_Capitan_NIC4aaa	1.092864
s07_ASD_Muscovite_GDS116_Tanzania_BECKa	1.171104
s07_ASD_Opal_WS732_BECKa_AREF	1.509936
s07_ASD_Kaolinite_KL502_(pxl)_BECKb_AREF	2.001324
s07_ASD_Goethite_MPCMA2-B_FineGr_adj_BE	2.001545
s07_ASD_Muscovite_HS146.4B_ASDFRa_AREF	2.034329
s07_ASD_Muscovite_HS146.3B_ASDFRa_AREF	2.042004
s07_ASD_Muscovite_HS146.1B_ASDFRa_AREF	2.147249
s07_ASD_Meionite_WS701_BECKb_AREF	2.286335
s07_ASD_Perthite_HS415.3B_ASDFRc_AREF	2.376035
s07_ASD_Wollastonite_HS348.2B_ASDFRc_AR	2.425926
s07_ASD_Halloysite_KLH503_BECKb_AREF	3.006736
s07_ASD_Pitch_Limonite_GDS104_Cu_BECKu	3.013204
Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 4.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Witherite_HS273.3B_ASDFRa_AREF	1.114495
s07_ASD_Witherite_HS273.4B_ASDFRa_AREF	1.199751
s07_ASD_Witherite_HS273.2B_ASDFRa_AREF	1.350185
s07_ASD_Witherite_HS273.1B_ASDFRa_AREF	1.515153
s07_ASD_Halloysite_CM13_NIC4bbb_RREF	2.003173
s07_ASD_Kaolinite_CM7_BECKb_AREF	3.000453
s07_ASD_Witherite_HS273.3B_BECKa_AREF	3.042339
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_NIC4bbb_RREF	3.11792
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_NIC4b_RREF	3.134909
s07_ASD_Nacrite_GDS88_BECKc_AREF	4.000741
s07_ASD_Halloysite_CM13_BECKb_AREF	4.001789
s07_ASD_Kaolinite_CM7_NIC4bb_RREF	4.020858
s07_ASD_Kaolinite_GDS11_It63um_NIC4bb_RR	4.025714
s07_ASD_Kaolinite_CM5_NIC4bb_RREF	4.045531
s07_ASD_Kaolinite_CM3_NIC4aa_RREF	4.059697

Fonte: Autor.

A amostra 5 está relacionada ao xisto em contato abrupto com pegmatito da área 1, e na região entre 1100 e 2000 apresenta feições pouco características, e entre 2000 e 2500 apresenta feições que lembram o espectro da clorita, o que é possível, pois clorita pode estar relacionado a alteração da biotita, comumente

relacionada a xistos, e condizente com a cor escura da amostra coletada. Contudo, a clorita costuma apresentar feição característica ~2350, relativo a presença de MgOH (Clark *et al.*, 2007; Cohen, 2011). Os resultados podem ser vistos na Figura 50 e Tabela 11

Figura 50 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm(abaixo) da amostra 5, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.



Fonte: Autor.

Tabela 11 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 5.

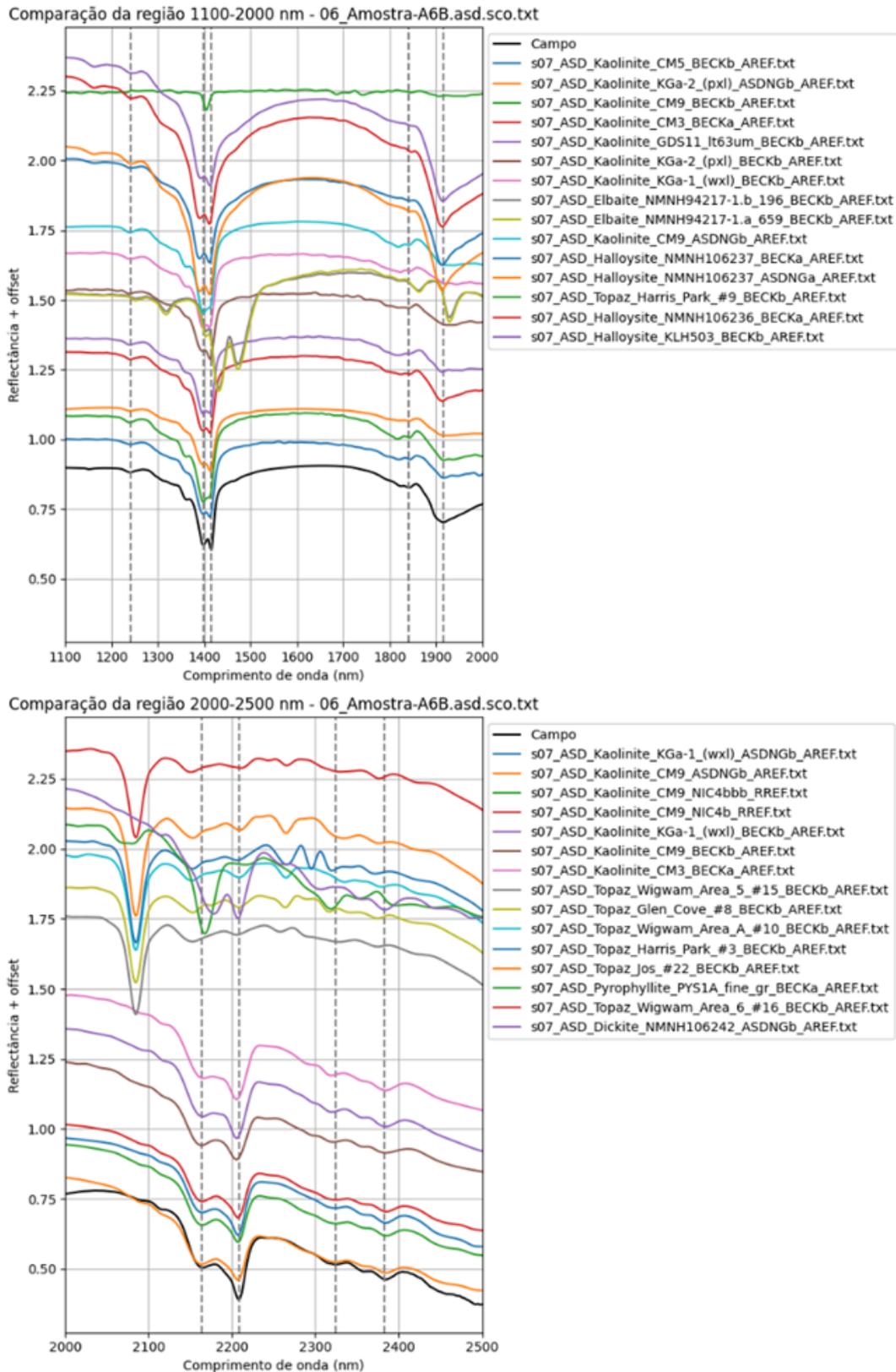
Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 5.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Nanohematite_BR93-34B2_BECKb_AREF	1.072835
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_ASDNGa_AREF	1.093023
s07_ASD_Endellite_GDS16_BECKb_AREF	1.112701
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_NIC4a_RREF	1.144445
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_NIC4aaa_RREF	1.195633
s07_ASD_Kaolinite_CM7_BECKb_AREF	1.242279
s07_ASD_Kaolinite_CM3_BECKa_AREF	1.321448
s07_ASD_Microcline_HS103.2B_Feldspar_ASDFRc_	1.469044
s07_ASD_Mizzonite_BM1931-12_Scapolte_BECKc_	1.494001
s07_ASD_Halloysite_NMNH106236_BECKa_AREF	2.002515
s07_ASD_Endellite_GDS16_NIC4bbb_RREF	2.009154
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_BECKa_AREF	2.021576
s07_ASD_Lepidolite_NMNH105543_BECKc_AREF	2.023692
s07_ASD_Halloysite_KLH503_BECKb_AREF	2.062872
s07_ASD_Kaolinite_GDS11_It63um_BECKb_AREF	2.077169
Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 5.	
Espectro	Distância Euclidiana
s07_ASD_Chlorite_HS179.2B_ASDFRb_AREF	7.18685
s07_ASD_Gypsum_HS333.1B_(Selenite)_ASDFRa_	32.002482
s07_ASD_Gypsum_HS333.2B_(Selenite)_ASDFRa_	34.001351
s07_ASD_Monticellite_HS339.3B_BECKc_AREF	38.003064
s07_ASD_Spessartine_WS480_Garnet_BECKb_AR	46.000412
s07_ASD_Wollastonite_HS348.2B_ASDFRc_AREF	48.08292
s07_ASD_Wollastonite_HS348.3B_ASDFRc_AREF	48.083067
s07_ASD_Vesuvianite_HS446.1B_Idocras_ASDFRa_	49.011218
s07_ASD_Chlorite_HS179.1B_ASDFRb_AREF	49.047584
s07_ASD_Microcline_HS103.4B_Feldspar_ASDFRc_	50.021461
s07_ASD_Microcline_HS103.3B_Feldspar_ASDFRc_	50.03567
s07_ASD_Perthite_HS415.1B_ASDFRc_AREF	50.048391
s07_ASD_Microcline_HS103.2B_Feldspar_ASDFRc_	50.048603
s07_ASD_Chlorite_HS179.3B_ASDFRb_AREF	51.003849
s07_ASD_Chlorite_HS179.4B_ASDFRb_AREF	51.004032

Fonte: Autor.

A amostra 6 está relacionada ao pegmatito exposto na área 2, e tanto na região de 1100 a 2000 quanto na região de 2000 a 2500 apresentam feições de absorção dupla, muito características da caulinita, demonstrando que este mineral

pode ser um vetor usado para mapeamento do mesmo. Os dados de absorção podem ser vistos na Figura 51 e os dados de distâncias euclidianas vistos na Tabela 12.

Figura 51 - Regiões espectrais 1100 nm a 2000 nm(acima) e 2000 nm a 2500 nm(abaixo) da amostra 6, linhas verticais com os mínimos dos espectros de campo mapeados.



Fonte: Autor.

Tabela 12 - Distância euclidiana calculadas entre amostras de campo e biblioteca espectral na região 1100 nm a 2000 nm e 2000 nm a 2500 nm da amostra 6.

Tabela de Similaridades - Região 1100-2000 nm para Amostra 6.	
<b>Espectro</b>	<b>Distância Euclidiana</b>
s07_ASD_Kaolinite_CM5_BECKb_AREF	7.001809
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_ASDNGb_AREF	19.064334
s07_ASD_Kaolinite_CM9_BECKb_AREF	19.277286
s07_ASD_Kaolinite_CM3_BECKa_AREF	24.005479
s07_ASD_Kaolinite_GDS11_It63um_BECKb_AREF	31.001762
s07_ASD_Kaolinite_KGa-2_(pxl)_BECKb_AREF	33.003736
s07_ASD_Kaolinite_KGa-1_(wxi)_BECKb_AREF	52.144464
s07_ASD_Elbaite_NMNH94217-1.b_196_BECKb_ARE	63.001908
s07_ASD_Elbaite_NMNH94217-1.a_659_BECKb_ARE	63.008627
s07_ASD_Kaolinite_CM9_ASDNGb_AREF	63.179329
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_BECKa_AREF	87.009652
s07_ASD_Halloysite_NMNH106237_ASDNGa_AREF	88.04154
s07_ASD_Topaz_Harris_Park_#9_BECKb_AREF	89.013519
s07_ASD_Halloysite_NMNH106236_BECKa_AREF	89.040864
s07_ASD_Halloysite_KLH503_BECKb_AREF	89.070528

Tabela de Similaridades - Região 2000-2500 nm para Amostra 6.	
<b>Espectro</b>	<b>Distância Euclidiana</b>
s07_ASD_Kaolinite_KGa-1_(wxi)_ASDNGb_AREF	2.212347
s07_ASD_Kaolinite_CM9_ASDNGb_AREF	3.23132
s07_ASD_Kaolinite_CM9_NIC4bbb_RREF	4.169616
s07_ASD_Kaolinite_CM9_NIC4b_RREF	4.190095
s07_ASD_Kaolinite_KGa-1_(wxi)_BECKb_AREF	8.003554
s07_ASD_Kaolinite_CM9_BECKb_AREF	8.030035
s07_ASD_Kaolinite_CM3_BECKa_AREF	11.000532
s07_ASD_Topaz_Wigwam_Area_5_#15_BECKb_AREF	26.0926
s07_ASD_Topaz_Glen_Cove_#8_BECKb_AREF	26.526535
s07_ASD_Topaz_Wigwam_Area_A_#10_BECKb_ARE	27.540136
s07_ASD_Topaz_Harris_Park_#3_BECKb_AREF	28.076207
s07_ASD_Topaz_Jos_#22_BECKb_AREF	28.128949
s07_ASD_Pyrophyllite_PYS1A_fine_gr_BECKa_AREF	30.006068
s07_ASD_Topaz_Wigwam_Area_6_#16_BECKb_AREF	30.067585
s07_ASD_Dickite_NMNH106242_ASDNGb_AREF	33.191534

Fonte: Autor.

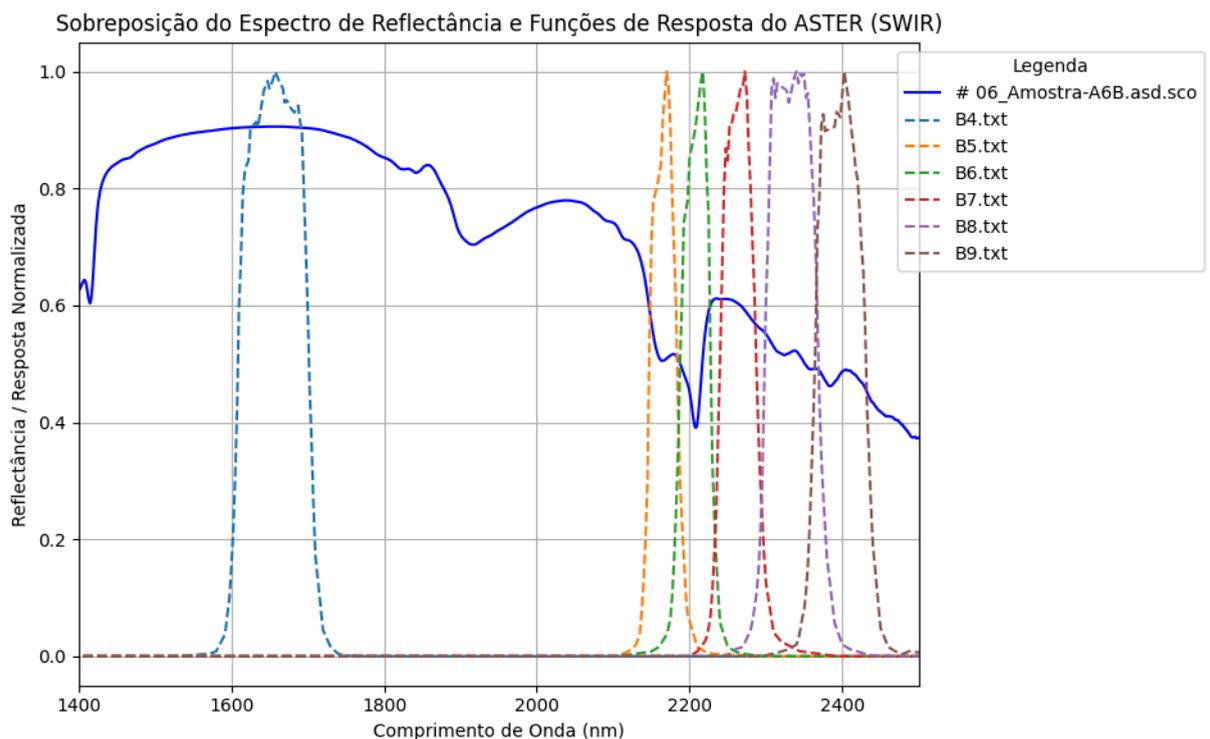
Foi testada a distância angular pela similaridade do cosseno, conforme descrito na equação 5, para esta etapa, contudo, obteve-se resultados espúrios, provavelmente pelo excesso de dados de reflectância, sugerindo espectros como

similares contudo sendo estes totalmente divergentes com o espectro de campo. Portanto a distância euclidiana conforme demonstrados com outros espectros.

#### 4.5 Reamostragem espectral

Para que a discriminação dos espectros por sensoriamento remoto seja possível, é preciso que o sensor espectral tenha resolução nas regiões em que os espectros se diferenciam, na Figura 52 é possível notar como exemplo da amostra 6, é possível notar que os espectros estudados diferenciam-se na zona do SWIR (banda 4 a 9) do sensor ASTER.

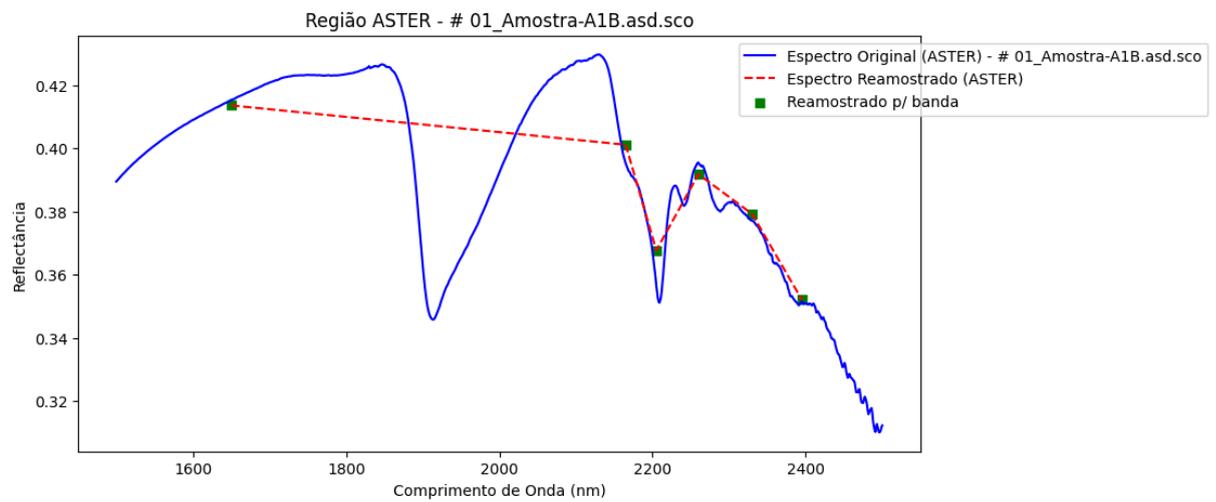
Figura 52 - Sobreposição das funções resposta das bandas 4 a 9 com o espectro da amostra 6.



Fonte: Autor.

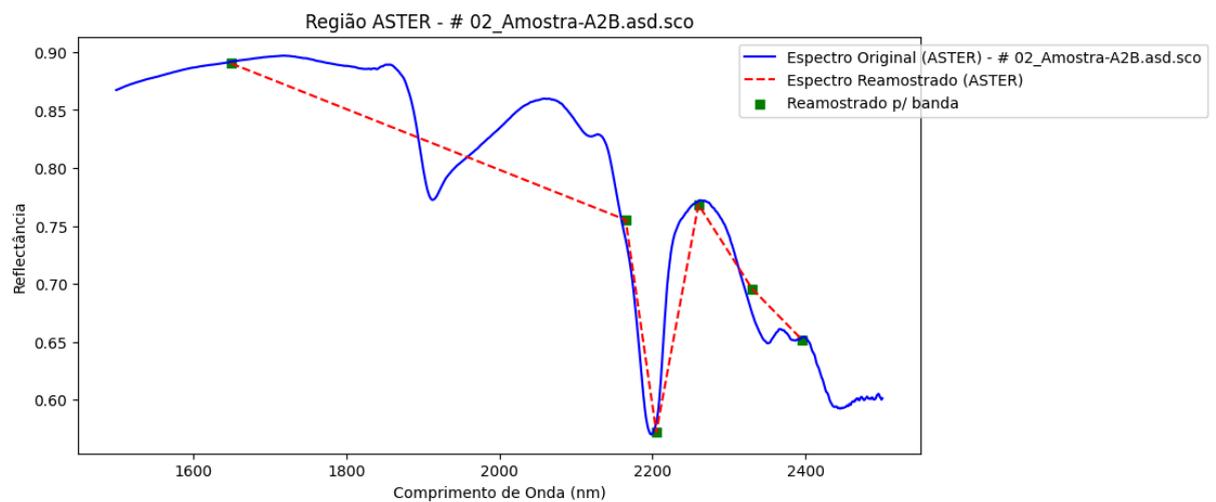
Aplicando a equação proposta por Meer *et al.* (2002) descrita no item 3.7.1, é possível verificar os espectros reamostrados para resolução espectral do sensor ASTER nas Figuras 53 à 58.

Figura 53 - Espectro da amostra do 1 SWIR reamostrado para o ASTER.



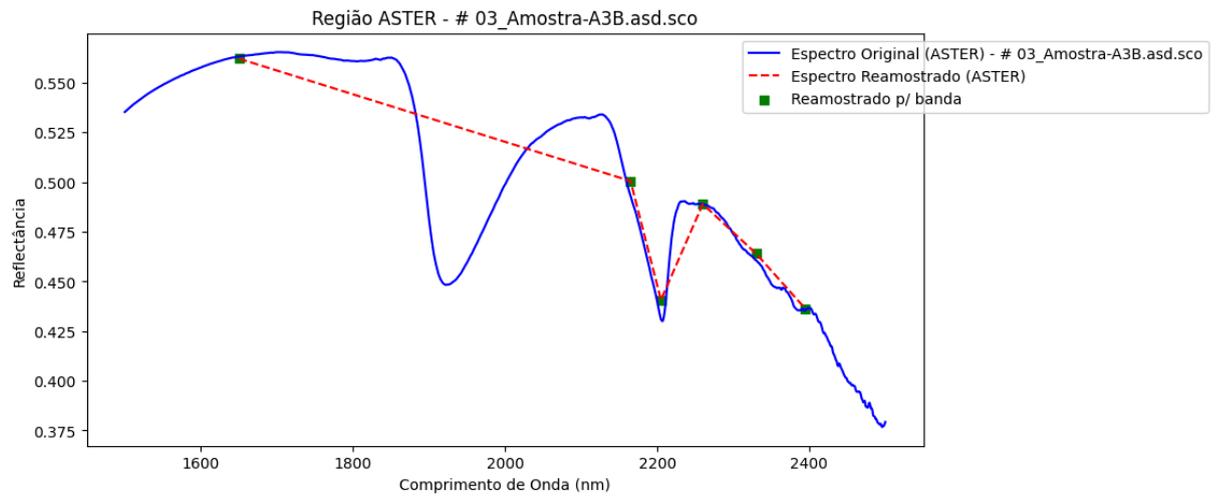
Fonte: Autor.

Figura 54 - Espectro da amostra 2 SWIR re-amostrado para o ASTER.



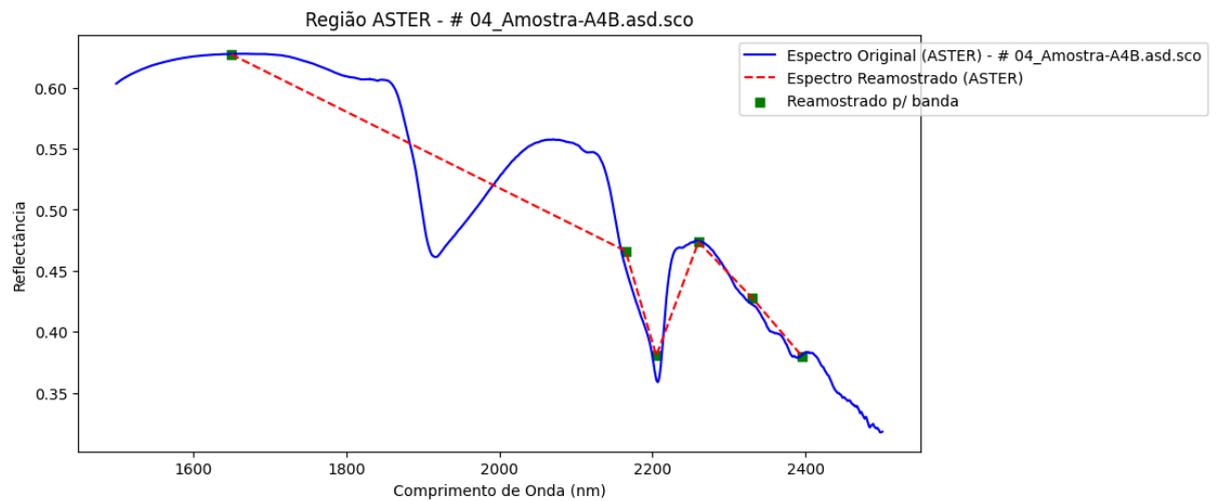
Fonte: Autor.

Figura 55 - Espectro da amostra 3 SWIR reamostrado para o ASTER.



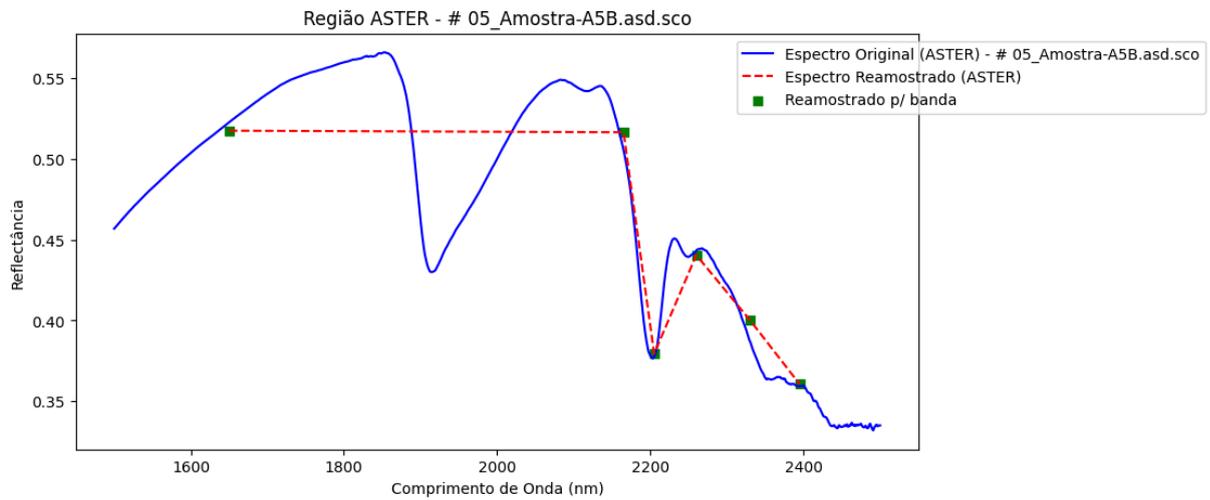
Fonte: Autor.

Figura 56 - Espectro da amostra 4 SWIR reamostrado para o ASTER.



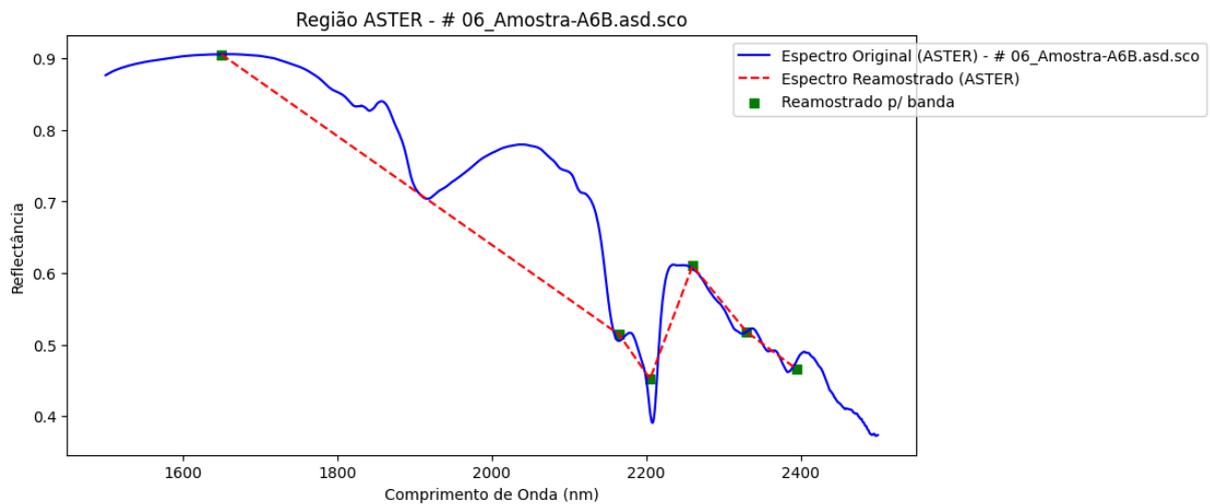
Fonte: Autor.

Figura 57 - Espectro da amostra 5 SWIR reamostrado para o ASTER.



Fonte: Autor.

Figura 58 - Espectro da amostra 6 SWIR reamostrado para o ASTER.

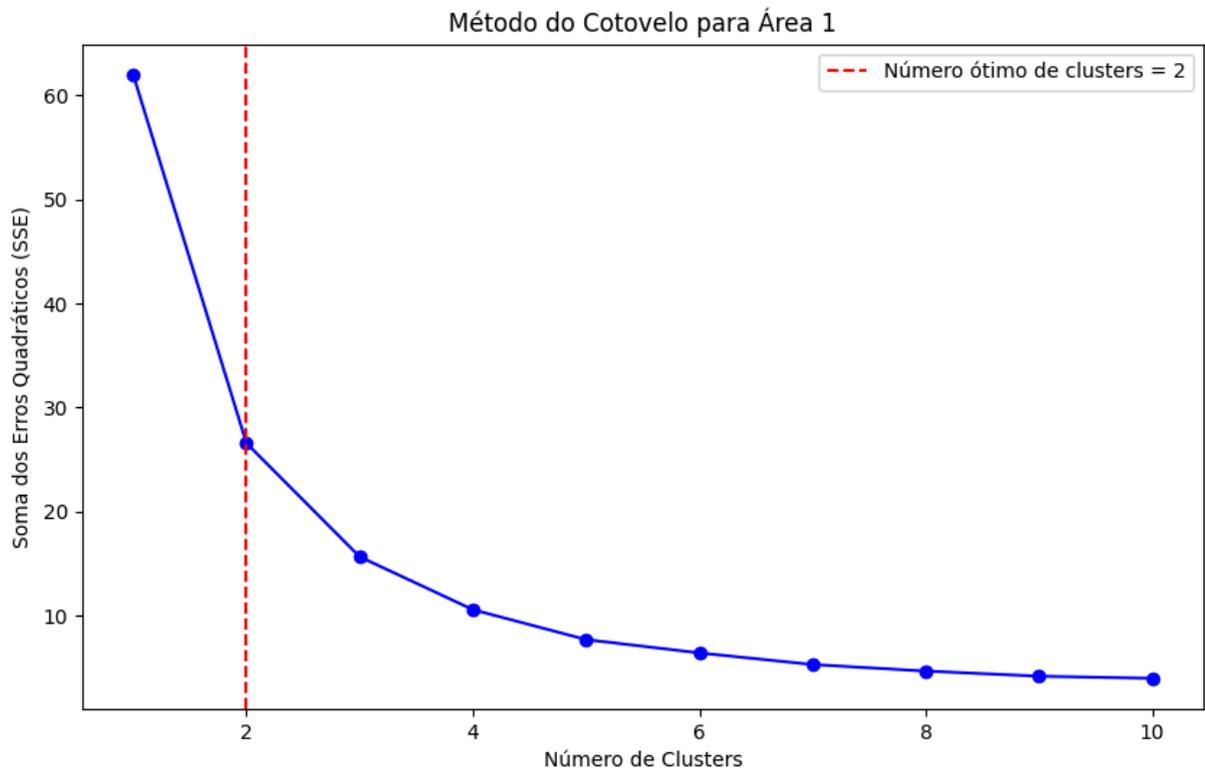


Fonte: Autor.

#### 4.6 Clusterização e classificação espectral

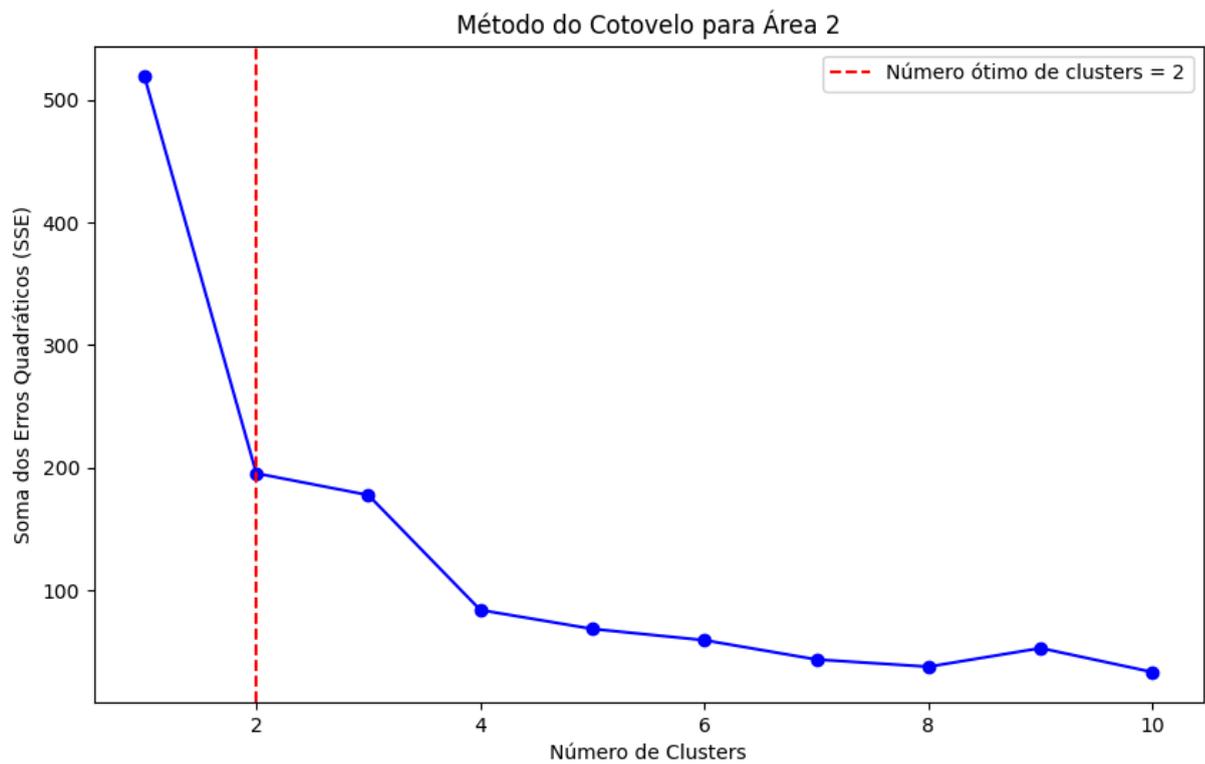
Como método sugestivo, conforme mencionado na metodologia, foram calculados os erros intracluster (ou intraclasses) para vários números de clusters (ou classes) na imagem, e sugeriu que para ambas áreas estudadas, não haveria grande ganho de detalhamento a partir de 2 clusters, conforme pode ser visto nas Figuras 59 e 60.

Figura 59 - Método do cotovelo para análise de erros entre as classes da imagem 1.



Fonte: Autor.

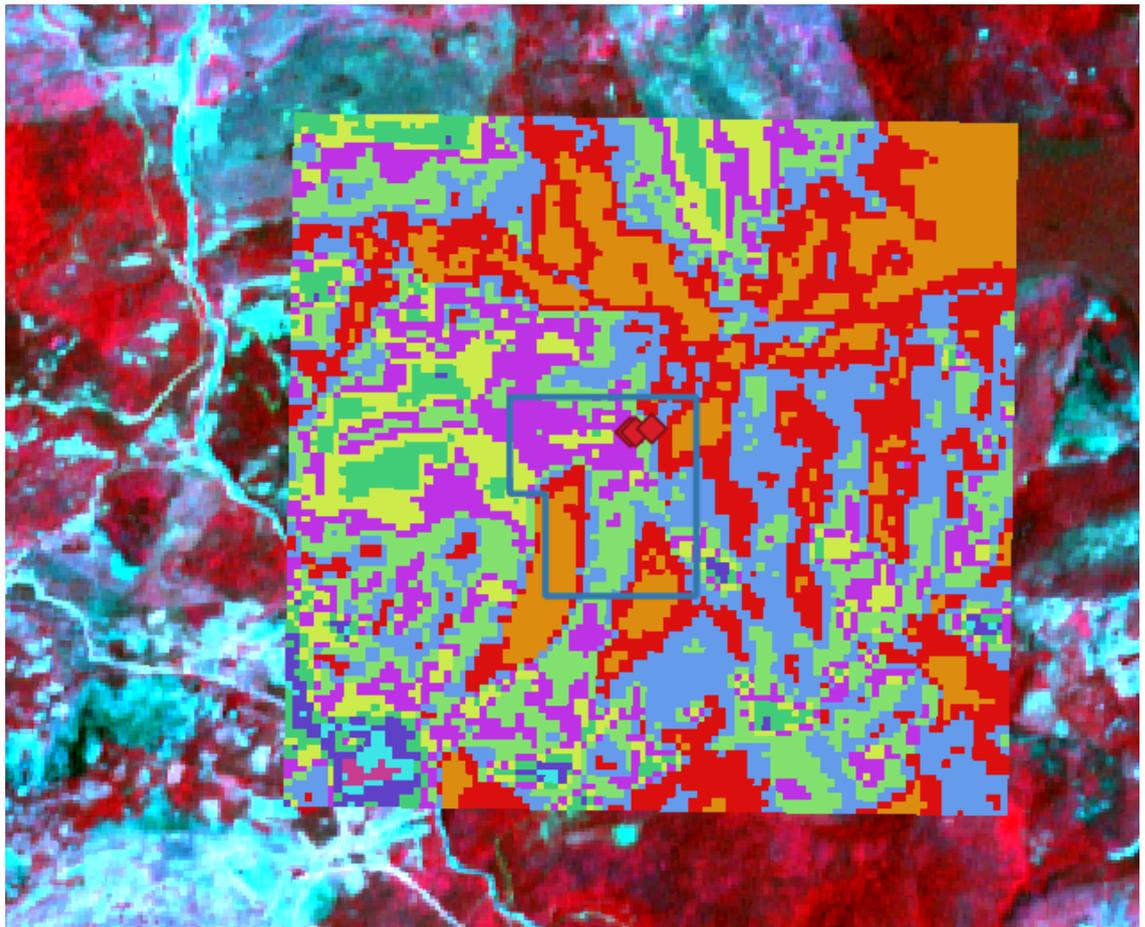
Figura 60 - Método do cotovelo para análise de erros entre as classes da imagem 2.



Fonte: Autor.

Contudo, como é somente sugestivo, e requer pouca capacidade computacional além dos dados serem analisados um a um posteriormente, para ambas imagens, vinculou-se 10 clusters como parâmetros para o kmeans, uma recorte da cena da área 1 classificada pode ser visto na Figura 61.

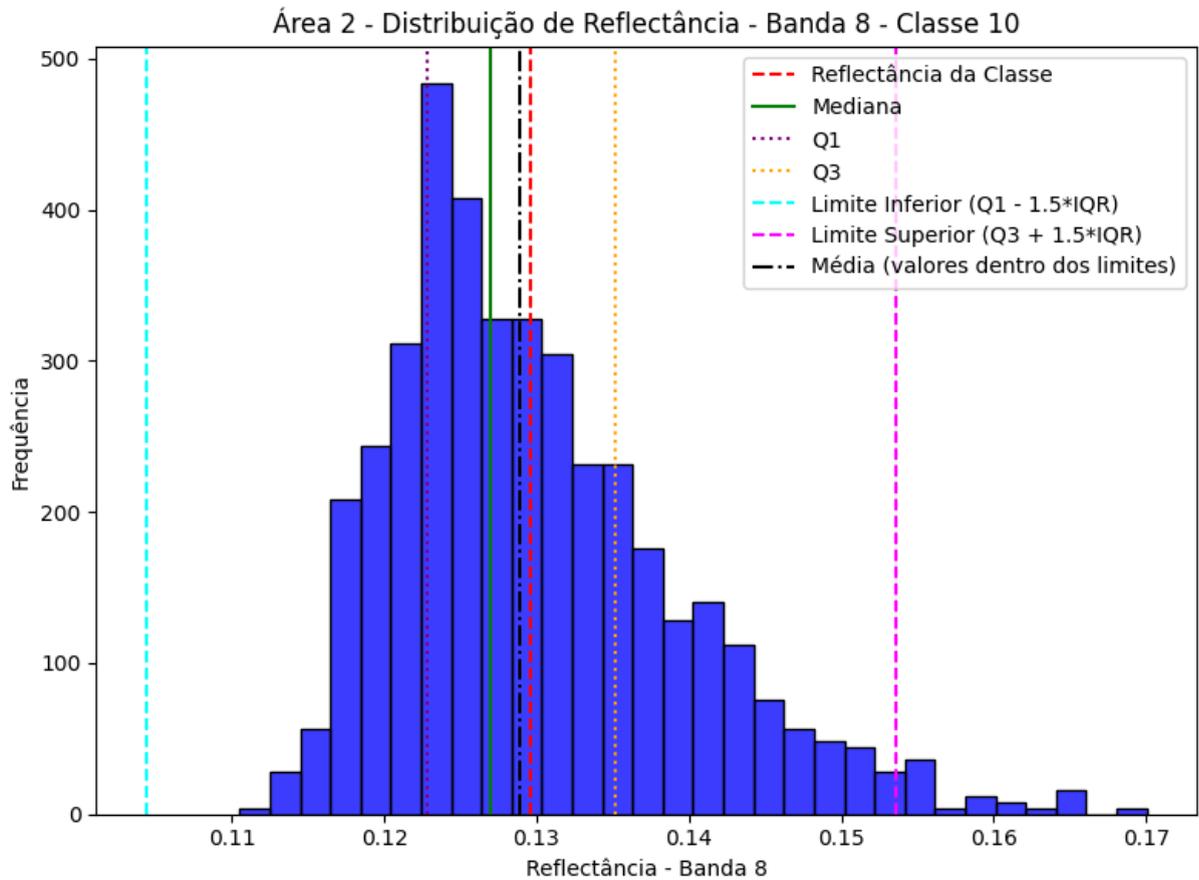
Figura 61 - Panorama geral da cena ASTER em composição colorida falsa cor RGB 321, e vista de recorte da área 1 classificada em 10 classes.



Fonte: Autor.

Os espectros médios representativos das classes foram recalculados utilizando 1,5 vezes a distância interquartil como limites para desconsiderar os valores de outliers, resultado da metodologia pode ser visto na Figura 62.

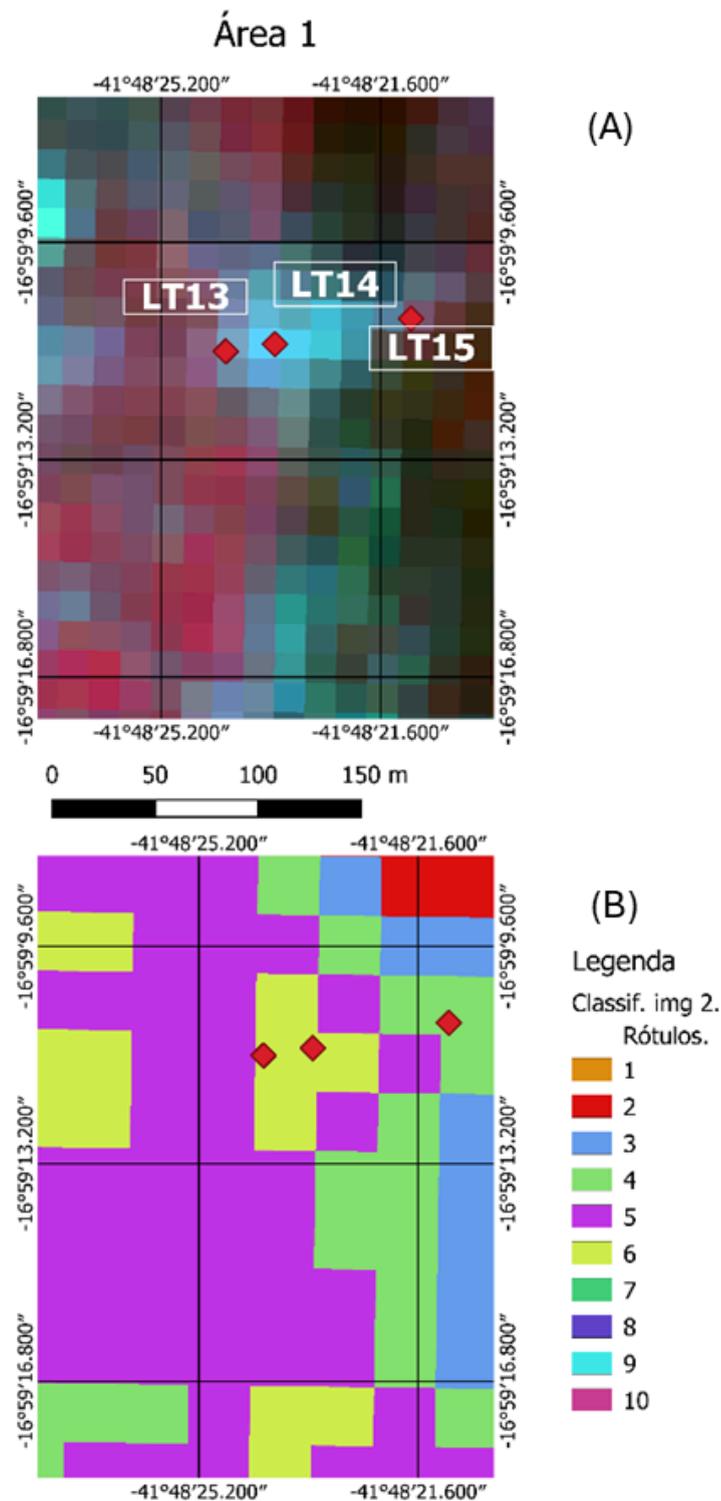
Figura 62 - Demonstração da aplicação do método de filtragem para média mais representativa em vermelho reflectância da classe e em preto nova média calculada.



Fonte: Autor.

Para a cena ASTER estudada na área 1 é possível notar que as amostras LT13 e LT14 possuem menor cobertura vegetal na cena estudada e estão relacionadas à classe 6, resultados podem ser vistos na Figura 63.

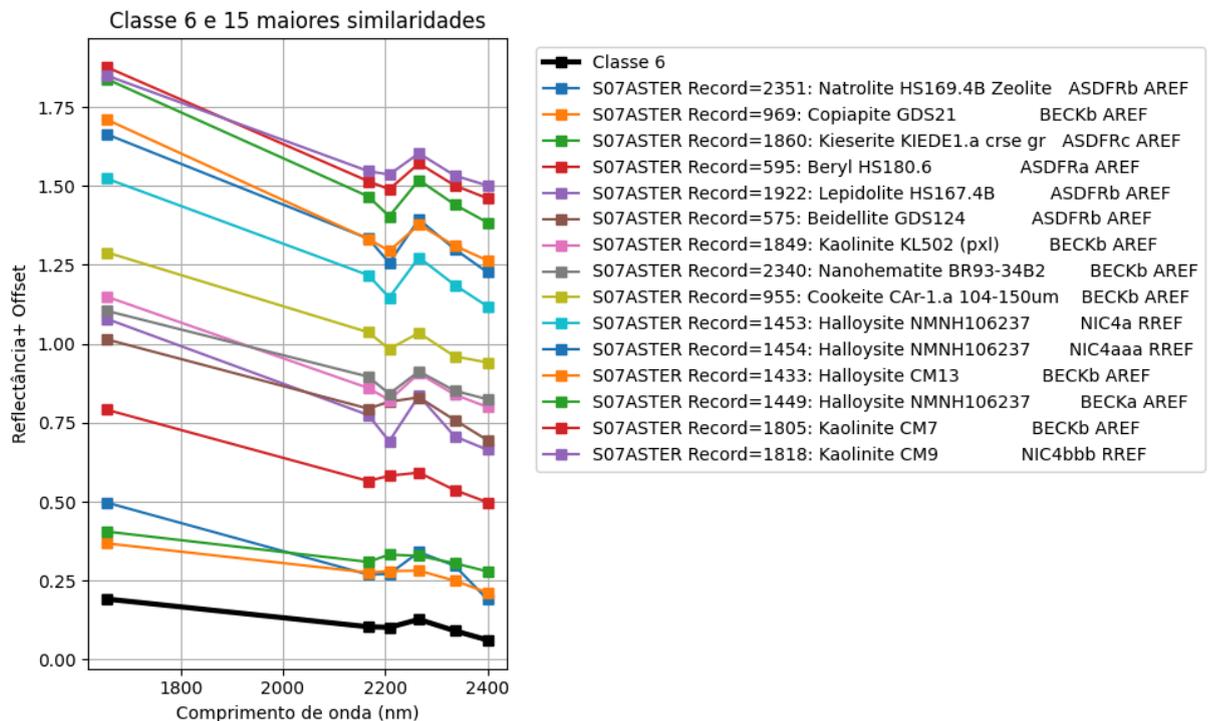
Figura 63 - Recorte da cena ASTER da área 1 de onde as amostras foram coletadas, em composição colorida falsa cor RGB 321(A), e sua correspondente classificada (B) (EPSG: 4326).



Fonte: Autor.

A classe 6 teve seu espectro relacionado com similaridade angular pelo cosseno com espectros da biblioteca espectral de minerais da USGS para as bandas 4 a 9 do ASTER, para os 15 espectros minerais mais similares utilizando similaridade do cosseno. Os resultados podem ser visualizados na Figura 64.

Figura 64 - Espectro da classe 6, representativa da área 1 e 15 espectros mais similares da biblioteca espectral USGS, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).



Fonte: Autor.

Foi possível observar que o método de similaridade do cosseno selecionou espectros de forma muito parecida com o espectro da classe 6. Dentre os vários espectros similares estão natrolita, copiapita, lepidolita e caulinita, que demonstram em geral absorção na banda 5 e 6 do ASTER. Importante salientar que apesar de lepidolita, mica portadora de Li, ter aparecido como espectro similar, o ASTER não tem resolução espectral suficiente para diferenciar este espectro de outros similares, conforme demonstrado na Figura dos espectros. Foram mais constantes espectros similares de halloysita (polimorfa da caulinita) e caulinita que são minerais de origem hidrotermal ou de intemperismo de aluminossilicatos (mais provável), como feldspatos que são minerais presentes no pegmatito. Os valores de cosseno utilizados como

erro de classificação variam de 0 para pouco similar para 1 para máxima similaridade, e podem ser vistos na Tabela a seguir.

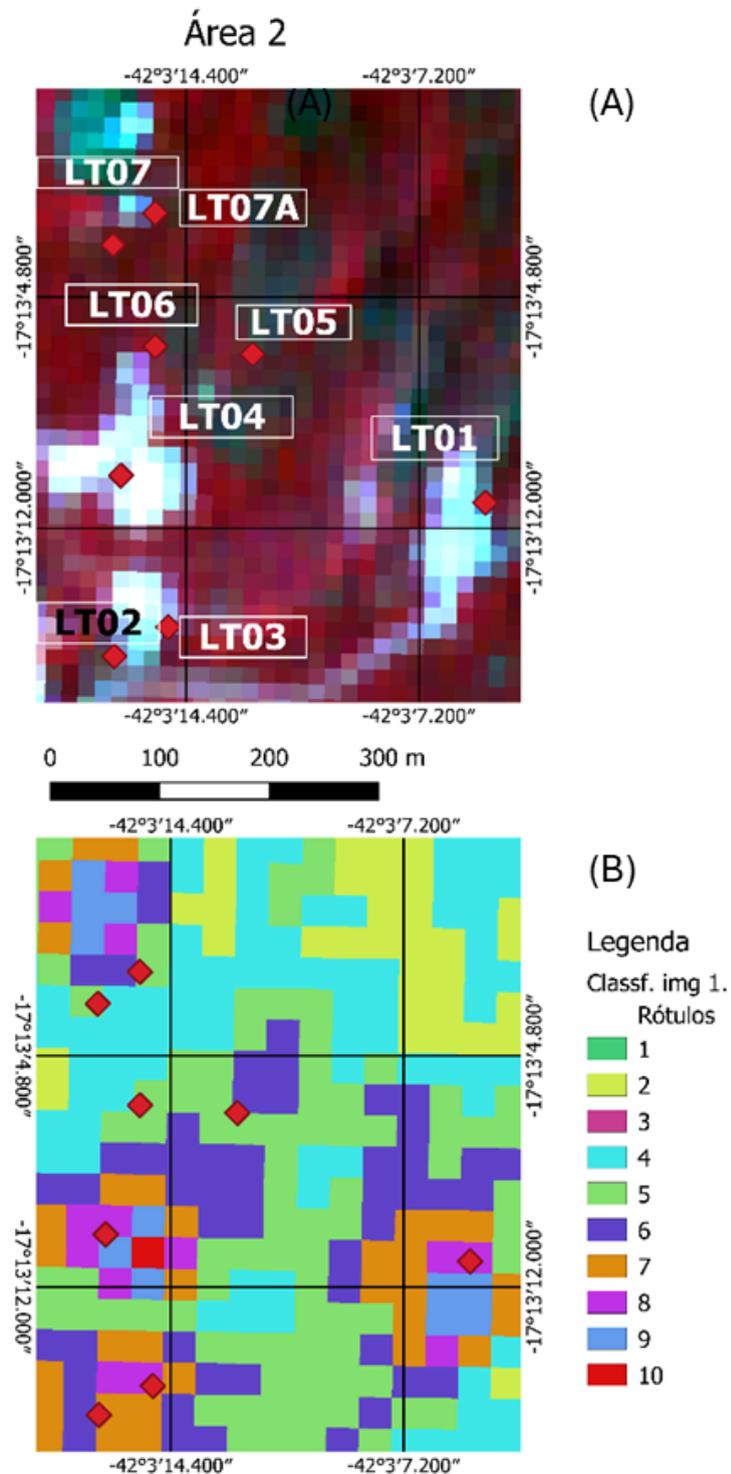
Tabela 13 - Valores de cosseno para classificação espectral da classe 6.

<b>Espectro mineral</b>	<b>ID USGS</b>	<b>Cosseno</b>
Natrolite	HS169.4B	0.99783
Copiapite	GDS21	0.99748
Kieserite	KIEDE1.a	0.99696
Beryl	HS180.6	0.99695
Lepidolite	HS167.4B	0.9967
Beidellite	GDS124	0.99585
Kaolinite	KL502	0.99571
Nanohematite	BR93-34B2	0.99567
Cookeite	CAr-1.a	0.99564
Halloysite	NMNH106237	0.9951
Halloysite	NMNH106237	0.9951
Halloysite	CM13	0.99505
Halloysite	NMNH106237	0.99492
Kaolinite	CM7	0.99437
Kaolinite	NIC4bbb	0.99429

Fonte: Autor.

Para a cena ASTER da área 2 é possível notar que as amostras LT1,LT3 e LT4 possuem menor cobertura vegetal na cena estudada e estão relacionadas à classe 8, resultados podem ser vistos na Figura 65.

Figura 65 - Recorte da cena ASTER da área 2 de onde as amostras foram coletadas, em composição colorida falsa cor RGB 321(A), e sua correspondente classificada (B) (EPSG: 4326).

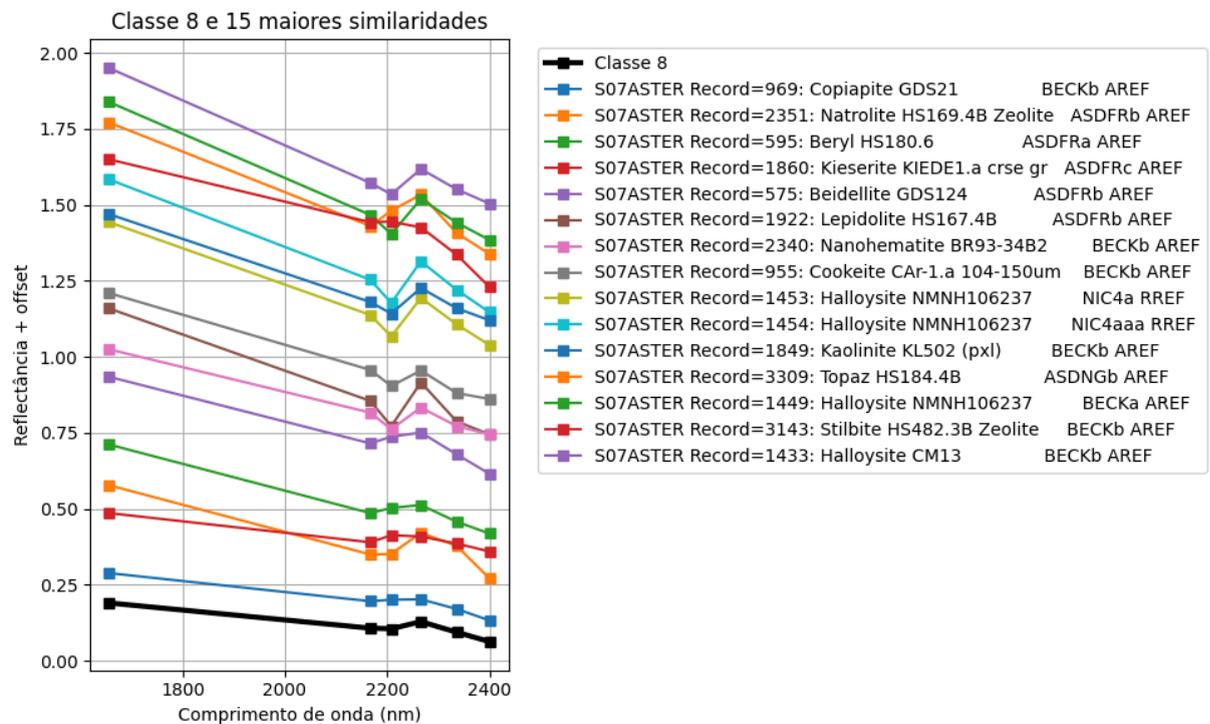


Fonte: Autor.

Dentre os espectros mais similares novamente os minerais natrolita, lepidolita e caulinita, aparecem, apesar de outros minerais aparecerem entre eles, e mais

constantes halloysita e caulinita, que levando em consideração o contexto geológico, é o mais plausível. A reamostragem de dados espectrais apesar de facilitarem a análise, ocasiona uma grande perda de dados, o que leva a correlação como alguns espectros que não necessariamente fazem sentido geológico, o que reforça a importância da etapa de campo e conhecimento do contexto geológico estudado. Os dados de classificação podem ser vistos para a classe 8, na Figura 66.

Figura 66 - Espectro da classe 8, representativa da área 2 e 15 espectros mais similares da biblioteca espectral USGS, pontos no gráfico representam do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).



Fonte: Autor.

Os valores de cosseno de classificação para a classe 8 podem ser vistos na Tabela 14.

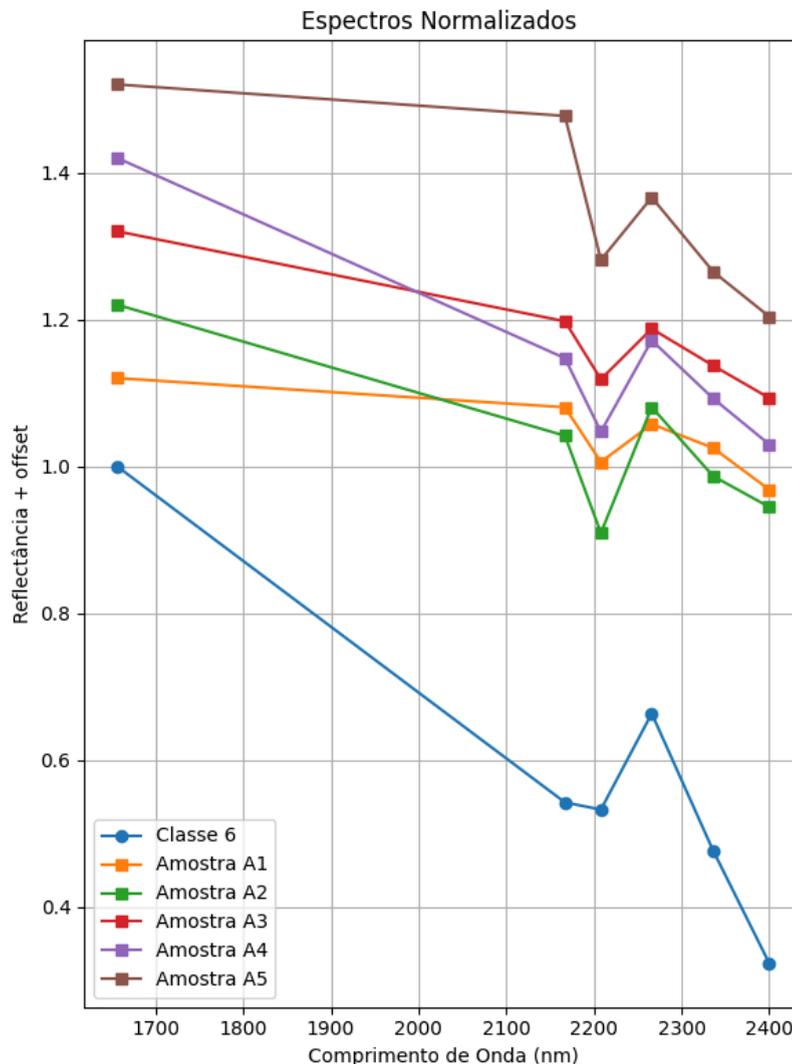
Tabela 14 - Valores de cosseno para classificação espectral da classe 8.

<b>Espectro mineral</b>	<b>ID USGS</b>	<b>Cosseno</b>
Copiapite	GDS21	0.99819
Natrolite	HS169.4B	0.99752
Beryl	HS180.6	0.99716
Kieserite	KIEDE1.a	0.99713
Beidellite	GDS124	0.9968
Lepidolite	HS167.4B	0.99639
Nanohematite	BR93-34B2	0.99549
Cookeite	CAr-1.a	0.99541
Halloysite	NMNH106237	0.99537
Halloysite	NMNH106237	0.99537
Kaolinite	KL502	0.99536
Topaz	HS184.4B	0.99508
Halloysite	NMNH106237	0.99476
Stilbite	HS482.3B	0.99458
Halloysite	CM13	0.99453

Fonte: Autor.

Com os espectros de campo reamostrados, foi possível comparar com os espectros das classes encontradas através da clusterização, elencando estas como representativas das áreas estudadas. Os resultados para a área 1 podem ser visualizados na Figura 67.

Figura 67 - Comparação dos espectros da classe 6 e amostras 1 a 5 da área 1, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).



Fonte: Autor.

Os espectros de campo tiveram certa similaridade com os espectros da classe estudada, sendo a amostra 4 a mais similar dentre elas, que está relacionada ao saprólito do túnel do pegmatito da área 1. O espectro da classe demonstra absorção nas bandas 5 (~2167nm) e 6 (~2208nm), que são características da absorção dupla da caulinita, contudo as amostras não apresentaram estas feições bem marcadas. A diferença deste espectros podem estar relacionadas a diversos fatores, a própria origem dos espectros (sensor remoto x medida laboratorial) podem ter erros relacionados, além dos métodos de pré processamento das imagens e métodos de processamento, que também podem ocasionar a erros inerentes do processo. Outro fator que pode estar relacionado a esta diferença é a metodologia

de homogeneização de amostra para coletar os espectros únicos representativos, no lugar da coleta de diversos espectros por amostra em pontos diferentes para análise particular de cada espectro. Outro fator é a perda de detalhamento inerente ao método de reamostragem espectral. Os dados de similaridade pelo cosseno entre a classe representativa da área 1 e as amostras coletadas em campo podem ser vistos na Tabela 15.

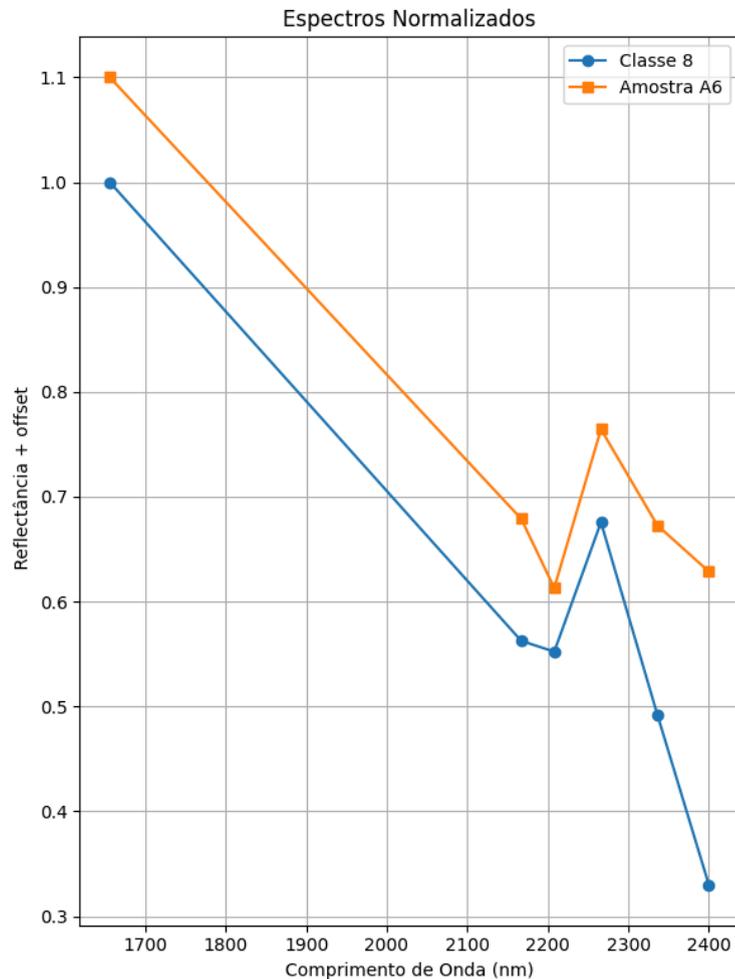
Tabela 15 - Amostra das área 1.

<b>Amostra</b>	<b>Similaridade</b>
A1	0.95682
A2	0.97268
A3	0.96633
A4	0.98402
A5	0.97077

Fonte: Autor.

A área 2 teve apenas um espectro coletado a porção superficial do pegmatito, e a classe 8 de clusterização foi atribuída a área. Os espectros reamostrados e o espectro da classe representativa podem ser observados na Figura 68.

Figura 68 -Comparação dos espectros da classe 8 e amostra 6 da área 2, pontos no gráfico representam bandas do sensor ASTER (banda 4,5,6,7,8 e 9).



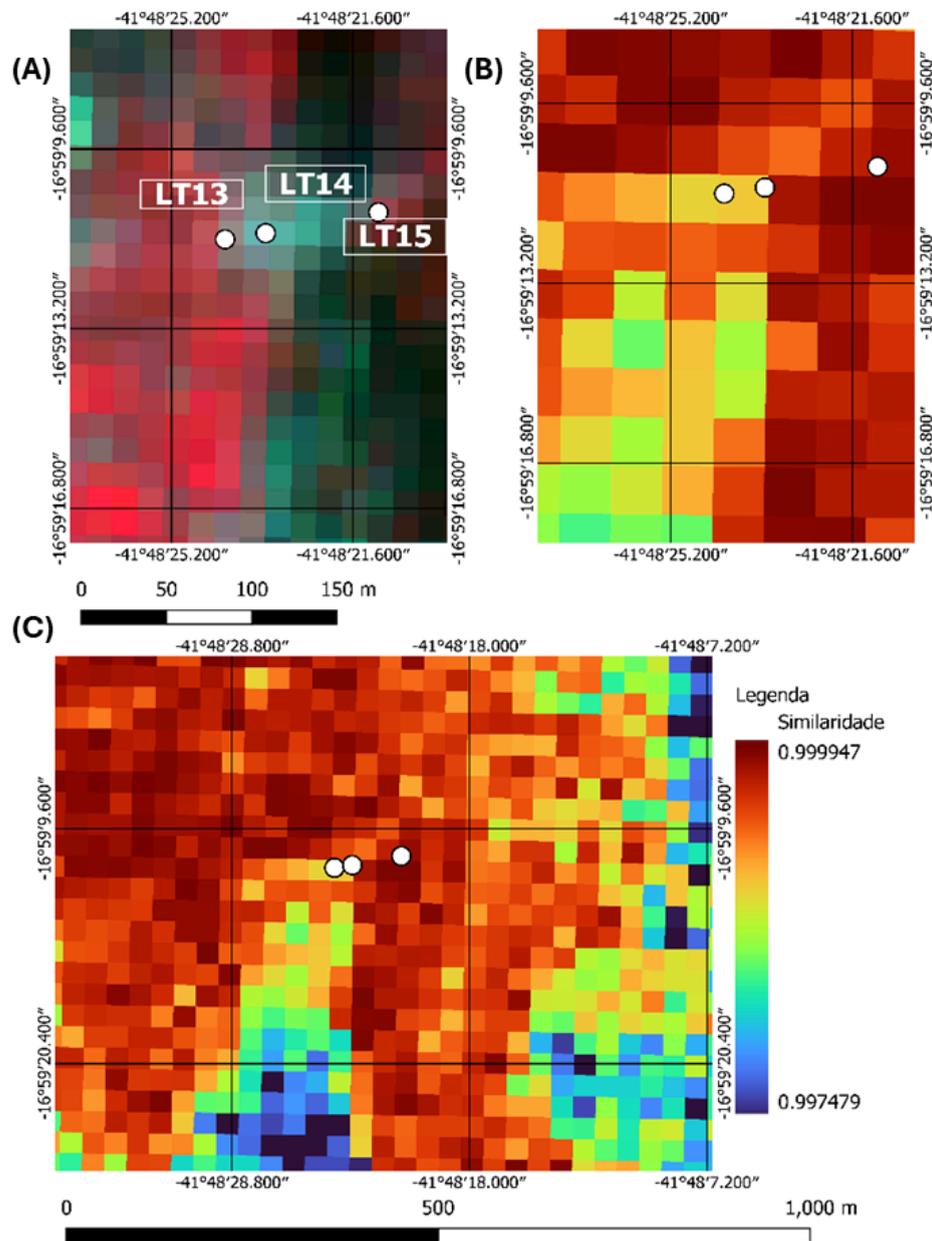
Fonte: Autor.

É possível notar uma maior correspondência entre os espectros. Vale salientar que o pegmatito coletado na área 2 aflorava superficialmente, e estes resultados demonstram que houve uma melhora na correlação entre os dados de campo e de laboratório, conforme demonstrado pelo valor de similaridade de aproximadamente calculado 0.99148.

#### 4.7 Mapeamento dos espectros alvo

Com os dados das classes representativas, foram calculados as similaridades espectrais angulares através do cálculo do cosseno entre os espectro da classe e os espectros de cada pixel da área da cena estudada. Os resultados da área 1 podem ser vistos na Figura 69.

Figura 69 - Área 1 de estudo com pontos de coleta (a) em composição ASTER RGB 321, classificada pela similaridade na mesma escala (b) também classificada em escala menor (c)(EPSG: 4326).

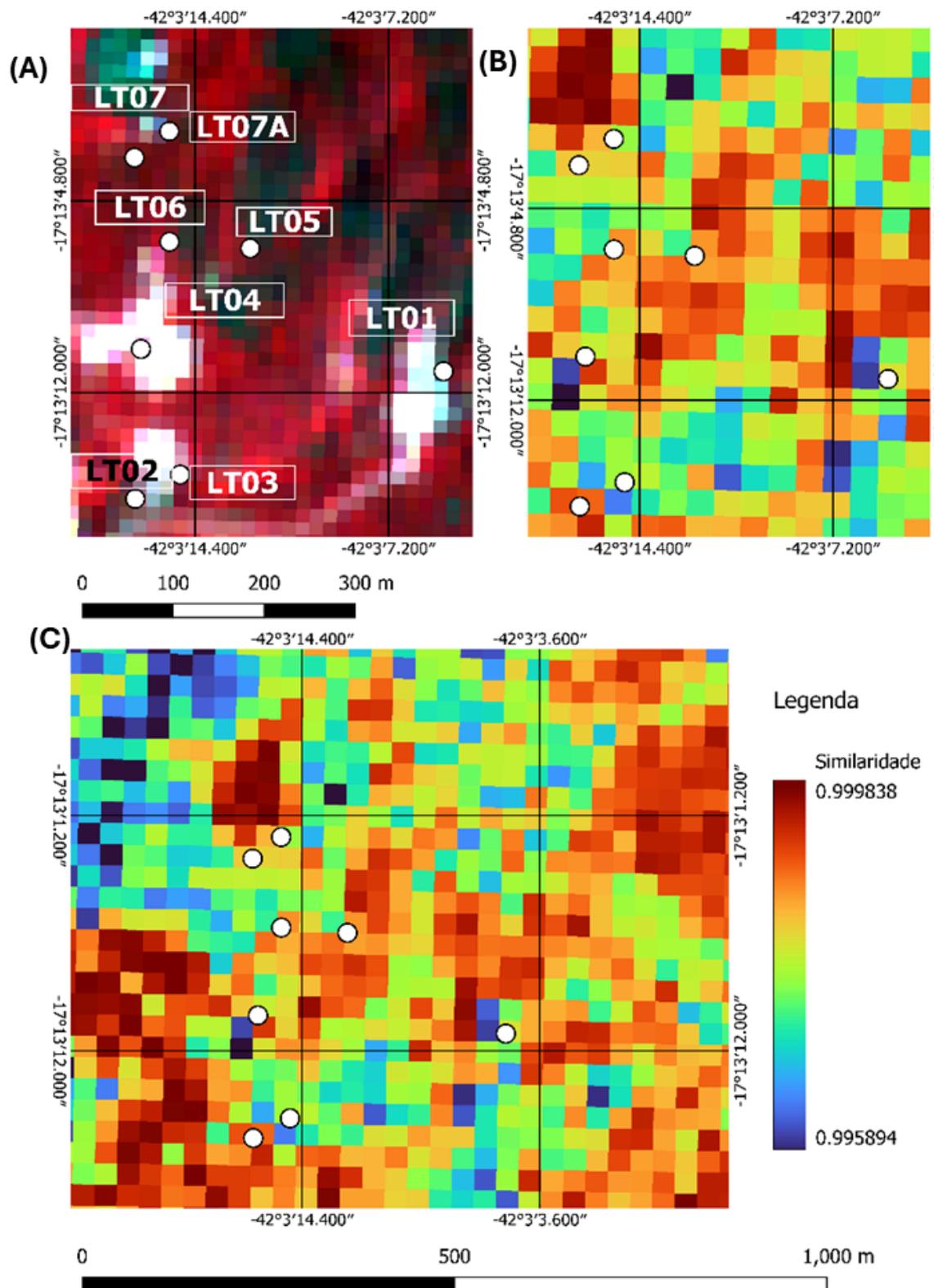


Fonte: Autor.

Os dados de amostragem ficaram em zonas quentes de similaridade, e apresentaram uma boa correlação, apesar de outras área também apresentarem a mesma similaridade, o que pode estar relacionado à ocorrência regional relacionada a classe estudada, o que é plausível pois os pegmatitos ocorrem em vários locais

conforme demonstrado nas imagens de campo, inclusive sendo minerados em pedreiras de rocha ornamental próximo ao garimpo visitado. Outro aspecto que pode explicar esta similaridade regional é o fato de que os espectros de campo terem relação com a caulinita, que é um dos principais argilominerais predominantes na fração argila da maioria dos solos tropicais. Os resultados para a área 2 podem ser vistos na Figura 70.

Figura 70 - Área 2 de estudo com pontos de coleta (a) em composição ASTER RGB 321, classificada pela similaridade na mesma escala (b) também classificada em escala menor (c)(EPSG: 4326).



Fonte: Autor.

As amostras também estão relacionadas à áreas quentes, relativamente mais particularizadas do que na área de estudo um, mas também outras áreas ao entorno foram selecionadas, podendo este fenômeno estar relacionado ao comportamento do solo como mencionado anteriormente.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, percebe-se que, apesar dos erros inerentes a qualquer etapa de amostragem e processamento de dados, a metodologia utilizada conseguiu caracterizar, interpretar e propor caminhos para a prospecção de pegmatitos. A descrição petrográfica das rochas intemperizadas, por meio de cominuição e homogeneização para a criação de uma amostra única representativa do contexto, prejudicou a análise completa das feições dos minerais no microscópio devido ao fraturamento dos grãos. No entanto, algumas características, como relevo, pleocroísmo, cor de interferência, forma e extinção do mineral, puderam ser observadas, fornecendo uma ideia do contexto mineralógico quando relacionadas com a paragênese esperada.

Os dados de análise por FRX com a S1 TITAN, após tratamento para exclusão de valores fora de um desvio padrão em relação a média, indicaram que os pegmatitos estão associados a maiores valores de háfnio e ródio em comparação com as demais amostras. Com maior detalhamento, essa informação pode servir como vetor em campanhas de prospecção geoquímica.

Os dados espectrais de laboratório mostraram predominantemente uma feição de absorção entre 365 e 390 nm, possivelmente associada a ruídos de medição ou a óxidos ricos em Fe (como goethita) (Schaefer *et al.*, 2021). As absorções próximas a 1000 nm também podem estar relacionadas ao Fe<sup>3+</sup>; tanto a goethita quanto a hematita apresentam feições características entre 850 e 1000 nm (Morris, 1985). A absorção em 1400 nm geralmente corresponde às vibrações de íons hidroxila ( $OH^-$ ), enquanto a absorção em 1900 nm indica a presença de água molecular (Binotto, 2015). A presença de “AlOH” e “FeOH” foi associada a absorções centradas em ~2200 nm e ~2250 nm, respectivamente. A absorção em ~2350 nm indica MgOH, enquanto a de ~2450 nm é característica das micas (Laukamp *et al.*, 2021).

Na comparação espectral das amostras com espectros minerais, a amostra 1 exibiu forma e mínimos compatíveis com muscovita na faixa de 1100-2000 nm e turmalina entre 2000-2500 nm, coerente com o dado de campo, onde se observou um mineral preto oxidado no pegmatito. A amostra 2 correlacionou-se com os

espectros de espodumênio (1100-2500 nm) e caulinita (2000-2500 nm), o que também está de acordo com os dados de campo, já que foi coletada no pegmatito. As amostras 3 e 4 apresentaram características associadas à muscovita e caulinita, ligadas aos horizontes A e B, situados acima do túnel do pegmatito. A amostra 5 apresentou feições entre 2000 e 2500 nm, próximas ao espectro da clorita, possivelmente derivada da alteração de biotita, uma condição comum em xistos e coerente com o campo, onde foi observada no contato abrupto com o pegmatito apesar da clorita geralmente apresentar uma absorção característica em ~2350 nm, relativa ao MgOH (Clark *et al.*, 2007; Cohen, 2011). A amostra 6 apresenta feições duplas de absorção, localizadas ~1400 nm e ~2200 nm, muito características da caulinita, coerente com observado em campo, pois representa o pegmatito aflorante da área 2 (Harraden *et al.*, 2013).

A metodologia de mapeamento dos mínimos e distâncias euclidianas mostrou boa adequação ao analisar as similaridades dos espectros, facilitando a análise visual para a determinação dos espectros similares. A clusterização dos dados, após o cálculo da média representativa, categorizou as áreas como similares a caulinita e haloisita. Os espectros representativos dessas classes tiveram seus erros calculados em relação aos espectros de campo, com a classe 6, representativa da área 1, demonstrando maior similaridade com a amostra de saprolito (amostra 4), e a classe 8, representativa da área 2, exibindo similaridade com a amostra 6 coletada do pegmatito. Essa similaridade pode ser interpretada como erro calculado, influenciado por fatores diversos, desde a coleta até o processamento dos dados. Outra fonte possível de erro está no sensor ASTER, que desde o lançamento apresenta o efeito “crosstalk”, vazamento de radiância dos detectores da banda 4 sobre as bandas 5 e 9, apesar de o defeito ser corrigido na coleção L1T.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram o potencial da espectroscopia para a caracterização de minerais em pegmatitos, mesmo em amostras alteradas. Os mapeamentos demonstraram uma boa correlação com as áreas alvo, podendo esta metodologia ser levada em consideração como guia prospectivo para pegmatitos.

No entanto, a complexidade das amostras e as limitações das técnicas empregadas indicam a necessidade de estudos mais aprofundados. Recomenda-se,

para trabalhos futuros, a realização de análises em laboratório com equipamentos de maior resolução espectral, e análises *in loco*, para uma identificação mais precisa dos minerais. Além disso, a utilização de bases de dados espectrais mais completas e específicas para a região de estudo, ou para as litologias estudadas, é fundamental para melhorar a interpretação dos resultados. A realização de trabalhos de campo mais detalhados, com coleta de amostras orientadas e a utilização de sensores hiperespectrais, permitiria a criação de mapas temáticos de minerais mais precisos, auxiliando na prospecção e caracterização de pegmatitos em larga escala

## REFERÊNCIAS

ABRAMS, M., HOOK, S., RAMACHANDRAN, B. **Aster user handbook: version 2**, 2002.

ALKMIM, F. F., MARSHAK, S., PEDROSA-SOARES, A. C., PERES, G. G., CRUZ, S. C. & WHITTINGTON, A. **Kinematic evolution of the Aracuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana**. *Precambrian Research*, 149, 43–63, 2006..

BALARAM, V. **Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact**. *Geosci. Front.* 10 (4), 1285–1303, 2019.. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.

BALARAM, V. **Current and emerging analytical techniques for geochemical and geochronological studies**. *Geol. J.* 56 (5), 2300–2359, 2021. <https://doi.org/10.1002/gj.4005>.

BALARAM, V. **Inductively Coupled Plasma-Tandem Mass Spectrometry (ICPMS/MS) and its applications**. *J. ISAS* 1 (1), 1–26, 2022.. <https://doi.org/10.59143/isas.jisas.1.1.LHBP9335>.

BALARAM, V., SATYANARAYANAN, M. **Data quality in geochemical elemental and isotopic analysis**. *Minerals* 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12080999>.

BALARAM, V., SAWANT, S.S. **Indicator minerals, pathfinder elements, and portable analytical instruments in mineral exploration studies**. *Minerals* 12, 394, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12040394>.

BASÍLIO, M., PEDROSA-SOARES, A. C. EVANGELISTA, H. J. **Depósitos de Alexandrita de Malacacheta, Minas Gerais**. *Geonomos*, 8, 47–54, 2000.

BNDES. **BNDES aprova R\$ 486,7 milhões para Sigma Lithium beneficiar lítio de forma sustentável**. Agência BNDES de Notícias, 2024.. Disponível em: [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-aprova-R\\$-4867-milhoes-para-Sigma-Lithium-beneficiar-litio-de-forma-sustentavel/](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-aprova-R$-4867-milhoes-para-Sigma-Lithium-beneficiar-litio-de-forma-sustentavel/). Acesso em: 7 out. 2024.

BROADLEY, M., GINES, J., RHIND, O., BAINES, A. **Future Energy: Imaging hidden lithium-rich brines with satellite imagery**. In: 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, pp. 1–5, 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023101419>

BOWELL, R.J., LAGOS, L., DELOS HOYOS, C.R., DECLERCQ, J. **Classification and characteristics of natural lithium resources**. *Elements* 16, 259–264, 2020.. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.259>.

BINOTTO, RAQUEL DE BARROS. **Identificação de padoes espectrais em depósitos minerais: uma aplicação nas Minas do Camaquã, RS, Brasil**. 119 f. Tese (Doutorado) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CAO, H.W., PEI, Q.M., SANTOSH, M., LI, G.M., ZHANG, L.K., ZHANG, X.F., ZHANG, Y.H., ZOU, H., DAI, Z.W., LIN, B., TANG, L., YU, X.. **Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization.** *Earth-Science Rev.* 234, 104229, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104229>

CARBON CREDITS. **The Lithium Paradox: Price Plummet, Supply Surge, and Demand Dip – What’s Happening Now?**. Carbon Credits, 2024. Disponível em: <https://carboncredits.com>. Acesso em: 23 set. 2024.

CARDOSO-FERNANDES, J.; SILVA, J.PERROTTA, M.M.; LIMA, A.; TEODORO, A.C.; RIBEIRO, M.A.; DIAS, F.; BARRÈS, O.; CAUZID, J.; RODA-ROBLES, E. **Interpretation of the Reflectance Spectra of Lithium (Li) Minerals and Pegmatites: A Case Study for Mineralogical and Lithological Identification in the Fregeneda-Almendra Area.** *Remote Sens.* 13, 3688, 2021. . <https://doi.org/10.3390/rs13183688>

CARVALHO DE, O.A. E MENSES, P.R. **Spectral Correlation Mapper (SCM): “An improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM)”**, AVIRIS Workshop Proceedings, 2000,.

CERNÝ, P. **Rare-element granite pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Part II: regional to global relationships and petrogenesis.** *Geoscience Canada* 18: 49-81, 1991.

CERNÝ, P.; ERCIT, T., S. **The classification of granitic pegmatites revisited.** *Canadian Mineralogist* 43: 2005-2026, 2005..

CERNÝ, P.; LONDON, D.; NOVÁK; M. **Granitic Pegmatites as Reflections of Their Sources.** *Elements* ;; 8 (4): 289–294, 2012. doi: <https://doi.org/10.2113/gselements.8.4.289>

CHAVEZ JR., P.S. **An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 24, p. 459-479, 1988.

CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; WISE, R.; LIVO, E.; HOEFEN, T.; KOKALY, R.; SUTLEY, S. J. **USGS digital spectral library splib06a.** Denver, Co: USGS, 2007. (U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231).

CHEN, L., ZHANG, N., ZHAO, T., ZHANG, H., CHANG, J., TAO, J., CHI, Y., **Lithium bearing pegmatite identification, based on spectral analysis and machine learning: A case study of the Dahongliutan Area, NW China.** *Remote Sens.* 15, 493, 2023a.. <https://doi.org/10.3390/rs15020493>.

CHEN, Y., ZHAO, H., XIA, M., CHENG, H.F., **Insights into lithium adsorption by coal-bearing strata kaolinite.** *Front. Earth Sci.* 17, 251, 2023b. <https://doi.org/10.1007/s11707-022-0989-y>.

CRU GROUP. **Lithium prices: Where is the highest risk of curtailment?**. CRU Group, 2024. Disponível em: <https://crugroup.com>. Acesso em: 23 set. 2024.

COHEN, J. F. **Compositional variations in hydrothermal white mica and chlorite from wall-rock alteration at the ann-mason porphyry copper deposit, Nevada**. 2011. 111f. Dissertação (Mestrado) - Science in Geology, Oregon State University. Corvallis, Oregon, 2011.

COMISSÃO EUROPEIA: **Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs**, Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study, Publications Office, 2020.. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/58081>

COMISSÃO EUROPEIA: **Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs**, Grohol, M., & Veeh, C. Study on the critical raw materials for the EU 2023 : final report, Publications Office of the European Union, 2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>

CONGEDO, L . **Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS** Journal of Open Source Software, 6(64), 3172, 2021. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

CORREIA-NEVES, J. M., PEDROSA-SOARES, A. C., & MARCIANO, V. R. **A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais**. Revista Brasileira de Geociências, 16, 106-118, 1986.

CRÓSTA, Alvaro Penteado; ALMEIDA, Teodoro Isnard Ribeiro de; PARADELLA , Waldir Renato; SILVA, Sebastião Milton Pinheiro da; MENESES, Paulo Roberto. **Sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil**. In: MELFI, Adolpho José; MISI, Aroldo; CAMPOS, Diogenes de Almeida; CORDANI, Umberto Giuseppe. **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 190-208. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

CROSTA, A. P. AND MOORE, J. **Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain**. Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan. 1989. p. 1173-1187.

DE CAMPOS, C. M., MENDES, J. C., LUDKA, I. P., MEDEIROS, S. R., MOURA, J. C. & WALLFASS, C. **A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post collisional magmatism**. Journal of the Virtual Explorer, 17, 2004., <http://virtualexplorer.com.au/journal/2004/17/campos>.

DAI J, LIU T, ZHAO Y, TIAN S, YE C AND NIE Z. **Remote sensing inversion of the Zabuye Salt Lake in Tibet, China using LightGBM algorithm**. Front. Earth Sci.2023. 10:1022280. doi: 10.3389/feart.2022.1022280

DIAS, F., RIBEIRO, R., GONÇALVES, F., LIMA, A., RODA-ROBLES, E., MARTINS, T. **Calibrating a handheld LIBS for Li exploration in the Barroso-Alvão aplite pegmatite field, Northern Portugal: Textural precautions and procedures when analyzing spodumene and petalite.** *Minerals* 13, 470, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13040470>

DING, W., DING, L., LI, Q., LI, J., ZHANG, L.,. **Lithium-rich pegmatite detection integrating high-resolution and hyperspectral satellite data in Zhawulong Area, Western Sichuan, China.** *Remote Sens.* 15, 3969. 2023b. <https://doi.org/10.3390/rs15163969>.

DING, T., ZHENG, M., PENG, S., LIN, Y., ZHANG, X., LI, M. **Lithium extraction from salt lakes with different hydrochemical types in the Tibet Plateau.** *Geosci. Front.* 14, 101485, 2023a.. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101485>

FERNANDES, J.C., SILVA, J., PERROTTA, M.M., LIMA, A., TEODORO, A.C., RIBEIRO, M.A., DIAS, F., BARRÈS, O., CAUZID, J., Roda-Robles, E. **Interpretation of the reflectance spectra of lithium (Li) minerals and pegmatites: A case study for mineralogical and lithological identification in the Fregeneda-Almendra Area.** *Remote Sens.* 13, 3688, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183688>

FERNANDES, J.C., TEODORO, A.A.C., LIMA, A. **Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites.** *International J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 76, 10–25, 2019.. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.001>.

FERNANDES, J.C., TEODORO, A.C., LIMA, A., PERROTTA, M., ROBLES, E.R. **Detecting lithium (Li) mineralisations from space: Current research and future perspectives.** *Appl. Sci.* 10, 1785, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10051785>.

FONTGALLAND, I. L., DE MENEZES, G. C., PAZ, M. A. DE F., SOUZA, ÊNIO P. DE, FARIAS, S. A. R., & RÉGO, V. G. DE S. **Normalized Difference Vegetation Index Analysis Using Ndvi and Savi Indices in the Conservation Unit Serra da Borborema Municipal Nature Park, Campina Grande, Paraíba, Brazil.** *Revista De Gestão Social E Ambiental*, 17(1), e03116, 2023. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n1-009>

GABR, S. S., HASSAN, S. M., SADEK, M. F. **Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, Southeastern Desert, Egypt, using remote sensing data analysis.** *Ore Geology Reviews*, 71(0), pp.1–13, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.021>

GINSBURG, A. I.; TIMOFEYEV, I. N.; FELDMAN, L. G. **Principles of Geology of the Granitic Pegmatites.** Nedra, Moscow, USSR (in Russian), 1979.

GALLISKI, M.Á., MÁRQUEZ-ZAVALÍA, M.F., RODA-ROBLES, E., VON QUADT, A.. **The Libearing pegmatites from the Pampean Pegmatite Province, Argentina: Metallogenesis and resources.** *Minerals* 12, 841, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12070841>.

GAO, Y., BAGAS, L., LI, K., JIN, M., LIU, Y., TENG, J. **Newly discovered Triassic lithium deposits in the Dahongliutan Area, North West China: A case study for the detection of lithium-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images.** *Front. Earth Sci.* 8, 591966, 2020a. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.591966>.

GAO, C., YU, J., MIN, X., CHENG, A. **Hydroclimatic and geothermal controls of lithium brine deposits on the Qinghai-Tibetan Plateau.** *IOP Conf. Series: Mat. Sci. Engineering* 780, 042062, 2020b. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/780/4/042062>.

GAO, C.L., YU, J.Q., MIN, X.Y., CHENG, A.Y., ZHANG, L.S.. **Distribution characteristics and controlling factors of lithium brine deposits in the world.** *J. Salt Lake Res.* 28(4), 48–55, 2020c (in Chinese with English abstract). doi: 10.12119/j. yhyj.202004006.

GARATE-OLAVE, I., RODA-ROBLES, E., GIL-CRESPO, P.P., PESQUERA, A. **Mica and feldspar as indicators of the evolution of a highly evolved granite-pegmatite system in the Tres Arroyos area (Central Iberian Zone, Spain).** *J. Iberian Geol.* 44 (3), 375–403, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41513-018-0077-z>.

GOURCEROL, B., GLOAGUEN, E., MELLETON, J., TUDURI, J., GALIEGUE, X. **Re-assessing the European lithium resource potential – A review of hard-rock resources and metallogeny.** *Ore Geol. Rev.* 109, 494–519, 2019. <https://doi.org/10.1016/j. oregeorev.2019.04.015>.

HARRADEN, C. L.; MCNULTY, B. A.; GREGORY, M. J.; LANG, J. R. **Short wave Infrared Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Associated with the Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska.** *Economic Geology*, v. 108, p. 483–494, 2013.

HE, L., LI, L., SHEN, P., WANG, S., LI, Z.Y., ZHOU, N.N., CHEN, R.J., QIN, K.Z. **Geophysical approaches to the exploration of lithium pegmatites and a case study in Koktohay.** *Earth Sci. Front.* 30 (5), 244–254, 2023. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.5.14>.

HEINECK, C., RAPOSO, F., MALOUF, R. & JARDIM, S. **Folha Jequitinhonha. Programa Geologia do Brasil, CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2008.**

HORSTMAN, E.L. **The distribution of lithium, rubidium and caesium in igneous and sedimentary rocks.** *Geochim. Cosmochim. Acta* 12 (1–2), 1–28, 1957. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(57\)90014-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(57)90014-5).

KOKALY, R.F., CLARK, R.N., SWAYZE, G.A., LIVO, K.E., HOEFEN, T.M., PEARSON, N.C., WISE, R.A., BENZEL, W.M., LOWERS, H.A., Driscoll, R.L., and Klein, A.J., 2017, **USGS Spectral Library Version 7: U.S.** Geological Survey Data Series 1035, 61 p., <https://doi.org/10.3133/ds1035>.

KUMAR C., SHETTY, A., RAVAL S., SHARMA R., RAY P. C. **Lithological discrimination and mapping using ASTER SWIR Data in the Udaipur area of Rajasthan, India** *Procedia Earth Planet. Sci.*, 11, pp. 180-188, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.022.

LAUDE-SALCEDO, J. **Understanding Lithium Prices: Past, Present, and Future**. Carbon credits, 2024. [S. l.], p. N.. Disponível em: <https://carboncredits.com/understanding-lithium-prices-past-present-and-future/#:~:text=Historical%20Lithium%20Price%20Trends&text=From%202010%20to%202015%2C%20prices,for%20renewable%20energy%20storage%20solutions>. Acesso em: 7 out. 2024.

LAUKAMP, C.; RODGER, A.; LEGRAS, M.; LAMPINEN, H.; LAU, I.C.; PEJCIC, B.; STROMBERG, J.; FRANCIS, N.; RAMANAIDOU, E.. **Mineral Physicochemistry Underlying Feature-Based Extraction of Mineral Abundance and Composition from Shortwave, Mid and Thermal Infrared Reflectance Spectra**. *Minerals* ., 11, 347, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11040347>

LIKAS, A., VLASSIS, N., VERBEEK, J.J. **The global k-means clustering algorithm**. *Pattern Recognit.* 36 (2), 451–461.2003.

LIU, L., ZHOU, J., HAN, L. XU, X. **Mineral mapping and ore prospecting using Landsat TM and Hyperion data. Wushitala, Xinjiang, northwestern China**. *Ore Geology Reviews* 81, 280–295, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.007>.

LIU, H., WANG, X., ZHANG, B., WANG, W., HAN, Z., CHI, Q.H., ZHOU, J., NIE, L.S., XU, S.F., YAO, W.S., LIU, D.S., LIU, Q.Q., LIU, J. **Concentration and distribution of lithium in catchment sediments of China: Conclusions from the China Geochemical Baselines project**. *J. Geochem. Explor.* 215, 106540. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106540>, 2020..

LOUGHLIN, W. P. **Principal component analysis for alteration mapping**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 57(9), p.1163-1169, 1991.

MACQUEEN, J. **Some Methods for Classification and Analysis of MultiVariate Observations**. *Proc of Berkeley Symposium on Mathematical Statistics & Probability.*1965.

MEER, F.V., JONG, S.D., BAKKER, W. **Imaging Spectrometry: Basic Analytical Techniques**. In: Meer, F.D.v., Jong, S.M.D. (eds) *Imaging Spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 4, 2002. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-0-306-47578-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-0-306-47578-8_2)

MINING.COM. **Lithium producers bullish on long-term demand despite recent price drop**. *Mining.com*, 2024. Disponível em: <https://mining.com>. Acesso em: 23 set. 2024.

MEYER, D., SIEMONSMA, D., BROOKS, B., JOHNSON, L., . **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered at-Sensor Radiance (AST\_L1T) Product, Algorithm Theoretical Basis Document**. Open-File Report. Reston, VA, 2015. <https://doi.org/10.3133/ofr20151171>

MORRIS, R. C. **Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene metamorphic processes, a conceptual model**. In: WOLF, K.H. (Ed.) Handbook of stratabound and stratiform ore deposits. Amsterdam: Elsevier. v. 13, p.73-235, 1958.

MORTEANI, G., PREINFALK, C., & HORN, A. H. **Classification and mineralization potencial of the pegmatites of the Eastern Brazilian Pegmatite Province**. Mineralium Deposita, 35, 638-655, 2000.

NETTO, C., ARAÚJO, M. C., & PINTO, C. P. **Pegmatitos. Projeto Leste, Etapas 1 e 2**. Belo Horizonte, CPRM-SGB/COMIG, 2001.

NASA (ED.). **Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt**, 186 ,2011. [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7\\_Handbook.pdf](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf)

NOVAES , R. C., SOUZA , L. E. DE, TEMPORIM , F. A., & ABICHEQUER , L. A. . **Hydrothermal Alteration Zones Mapping Using Sentinel 2 MSI and Terra Aster Data in The Uruguay Mine, Minas do Camaquã District** . Revista De Gestão Social E Ambiental, 18(8), e6142, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-085>

OH, I.H., YANG, S.J., HEO, C.H., LEE, J.H., KIM, E.J., CHO, S.J.. **Study on the controlling factors of Li-bearing pegmatite intrusions for mineral exploration**, Ulsan, South Korea. Minerals 12, 589, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12050589>.

OLIVEIRA, TEBIS. CARAJÁS 50 ANOS: **Entrevista com o geólogo Breno Augusto dos Santos**. In the mine, [S. l.], p. 28-32, 12 set. 2017. Disponível em: <https://inthemine.com.br/site/wp-content/uploads/2017/09/InTheMine-edicao68-entrevistabreno.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

OSINOWO, O. O., GOMY A., ISSEINI, M. **Mapping hydrothermal alteration mineral deposits from Landsat 8 satellite data in Pala, Mayo Kebbi Region, Southwestern Chad**. Scientific African, 11, e00687, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00687>

PAES, V. C., HEINECK, C. & MALOUF, R. Folha Itaobim. **Programa Geologia do Brasil**, CPRM– Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2008.

PAIVA, G. **Províncias pegmatíticas do Brasil**. Boletim DNPM-DFPM, 78, 13-21, 1946.

PANTOJA, D. A., SPENASSATO, D., & EMMENDORFER, L. R. **Comparison Between Classification Algorithms: Gaussian Mixture Model - GMM and**

**Random Forest - RF, for Landsat 8 Images.** Revista De Gestão Social E Ambiental, 16(3), e03234, 2023.. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n3-015>.

PAZAND, K., PAZAND. K. **Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring porphyry copper deposit using ASTER data: a case study of Varzaghan area**, NW Iran. Geology, Ecology, and Landscapes, 6:3, 217-223, 2022. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1813371>.

PEDROSA-SOARES, A. C. & WIEDEMANN-LEONARDOS, C. M. **Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil.** In: CORDANI, U., MILANI, E., THOMAZ-FILHO, A. & CAMPOS, D. A. (eds) Tectonic Evolution Of South America. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, 265–285, 2000.

PEDROSA-SOARES, A. C. CAMPOS, C. M., NOCE, C. M. SILVA, L. C., NOVO, T. A., RONCATO, J., MEDEIROS, S. , M., CASTAÑEDA, C., QUEIROGA, G. N., DANTAS, E., DUSSIN, I. A., A. , ALKMIM, F. F. **Late Neoproterozoic Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources.** London Geological Society Special Publication, 350, 25-51, 2011.

PEDROSA-SOARES, A. C. NOCE, C. M., WIEDEMANN, C. M. PINTO, C. P. **The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly.** Precambrian Research, 110, 307–323, 2001a.

PEDROSA-SOARES, A.C., PINTO, C.P., NETTO, C., ARAUJO, M.C, CASTAÑEDA, C., ACHTSCHIN, A. B. & BASÍLIO, M.S. **A Província Gemológica Oriental do Brasil.** In: Castaneda, C., Addad, J. E. & Liccardo, A. (eds) Gemas De Minas Gerais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia, 16–33, 2001b.

PEDROSA-SOARES, A. C., NOCE, C. M. ALKMIM, F. F., SILVA, L. C., BABINSKI, M., CORDANI, U., CASTAÑEDA, C . **Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977.** Geonomos, 15, 1–16, 2007.

PEDROSA-SOARES, A. C., ALKMIM, F. F., TACK, L., NOCE, C. M., BABINSKI, M., SILVA, L. C. & MARTINS-NETO, M. A. **Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí -West Congo orogen.** In: Pankhurst, R. J., Trouw, R. A. J., Brito Neves, B. B. & De Wit, M. J. (eds), West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. Geological Society, London, Special Publications, 294, 153-172, 2008.

PEDROSA-SOARES, A. C., CHAVES, M. L. S. C., SCHOLZ, R., & DIAS, C. , H. **PEG2009 Pre-Symposium Field Trip Guide: Eastern Brazilian Pegmatite Province (Minas Gerais).** Estudos Geológicos, 32 (2), 37-51. 2022. ISSN: 1980-8208. DOI <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v32n2p37-51>.

PEDROSA-SOARES, A. C. PINTO, C. P., NETTO, C., Araújo, M. C., Castañeda, C., Achtschin, A. B. & Basílio, M. S. A **Província Gemológica Oriental do Brasil.** In: Castañeda C., Addad J. E. & Liccardo A. (eds),

Gemas de Minas Gerais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia, 16-33, 2001c.

PEIRO, L.T., MENDEZ, G.V., AYRES, R.U.. **Lithium: Sources, production, uses, and recovery outlook**. JOM 65, 8, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4>  
PEÑA, J.M., LOZANO, J.A., LARRAÑAGA, P. **An empirical comparison of four initialization methods for the k-means algorithm**. Pattern Recognit. Lett. 20, 1027–1040. 1999.

PINTO, C. P., & PEDROSA-SOARES, A. C. **Brazilian gem provinces**. Australian Gemmologist, 21, 12-16, 2001.

POUR, A. B., HASHIM, M., HONG, J.K., PARK, Y. **Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: north-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula**. Ore Geol. Rev. 108, 112–133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.018>.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. 2024. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

ROMEIRO J.C.P. **Controle da mineralização de lítio em pegmatitos da Mina da Cachoira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG**. Dissertação de mestrado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 94 p, 1998.

REN, Z., SUN, L., & ZHAI, Q. **Improved k-means and spectral matching for hyperspectral mineral mapping**. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation, 91, 102154, 2020.

ROSSI, C., BATESON, L., BAYARAA, M., BUTCHER, A., FORD, J., HUGHES, A. **Framework for remote sensing and modelling of lithium-brine deposit formation**. Remote Sens. 14, 1383, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061383>.

SERRI, G., INNOCENTI, F., MANETTI, P. **Geochemical and petrological evidence of the subduction of delaminated Adriatic continental lithosphere in the genesis of the Neogene-Quaternary magmatism of central Italy**. Tectonophysics 223, 117– 147, 1993.

SCHAEFER, L. ,N.; KERESZTURI, G.; VILLENEUVE, M.; KENNEDY, B. **Determining physical and mechanical volcanic rock properties via reflectance spectroscopy** J. Volcanol. Geotherm. Res., 420, 2021 ,Article ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107393>.

SILVA, L. C., MCNAUGHTON, N., ARMSTRONG, R., HARTMANN, L. & FLETCHER, I. **The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections**. Precambrian Research, 136, 203–240, 2005.

SINGH, Y. **Lithium potential of the Indian granitic pegmatites**. J. Geol. Soc.India 98, 917–925, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2095-x>.

SOBRINO, J., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. & PAOLINI, L. **Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 Remote Sensing of Environment**, Elsevier, 90, 434-440,2004.

SRINIVASARAO, B., GUPTA, A.K., SHUKLA, A.K., MARKANDEYULU, A., RAJENDRAN, R., CHOUDHURY, D.K. **Application of microgravity survey in the exploration of rare-metal bearing pegmatites - A case study from Marlagalla, Mandya District, Karnataka**. J. Geol. Soc. India 98, 1126–1130, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2133-8>

STEINER, B.M. **Tools and workflows for grassroots Li–Cs–Ta (LCT) pegmatite exploration**. Minerals 9, 499, 2019. <https://doi.org/10.3390/min9080499>.

SUN, XIN; OUYANG, MINGGAO; HAO, HAN. **Surging lithium price will not impede the electric vehicle boom**. Joule, [s. l.], v. 6, p. 1727-1742, 2022. Disponível em: [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(22\)00302-6](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(22)00302-6). Acesso em: 7 out. 2024.

TANGESTANI, M., H. T., SHAYEGANPOUR S. **Mapping a lithologically complex terrain using Sentinel-2A data: a case study of Suriyan area, southwestern Iran**, International Journal of Remote Sensing, 41:9, 3558-3574, 2020. DOI: 10.1080/01431161.2019.1706203.

TKACHEV, A., V. **Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geologic time**. In: Sial AN, Bettencourt JS, De Campos CP (eds) **Granite-Related Ore Deposits**. Geological Society of London Special Publication 350, pp 7-23, 2011.

TZORTZIS, G., LIKAS, A., **The minmax k-means clustering algorithm**. Pattern Recognit.47 (7), 2505–2516,2014.

V. BALARAM, M. SANTOSH, M. SATYANARAYANAN, N. SRINIVAS, HARISH GUPTA. **Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact**, *Geoscience Frontiers*, Volume 15, Issue 5,2024,101868,ISSN 1674-9871, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101868>.

VAN DE VEN, M., GAZLEY, M., STERK, R., ALDRICH, S., WERNER, E.. **Exploration for Lithium-Caesium-Tantalum (LCT) pegmatites in New Zealand**. In: Conference Paper New Zealand Minerals Forum, pp. 87–91,2020.

VAN RUITENBEEK, F. J., GOSELING, J., BAKKER, W. H. & HEIN, K. A.. **Shannon entropy as an indicator for sorting processes in hydrothermal systems**. Entropy. 22(6), 656,2020. <https://doi.org/10.3390/e22060656>.

ZHANG, H., TIAN, S., WANG, D., LI, X., LIU, T., ZHANG, Y.J., FU, X.F., HAO, X.F., HOU, K.J., ZHAO, Y., QIN, Y.. **Lithium isotope behaviour during magmatic differentiation and fluid exsolution in the Jiajika granite–pegmatite deposit, Sichuan, China**. Ore Geol. Rev. 134, 104139. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104139>.

ZHAO, H., WANG, Y., CHENG, H. **Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals.** *Hydrometallurgy* 217, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106025>,2023.