



**Universidade Federal de Campina Grande
Pró-Reitoria de Pós-Graduação
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN)
Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral (PPGEPM)
Dissertação de Mestrado**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS
PEGMATITOS LITINÍFEROS NA REGIÃO DO SERIDÓ, ENTRE OS ESTADOS DA
PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE**

LORDANA FONTINELI DANTAS

Campina Grande, PB
Setembro, 2023

LORDANA FONTINELI DANTAS

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS
PEGMATITOS LITINÍFEROS NA REGIÃO DO SERIDÓ, ENTRE OS ESTADOS DA
PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral (PPGEPM) da Universidade Federal de Campina Grande - PB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles (UAMG-UFCG)

Coorientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves (UAEMa-UFCG)

Campina Grande, PB

Setembro, 2023

D192i

Dantas, Lordana Fontineli.

Identificação e caracterização dos pegmatitos litiníferos na região do Seridó, entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte / Lordana Fontineli Dantas. – Campina Grande, 2024.

115 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves".

Referências.

1. Exploração Mineral. 2. Lítio. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Aerogeofísica. 5. Caracterização Mineral. 6. Província Pegmatítica da Borborema. I. Teles, Guilherme dos Santos. II. Neves, Gelmires de Araújo. III. Título.

CDU 622.01(043)

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS
PEGMATITOS LITINÍFEROS NA REGIÃO DO SERIDÓ ENTRE OS ESTADOS DA
PARAÍBA E DO RIO GRANDE DO NORTE**

LORDANA FONTINELI DANTAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À PÓS-GRADUAÇÃO EM
EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL.**

Campina Grande - PB, Setembro de 2023.

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME DOS SANTOS TELES**
Data: 17/04/2024 12:04:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles (UFCG)

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ CARLOS BERTOLINO**
Data: 06/05/2024 10:55:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 1: Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino (Membro Interno – CETEM/UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO VALDIR SILVEIRA**
Data: 09/05/2024 10:45:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 2: Dr. Francisco Valdir Silveira (Membro Externo – SGB)

Dedicatória

Dedico ao meu filho, Apolo, um ser humano tão pequeno, mas que carrega uma grandeza capaz de mudar o curso da vida. Quem sempre me amparou e me deu tanta força para seguir adiante. Te amo incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Foram tantos os seres iluminados que me acompanharam nessa jornada, que talvez não haja páginas suficientes para demonstrar tamanha gratidão que sinto por todos os que contribuíram de alguma forma na realização do sonho de me aperfeiçoar cada vez mais nessa ciência tão desafiadora e, proporcionalmente, encantadora, que é a ciência da Terra.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu filho Apolo, que ainda é tão pequeno em tamanho e idade, mas é de uma grandeza imensurável na minha vida. A pessoa que sempre me impulsionou a ser melhor e buscar crescer na vida, quem me deu força nos momentos mais difíceis e com quem eu quero celebrar todas as conquistas. A você, meu filho, eu dedico todo o meu amor e gratidão.

Aos meus pais, que não só me deram a vida, mas também desempenharam um papel fundamental na minha educação, sempre estimulando a sensibilidade do olhar para a natureza ao nosso redor e aprender a apreciá-la. Minha mãe, Telma, que é um exemplo de mulher forte e que nunca desiste dos sonhos e da liberdade, com quem tenho uma conexão sobrenatural e que sempre foi e será um pilar fundamental em minha caminhada. Meu pai, Gaspar, uma grande inspiração no amor pela natureza e que me ensinou a carregar todas as pedrinhas que apareciam pelo caminho. Com elas estou construindo meu castelo, e parte disso eu devo ao senhor, por nunca deixar meus estudos de lado e sempre me ensinar a correr atrás do sucesso. Essa conquista é nossa, e agora a filha de vocês é mestra!

Gratidão ao meu parceiro de jornada, Pedro, que sempre me apoiou desde quando começamos nossa história juntos. Você é um homem incrível, e eu amo saber que posso contar com você para qualquer coisa. Hoje nosso amor tem o melhor fruto que eu poderia imaginar, e ainda viveremos muitas aventuras juntos. Também agradeço à minha sogra, Paula, também chamada de mãe-postiça, que desempenha um papel fundamental na minha independência e empoderamento feminino. Você é uma mulher inspiradora, e sou grata por te ter como amiga e contar contigo como rede de apoio.

Agradeço aos meus irmãos, Gabriel, Laila e Lavínia, aos meus avós, Terezinha e Duca, e às minhas tias-mães, Sandra e Silmara, que são minha querida “Família

Buscapé”, e que sempre me ensinaram a ser verdadeira, honesta, brincalhona e autêntica. A vocês eu também dedico essa conquista, e agradeço por sempre me apoiarem em todos os momentos. Vocês são a melhor família que eu poderia ter, e eu amo demais compartilhar a raiz seridoense com vocês.

Agradeço à minha terapeuta Ingrid, mulher maravilhosa que me auxiliou em todo o processo, sempre me desafiando a ser cada vez mais corajosa e acreditar no meu potencial, e que também segurou a minha mão em tantos momentos difíceis ao longo desse último ano. A concretização desse sonho também tem a sua força. Sou grata por ter em você uma grande amiga, e por poder acessar todo o meu potencial através do processo terapêutico que você proporciona. Sexta-feira nós comemoramos mais essa conquista com o barril de Galega do Alecrim.

Também agradeço ao meu querido orientador e amigo, Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles, que topou desenvolver esse projeto junto comigo, me ensinou tanto sobre geologia e sobre a vida, sempre sendo tão compreensivo e aberto à conversa. Te admiro demais como profissional e como ser humano. Saiba que você está cumprindo sua missão no mundo da geologia com muito louvor, e está abrindo os caminhos para que outras pessoas com uma ideologia semelhante ocupem lugares de liderança nessa área, que ainda é tão limitada.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, pelo incentivo durante o desenvolvimento do projeto, e por todo o auxílio nas análises químicas das amostras. Aos meus queridos colegas de grupo, Heleno e Josenildo, pela parceria em todo o processo, por serem ótimos companheiros de campo e por me darem uma força tão grande nas análises geoquímicas e de sensoriamento remoto. Vocês contribuíram de uma maneira “surreal” para a realização desse projeto, e sou muito grata pela parceria.

Também agradeço à colega Thaila Ravena, ao Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas, ao Prof. Dr. Vinícius Anselmo Lisboa, ao Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino e ao colega e geólogo excepcional, Dr. Francisco Valdir da Silveira, que também contribuíram para a realização deste trabalho, com ideias e debates sobre os pegmatitos da Borborema.

Ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEPM/UFCG), pela possibilidade de concretização do mestrado em Exploração Mineral.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ, pelo apoio e aporte financeiro, possibilitando a produção desta pesquisa.

À equipe da Seequent, por serem tão solícitos e disponibilizarem o acesso ao programa Oasis Montaj™, possibilitando a elaboração dos mapas geofísicos da área de estudo.

*Que nada nos defina, que nada nos
sujete. Que a liberdade seja a nossa
própria substância, já que viver é ser livre
(Simone de Beauvoir).*

RESUMO

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), inserida na região do Seridó, possui ocorrências historicamente conhecidas de minerais industriais, gemas, e elementos raros (Li, Ta-Nb, Be e Sn) associadas a pegmatitos. No entanto, o verdadeiro potencial econômico da PPB é desconhecido, em virtude da carência de estudos do ponto de vista prospectivo. O recente aumento da demanda mundial por lítio, associado à fabricação de baterias para veículos elétricos, tem retomado a atenção pela prospecção mineral em pegmatitos. Neste contexto, a principal finalidade deste trabalho é identificar e caracterizar os pegmatitos litiníferos da PPB, na região do Seridó, entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com vistas a contribuir para o conhecimento geológico da área e fomentar futuros trabalhos prospectivos na região. Para tanto, foram utilizados dados de sensores remotos multifonte, para identificação de áreas de interesse econômico, seguida da checagem em campo dessas áreas com potenciais ocorrências de minerais de lítio associadas a pegmatitos (ex. espodumênio, lepidolita e ambligonita). Os métodos de análise remota utilizados foram o sensoriamento remoto e a aerogeofísica, sendo o primeiro correspondente ao processamento digital de imagens de satélite (Landsat-8 e Sentinel-2), com a elaboração de composições coloridas (RGB), razões de banda e análise de principal componente (PCA). Para os dados aerogeofísicos, foi realizada a análise de dados magnéticos, através de mapas temáticos de amplitude do sinal analítico e derivada vertical, bem como de dados gamaespectrométricos, através de mapas temáticos de composição ternária, concentrações de eK, eTh e eU. A etapa de campo baseou-se na checagem e descrição dos corpos pegmatíticos presentes na área de estudo, identificados nos dados de sensoriamento remoto, bem como na coleta de amostras dos potenciais minerais portadores de lítio para caracterização mineral. A eficácia dos métodos empregados pode ser comprovada pela identificação de corpos pegmatíticos já mapeados previamente, além de análises mineralógicas, como a Difração de Raios X (DRX), que comprovaram a presença dos minerais espodumênio, lepidolita e ambligonita. A integração dos dados obtidos até o momento proporcionou uma compreensão mais completa da geologia da área de estudo, considerando-se os aspectos geológicos que podem influenciar na ocorrência de pegmatitos portadores de lítio, bem como validou a abordagem empregada para reconhecimento das potencialidades de exploração do elemento nos pegmatitos da região. No entanto, a metodologia apresenta limitações que impediram a obtenção de resultados mais satisfatórios e uma maior eficiência, como por exemplo a resolução espacial dos sensores de cada satélite, que dificultou identificar corpos de pequenas dimensões, além da assinatura espectral dos minerais analisados, que pode ser afetada pelo contexto geológico ou impurezas presentes nos pegmatitos, o que impossibilitou mapear outros possíveis alvos litiníferos.

Palavras-chave: Lítio; Sensoriamento Remoto; Aerogeofísica; Caracterização Mineral; Província Pegmatítica da Borborema.

ABSTRACT

The Borborema Pegmatitic Province (PPB), located in the Seridó region, has historically known occurrences of industrial minerals, gems, and rare elements (Li, Ta-Nb, Be and Sn) associated with pegmatites. However, the true economic potential of PPB is unknown, due to the lack of studies from a prospective point of view. The recent increase in world demand for lithium, associated with the manufacture of batteries for electric vehicles, has regained attention for mineral prospecting in pegmatites. In this context, the main purpose of this work is to identify and characterize the lithiniferous pegmatites of the PPB, in the Seridó region, between the states of Paraíba and Rio Grande do Norte, with a view to contributing to the geological knowledge of the area and promoting future prospective works in the area. For that, data from remote multi-source sensors were used to identify areas of economic interest, followed by field checking of these areas with potential occurrences of lithium minerals associated with pegmatites (eg spodumene, lepidolite and amblygonite). The remote analysis methods used were remote sensing and aerogeophysics, the first being the digital processing of satellite images (Landsat-8 and Sentinel-2), with the elaboration of color compositions (RGB), band ratios and analysis. component (PCA). For the aerogeophysical data, the analysis of magnetic data was performed, through thematic maps of analytical signal amplitude and vertical derivative, as well as gamma spectrometric data, through thematic maps of ternary composition, concentrations of eK, eTh e eU. The field stage was based on checking and describing the pegmatitic bodies present in the study area, identified in the remote sensing data, as well as on collecting samples of potential lithium-bearing minerals for mineral characterization. The effectiveness can be proven by the identification of previously mapped pegmatitic bodies, in addition to mineralogical analysis, such as X-Ray Diffraction (XRD) that confirmed the minerals of spodumene, lepidolite and amblygonite. The integration of the data obtained so far provided a more complete understanding of the geology of the study area, considering the geological aspects that may influence the occurrence of lithium-bearing pegmatites, as well as validating the approach used to recognize the potential for exploration of the element in the pegmatites of the region. However, the methodology has limitations that prevented obtaining more satisfactory results and greater efficiency, such as the spatial resolution of the sensors of each satellite, which prevents the identification of small bodies, in addition to the spectral signature of the analyzed minerals, which can be affected by the geological context or impurities present in the pegmatites, which prevented the mapping of other possible lithiniferous targets.

Keywords: Lithium; Remote Sensing; Aerogeophysics; Mineral Characterization; Borborema Pegmatitic Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de ocorrência de pegmatitos litiníferos, abrangendo os municípios de Picuí/PB, Nova Palmeira/PB, Pedra Lavrada/PB; e Equador/RN, Parelhas/RN e Carnaúba dos Dantas/RN	19
Figura 2 - Compartimentação geológica de parte da Província Borborema, com destaque para os Domínios São José do Campestre, Rio Piranhas-Seridó e Jaguaribeano, citados de leste a oeste	24
Figura 3 - Coluna estratigráfica do Grupo Seridó	26
Figura 4 - Relações estruturais entre pegmatitos e suas encaixantes	30
Figura 5 - Evolução química ao longo de um grupo pegmatítico rico em Lítio com a distância do granito	32
Figura 6 - Classificação estrutural dos pegmatitos	34
Figura 7 - Estrutura interna de pegmatitos zonados em seção horizontal, na qual é possível observar o padrão concêntrico das zonas bem como a distribuição mineralógica e textural comumente observada nesses corpos	39
Figura 8 - Modelo esquemático (sem escala) do padrão de zonação regional ideal em um campo pegmatítico, adaptado por Galeschuk e Vanstone (2005) a partir de Trueman e Černý (1982). Se a figura for considerada como um corte, os granitos pegmatíticos ilustrados estariam posicionados na cúpula do granito parental	41
Figura 9 - Campo de captação de um espectrômetro de raios gama aerotransportado. Esta figura mostra, para um espaço uniforme, o tamanho da área no solo de onde vêm os fótons gama registrados pelo detector	44
Figura 10 - Aquisição de dado magnético através de aeromagnetômetro e identificação de anomalia magnética causada por uma falha geológica	47
Figura 11 - Esquema do fenômeno de difração relatado por Bragg	50
Figura 12 - Organograma representando a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho	52
Figura 13 - Fluxograma esquemático das etapas do geoprocessamento	53
Figura 14 - Britador de Mandíbulas	62
Figura 15 - Moinho de Bolas	63
Figura 16 - Espectrômetro de Raios X	64
Figura 17. Difratorômetro de Raios X	65

Figura 18 - Mapa geológico da área de estudo	67
Figura 19 - Imagens obtidas para a combinação RGB proposta. a) Combinação 3-2-11 para Landsat-8. b) Combinação 3-2-12 para Sentinel-2. As possíveis zonas mineralizadas em lítio correspondem aos pixels de cor amarelo/dourado	69
Figura 20 - Resultado da divisão de bandas propostas para mapeamento da lepidolita	70
Figura 21 - Resultado da divisão de bandas propostas para mapeamento do espodumênio.....	71
Figura 22 - Imagens obtidas com conjunto de PCs, para mapeamento de lepidolita e espodumênio. Zonas com possíveis mineralizações apresentam pixels vermelhos e estão destacadas em preto	73
Figura 23 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	75
Figura 24 - Mapa de Derivada Vertical (DZ).....	76
Figura 25 - Mapa de Concentração do Elemento Potássio (K)	77
Figura 26 - Mapa de Concentração do Elemento Urânio (U)	78
Figura 27 - Mapa de Concentração do Elemento Tório (Th)	79
Figura 28 - Mapa de Composição RGB	80
Figura 29 - Pegmatito Capoeira. A) Contato entre pegmatito e metaconglomerado, formação de feldspatos alcalinos e turmalinas pretas na zona de borda do pegmatito; B) Bolsão de muscovita na zona intermediária do pegmatito (tracejado amarelo); e C) Intercrescimento de quartzo e albita com textura gráfica	83
Figura 30 - Pegmatito Capoeira. A) Contato entre pegmatito e rocha encaixante; B) Detalhe do contato, mostrando cristais de schorlita perpendiculares à parede da encaixante; C) Transição entre zona intermediária e núcleo de quartzo, com desenvolvimento de minerais de lítio, como espodumênio de colorações variadas e lepidolita; e D) Detalhe de cristais métricos de espodumênio próximo ao núcleo de quartzo	85
Figura 31 - Pegmatito Salgadinho. A) e B) Conjunto de falhas cortando o corpo pegmatítico (tracejado branco); C) e D) Cristais de espodumênio na zona intermediária (seta azul).....	86
Figura 32 - Pegmatito Serra Branca. A) Zona intermediária explorada pela mineração; B) Cristal de Ambligonita coletado na zona intermediária do pegmatito; e C) Bolsão de potencial fosfato de lítio (seta preta) e formação de cristais de alteração - pirita (seta	

amarela)	88
Figura 33 - Pegmatitos visitados durante a segunda campanha de campo, onde foi possível observar apenas partes do corpo ou material do rejeito. A) Espodumênio no pegmatito Pendanga; B) Espodumênio no pegmatito Tibiri; e C) Fosfato de Li (trifilita) no pegmatito Quintos de Cima e D) Espodumênios no pegmatito Kombi. Seta preta indicando minerais de Li.....	89
Figura 34 - Amostras de espodumênio coletadas no pegmatito Capoeira e difratogramas (E: espodumênio)	91
Figura 35 - Difratograma resultante da análise feita na amostra de espodumênio do pegmatito Salgadinho (E: espodumênio)	92
Figura 36 - Difratograma resultante da análise feita na amostra de espodumênio alterado do pegmatito pendanga (C: caulinita; M: muscovita).....	93
Figura 37 - Difratograma resultante da análise feita nas amostras de espodumênio do pegmatito Quintos (E: espodumênio)	94
Figura 38 - Difratograma resultante da análise feita nas amostras de lepidolita do pegmatito Quintos (LEP01) e Capoeira (LEP02) (L: lepidolita; M: muscovita)	95
Figura 39 - Difratograma resultante da análise feita nas amostras de amblygonita do pegmatito Serra Branca (A: Amblygonita)	96
Figura 40 - Difratograma resultante da análise feita nas amostras de ferrisicklerita do pegmatito Serra Branca (F: ferrisicklerita).....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais minerais de lítio em pegmatitos	21
Tabela 2 - Sistema de classificação de grupos pegmatíticos	36
Tabela 3 - Associações mineralógicas das zonas pegmatíticas.....	38
Tabela 4 - Minerais radioativos e suas respectivas ocorrências	46
Tabela 5 - Características dos satélites e sensores utilizados	54
Tabela 6 - Combinações RGB utilizadas.....	56
Tabela 7 - Divisão de bandas utilizadas.....	56
Tabela 8 - Conjunto de bandas aplicadas no PCA.....	57
Tabela 9 - Concentração média de radioelementos em rochas ígneas	60
Tabela 10 - Conjunto de bandas aplicadas no PCA.....	72
Tabela 11 - Percentual de óxidos dos espodumênio coletados no projeto	98
Tabela 12 - Percentual de óxidos das ambligonitas coletadas no pegmatito Serra Branca.....	99
Tabela 13 - Percentual de óxidos da ferrisicklerita coletada no pegmatito Serra Branca.....	99
Tabela 14 - Percentual de óxidos da lepidolita coletada no pegmatito Quintos	100

LISTA DE SIGLAS

ARIM	Áreas de Relevante Interesse Mineral
B	Boro
Be	Berílio
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Cs	Césio
DN's	Digital Numbers
DRX	Difração de Raios X
ETR	Elemento Terra Rara
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
F	Flúor
FRX	Fluorescência de Raios X
FS	Formação Seridó
Ga	Bilhões de anos
GS	Grupo Seridó
LCT	Lítio-Césio-Tântalo
Li	Lítio
MSI	Multispectral Instrument
Nb	Nióbio
NIR	Near Infra-Red
NYF:	Nióbio-Ítrio-Fluor
PCA	Principal Component Analysis
OLI	Operational Land Imager
P	Fósforo
PAN	Pancromática
PB	Paraíba
PC	Pegmatito Capoeira
PC's	Principal Components
PD	Pegmatito Pendanga
PDI	Processamento Digital de Imagem
PPB	Província Pegmatítica da Borborema
PPS	Província Pegmatítica do Seridó

PQB	Pegmatito Quintas de Baixo
PS	Piranhas-Seridó
PSB	Pegmatito Serra Branca
PT	Pegmatito Tibiri
Rb	Rubídio
RGB	Red-Green-Blue
RN	Rio Grande do Norte
SIG	Sistema de Informação Geográfica
Sn	Estanho
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
SWIR	Short Wave Infra-Red
Ta	Tântalo
TIR	Thermal Infra-Red
TIRS	Thermal Infra-Red Sensor
TOA	Top of Atmosphere
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VNIR	Visible Near Infra-Red

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Apresentação	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Lítio no Brasil e no mundo.....	20
2	CONTEXTO GEOLÓGICO	23
2.1	Província Borborema e Domínio Rio Piranhas-Seridó	23
2.2	Embasamento Gnaissico-Migmatítico (Complexo Caicó)	24
2.3	Grupo Seridó	25
2.4	Granitóides Brasileiros	27
2.5	Província Pegmatítica da Borborema.....	28
3	REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1	Definições e Gênese dos Pegmatitos	31
3.2	Classificação de Pegmatitos	33
3.3	Zonação dos Pegmatitos	37
3.4	Sensoriamento Remoto e PDI.....	41
3.5	Aerogeofísica	43
3.5.1	Gamaespectrometria	44
3.5.2	Magnetometria.....	46
3.6	Técnicas analíticas para a caracterização mineral.....	48
3.6.1	Fluorescência de Raios X.....	48
3.6.2	Difratometria de Raios X.....	50
4	METODOLOGIA	52
4.1	Revisão Bibliográfica.....	52
4.2	Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento	53
4.2.1	Combinações RGB	55
4.2.2	Divisão de bandas	56
4.2.3	Análise de componente principal (PCA)	56
4.3	Aerogeofísica	57
4.3.1	Magnetometria.....	58
4.3.2	Gamaespectrometria	59
4.4	Trabalhos de Campo e Coleta de Amostras	60

4.5	Caracterização dos Minerais de Lítio	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1	Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto	68
5.1.1	Combinações RGB	68
5.1.2	Divisão de Bandas.....	69
5.1.3	Análise de Principal Componente (PCA)	71
5.2	Aerogeofísica	74
5.2.1	Dados Magnéticos	74
5.2.2	Dados Gamaespectrométricos	76
5.3	Trabalhos de Campo.....	80
5.4	Caracterização Mineral	89
5.4.1	Difratometria de Raios X.....	90
5.4.2	Fluorescência de Raios X.....	97
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
	REFERÊNCIAS.....	103
	ANEXO.....	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Na região da Província Borborema (Almeida *et al.*, 1981), ao longo da Faixa Seridó, há uma zona de ocorrência significativa de pegmatitos, denominada de Província Pegmatítica da Borborema – PPB (Scorza, 1944), a qual abrange parte dos Estados da Paraíba (PB) e do Rio Grande do Norte (RN). Nessa província existem importantes reservas estratégicas de minerais industriais, gemas e elementos raros para o Brasil, conhecidas desde a década de 1930, destacando-se os pegmatitos mineralizados em Li, Ta-Nb, Be, Sn (Johnston Jr., 1945; Soares, 2004; Beurlen *et al.*, 2014).

Os pegmatitos da PPB são classificados como pegmatitos de elementos raros do tipo LCT (Lítio-Césio-Tântalo), baseados na mineralogia e geoquímica (Baumgartner *et al.*, 2006; Černý e Ercit, 2005). Estes pegmatitos são quimicamente evoluídos e caracterizados por elementos como Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga e Ta e subsidiariamente B, P e F e Ta > Nb (Figura 1). Baumgartner *et al.* (2006) confirmaram uma composição mineralógica granítica, com K-feldspato, albita, quartzo, muscovita e esporádica biotita para os pegmatitos heterogêneos estudados. Na PPB é relatada também uma grande variedade de minerais acessórios, superior a uma centena de espécies diferentes, de ocorrência nos pegmatitos heterogêneos (Moura, 2013).

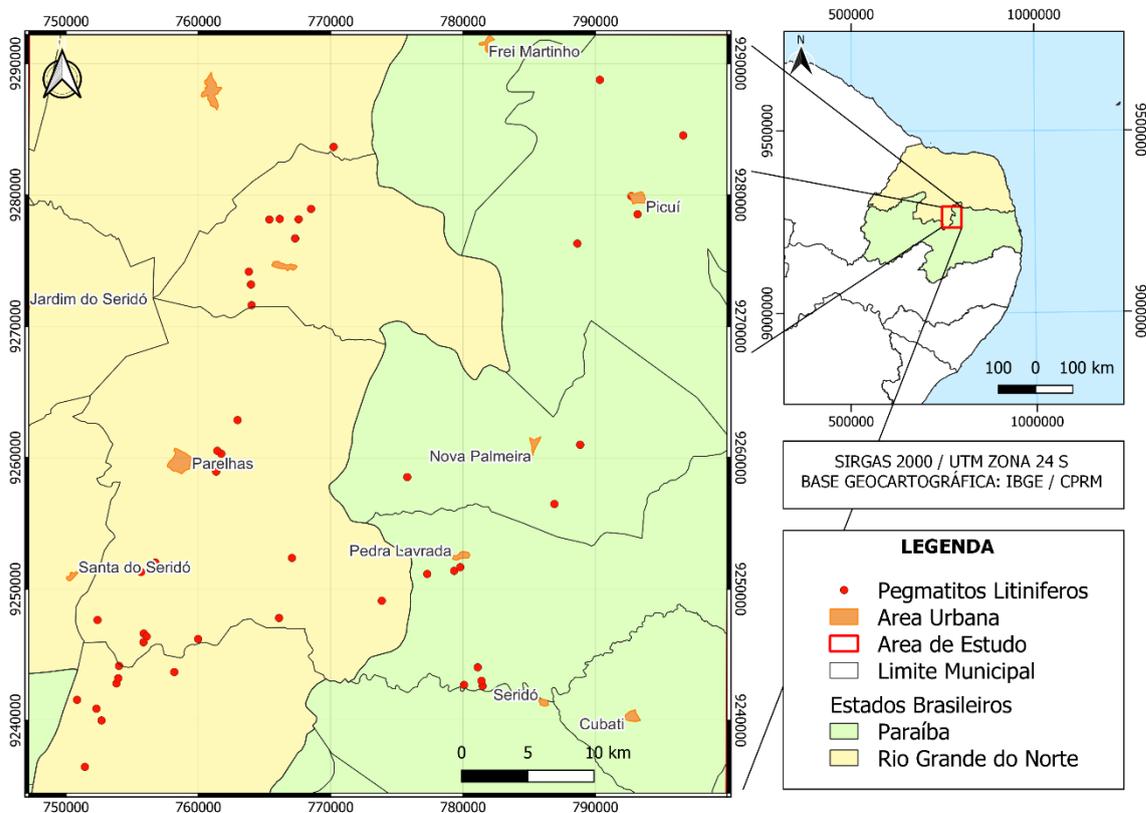
Estudos realizados nas rochas da PPB indicam a interação de fluidos hidrotermais ígneos com as rochas encaixantes metassedimentares da Faixa Seridó no final do Ciclo Brasileiro na região (450 - 553 Ma; Beurlen *et al.*, 2014). Este processo pode ter sido responsável pela formação dos pegmatitos mineralizados em metais raros, os quais podem abrigar importantes reservas de Lítio (Veras *et al.*, 2018).

Em virtude do potencial litinífero da PPB, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, desenvolveu o projeto “Avaliação do potencial de Lítio no Brasil – Área: Província Pegmatítica da Borborema” (CPRM, 2022) para guiar trabalhos prospectivos na região. A Figura 1 apresenta um recorte da área de estudo contendo os pegmatitos litiníferos reconhecidos no projeto, com potencial econômico para exploração mineral

em municípios na divisa entre a Paraíba e o Rio Grande do Norte.

Mesmo havendo uma atenção maior à região da Província Pegmatítica da Borborema nos últimos tempos, especialmente após a recente publicação do informe de recursos minerais voltado para as ocorrências litiníferas da província, pela CPRM (2022), esta região ainda carece de estudos mais detalhados, do ponto de vista prospectivo, para desvendar o verdadeiro potencial econômico do lítio.

Figura 1 - Mapa de ocorrência de pegmatitos litiníferos, abrangendo os municípios de Picuí/PB, Nova Palmeira/PB, Pedra Lavrada/PB; e Equador/RN, Parelhas/RN e Carnaúba dos Dantas/RN



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

1.2 OBJETIVOS

A principal finalidade deste estudo é identificar e caracterizar os pegmatitos litiníferos da PPB, na região do Seridó, entre os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com vistas a contribuir para o conhecimento geológico da área e fomentar futuros trabalhos prospectivos na região.

De maneira específica, este estudo visa:

- Identificar os pegmatitos com potencial litinífero na região;
- Realizar o mapeamento geológico nos corpos identificados.
- Caracterizar os minerais portadores de lítio nos pegmatitos estudados;
- Integrar produtos baseados nas interpretações petrográficas, geoquímicas, geofísicas e espectrais dos pegmatitos portadores de minérios de Li, com vistas a definir parâmetros que caracterizem o controle mineralógico de Li à luz da exploração mineral;
- Avaliar o potencial econômico para Li, visando ao desenvolvimento socioeconômico sustentável da região.

1.3 LÍTIO NO BRASIL E NO MUNDO

Com o aumento na demanda mundial de Lítio, em virtude da transição da matriz energética com menores emissões de carbono, inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos, de modo a suprir as necessidades da indústria (Choubey *et al.*, 2016; Cardoso-Fernandes; Teodoro; Lima, 2019; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020; Steiner, 2019), com projeção em diversos nichos. Por exemplo, no mercado de telefonia móvel, eletrônicos portáteis, cerâmicas e vidros, graxas e lubrificantes, produção de polímeros, na indústria farmacêutica, no sistema de armazenamento de energias renováveis e no potencial mercado dos veículos elétricos e híbridos (Bibienne *et al.*, 2020). Esse movimento reforça a importância estratégica dos pegmatitos como fonte fundamental de minérios de Li (Linnen *et al.*, 2012; Müller *et al.*, 2022), uma vez que 25% da oferta mundial desse elemento está relacionada aos pegmatitos (Sweetapple, 2013).

Segundo relatório do Sumário de *Commodities* Minerais do Serviço Geológico Americano (USGS, 2022), nos últimos anos, diversas alianças estratégicas e *joint ventures* entre empresas de tecnologia e de exploração mineral vêm sendo estabelecidas como forma de garantir um fornecimento confiável e diversificado de lítio para fornecedores de baterias e fabricantes de veículos.

Neste sentido, o Brasil encontra-se na rota de interesse do mercado do lítio, visto que apresenta pelo menos sete regiões com ocorrências de províncias pegmatíticas com presença de lítio, como por exemplo as áreas do Médio Rio

Jequitinhonha, Província Pegmatítica da Borborema, Subprovíncia de Solonópole, Região Leste de Minas, Província Pegmatítica de São João del Rei, Noroeste do Rio de Janeiro, Região de Itambé e Sul de Tocantins (Santos *et al.*, 2020). A PPB apresenta uma das mais expressivas concentrações de pegmatitos do Brasil, além de possuir ocorrências historicamente conhecidas de minerais industriais, gemas, e elementos raros (Li, Ta-Nb, Be e Sn) associados a pegmatitos.

Os principais minerais que contém lítio nos pegmatitos, em ordem de importância econômica, são: espodumênio, petalita, lepidolita-zinnwaldita, ambligonita-montebrazita, eucryptita e trifilita (Tabela 1). O espodumênio ainda é o mineral economicamente mais significativo e com maior distribuição mundial, enquanto a lepidolita e a zinnwaldita vêm se destacando como minerais importantes para extração do lítio. A ambligonita foi beneficiada no início da exploração do lítio, enquanto outros minerais de lítio, como a petalita e a trifilita, são geograficamente mais restritos (Bowell *et al.*, 2020).

Tabela 1 - Principais minerais de lítio em pegmatitos

MINERAL	FÓRMULA	LI₂O (% EM PESO)
Espodumênio	LiAlSi ₂ O ₆	6-9
Eucryptita	LiAlSiO ₄	9,7
Trifilita	Li(Fe,Mn)PO ₄	9,47
Ambligonita	Li, Al(F,OH)PO ₄	7,4
Montebrazita	LiAl(PO ₄)(OH)	7,4
Jadarita	LiNaSiB ₃ O ₇ (OH)	7,3
Petalita	LiAlSi ₄ O ₁₀	4,73
Lepidolita	KLi ₂ Al(Si ₄ O ₁₀)(F,OH) ₂ a K(Li _{1.5} Al _{1.5})(AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	4,19
Zinwaldita	KFe ₂ +2Al(Al ₂ Si ₂ O ₁₀)(OH) ₂ a KLi ₂ Al(Si ₄ O ₁₀)(F,OH) ₂	2-5
Hectorita	Na _{0.3} (Mg,Li) ₃ (Si ₄ O ₁₀)(F,OH) ₂ ·nH ₂ O	1-3

Fonte: Bowell *et al.* (2020)

O beneficiamento dos minérios de lítio de pegmatitos e rochas associadas ocorre a partir da concentração de minerais portadores de lítio. Esses concentrados podem ser utilizados diretamente na fabricação de alguns tipos de vidros e cerâmicas. No entanto, na maior parte dos usos industriais, é necessário um maior processamento, formando sais de lítio purificados, como o carbonato de lítio (Li_2CO_3) e o hidróxido de lítio monohidratado ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$), este último cada vez mais usado nas novas tecnologias de baterias recarregáveis (Bibienne *et al.*, 2020).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 PROVÍNCIA BORBOREMA E DOMÍNIO RIO PIRANHAS-SERIDÓ

A Província Borborema compreende uma entidade geotectônica localizada no Nordeste do Brasil. Essa província contém uma faixa orogênica em sua porção central originada em decorrência de uma série de movimentos tectônicos colisionais que ocorreram no Neoproterozóico, evento denominado de orogênese Brasileira-Pan Africana, e que é considerado o principal processo geológico responsável pela estruturação do supercontinente Gondwana e posterior formação dos atuais continentes África e América do Sul (Almeida *et al.*, 1981; Santos *et al.*, 2008).

A sequência de eventos que formou a Província Borborema iniciou-se no Arqueano e teve seu clímax durante o Neoproterozoico Superior, caracterizando o denominado Ciclo Brasileiro/Panafricano, que provocou a colisão entre as placas São Francisco/Congo e São Luís/Oeste Africano, entre 0,75 a 0,55 Ga (Van Schmus *et al.*, 1995). As estruturas formadas durante esse evento são importantes delimitadoras dos blocos crustais da província, além de proporcionarem a acomodação de um volumoso plutonismo de idade ediacarana (Medeiros, 2004; Jardim de Sá *et al.*, 1998; Angelim *et al.*, 2006; Dantas *et al.*, 2013).

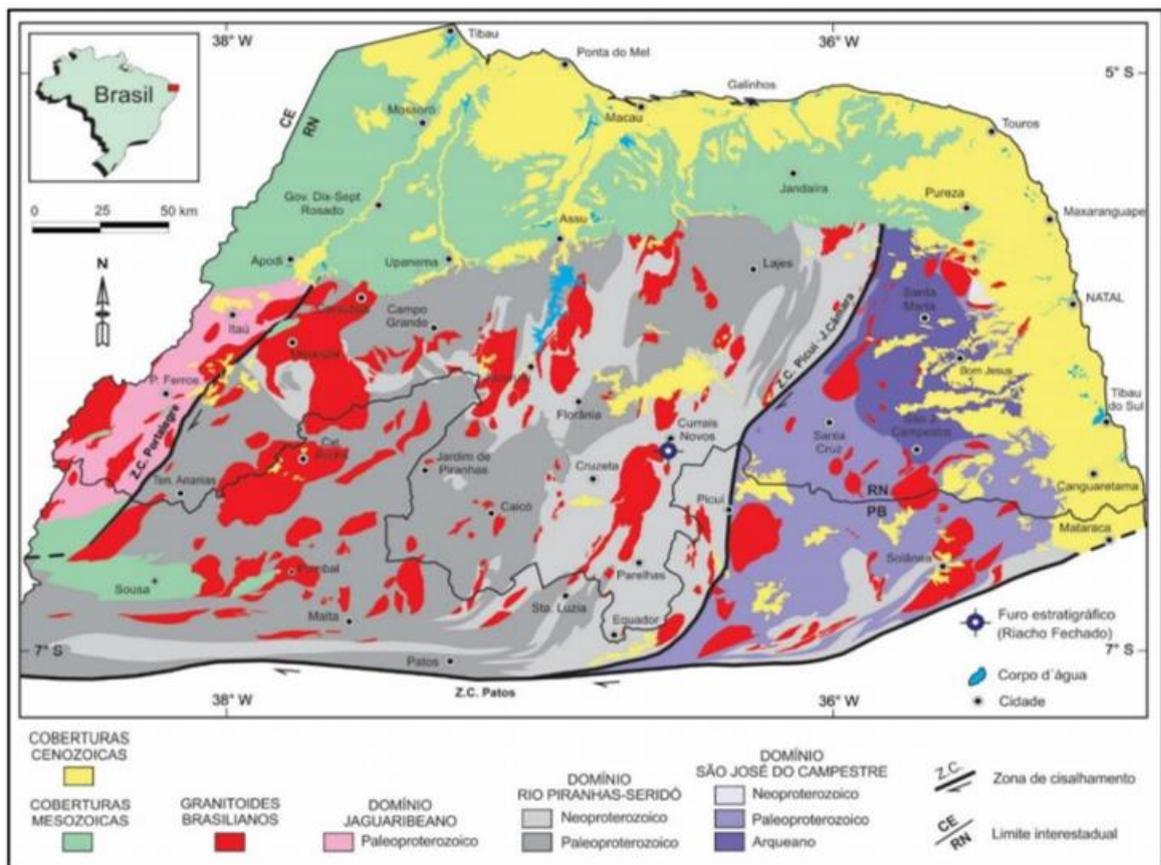
A Província Borborema é compartimentada em três importantes domínios geotectônicos. Neste trabalho será destacado o Domínio Rio Piranhas-Seridó (PS), onde está inserida a Província Pegmatítica da Borborema, hospedeira dos pegmatitos litiníferos.

Segundo Angelim (2006), o Domínio Rio Piranhas-Seridó limita-se tectonicamente ao oeste com o Domínio Jaguaribeano, pela zona de cisalhamento Portalegre; ao leste com o Domínio São José do Campestre, por meio da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara; ao norte com as rochas sedimentares da Bacia Potiguar; e ao Sul com o Domínio Zona Transversal, através da zona de cisalhamento Patos (Figura 2).

O embasamento do Domínio PS é constituído por rochas de idade paleoproterozóica, que constituem um complexo gnáissico-migmatítico conhecido por Complexo Caicó. Além dessas rochas, este domínio também apresenta uma

cobertura com rochas metassupracrustais neoproterozóicas, designada de Grupo Seridó, onde se encontram as formações Jucurutu, Equador e Seridó, da base para o topo, respectivamente. As unidades que compõem o Domínio PS foram afetadas por deformação e metamorfismo polifásicos (Jardim de Sá, 1984; 1994; Jardim de Sá *et al.*, 1995).

Figura 2 - Compartimentação geológica de parte da Província Borborema, com destaque para os Domínios São José do Campestre, Rio Piranhas-Seridó e Jaguaribeano, citados de leste a oeste



Fonte: Medeiros *et al.* (2013)

2.2 EMBASAMENTO GNAISSICO-MIGMATÍTICO (COMPLEXO CAICÓ)

O embasamento gnáissico-migmatítico do Domínio Rio Piranhas-Seridó é composto por rochas do Complexo Caicó. Souza *et al.*, (2007) descreveram o complexo como o embasamento de alto grau metamórfico do Grupo Seridó, constituído por rochas metaplutônicas paleoproterozóicas, intrudidas e/ou intercaladas com unidades metassupracrustais mais antigas. Segundo Jardim de Sá (1994), o contato entre o embasamento e as rochas supracrustais do Grupo Seridó é

do tipo discordante, demarcado, em vários locais, pela ocorrência de metaconglomerado polimítico basal contendo seixos de rochas granito-gnáissicas do Complexo Caicó.

Geologicamente, o Complexo Caicó foi subdividido em duas associações distintas: a primeira é composta por rochas metavulcanossedimentares (paragnaisses e anfibolitos, com lentes de outros tipos de litologia, como anfibólio-gnaisses, gnaisses calcissilicáticos, gnaisses xistosos, quartzitos ferríferos, formações ferríferas, mármore, gnaisses bandados por vezes migmatizados, e migmatitos); a segunda é constituída por uma unidade metaplutônica mais jovem (ortognaisses tonalítico-granodiorítico, granitos e leuco-ortognaisses graníticos com lentes de rochas anfibolíticas e migmatitos, com textura média e equigranular, e aqueles de fácies porfirítica e composição granítica a granodiorítica). Entretanto, em diversos locais essas unidades se encontram cartografadas de forma indivisa (Jardim de Sá, 1994; Souza, 1991). Datações pelo método U-Pb em zircões de ortognaisses, obtidas por Hackspacher *et al.* (1990), Legrand *et al.* (1991), Dantas (1992) e Souza *et al.* (2016), apontam o intervalo entre 2,25 a 2,10 Ga para a formação do Complexo Caicó.

2.3 GRUPO SERIDÓ

Em linhas gerais, Ferreira e Albuquerque (1969) denominaram a unidade composta pelas rochas metassedimentares e metavulcânicas sobrepostas ao embasamento da região como Grupo Seridó, sendo esta a unidade metassupracrustal característica da Faixa de Dobramentos Seridó. Van Schmus *et al.* (2003) sugerem uma janela temporal de deposição dessa megassequência entre 650 e 610 Ma, com base nas idades obtidas em análises U-Pb SHRIMP em zircões detríticos, e que sua estruturação/deformação ocorreu em 600 Ma, durante a Orogênese Brasileira/Panafricana (Jardim de Sá, 1984; 1994; Jardim de Sá *et al.*, 1995).

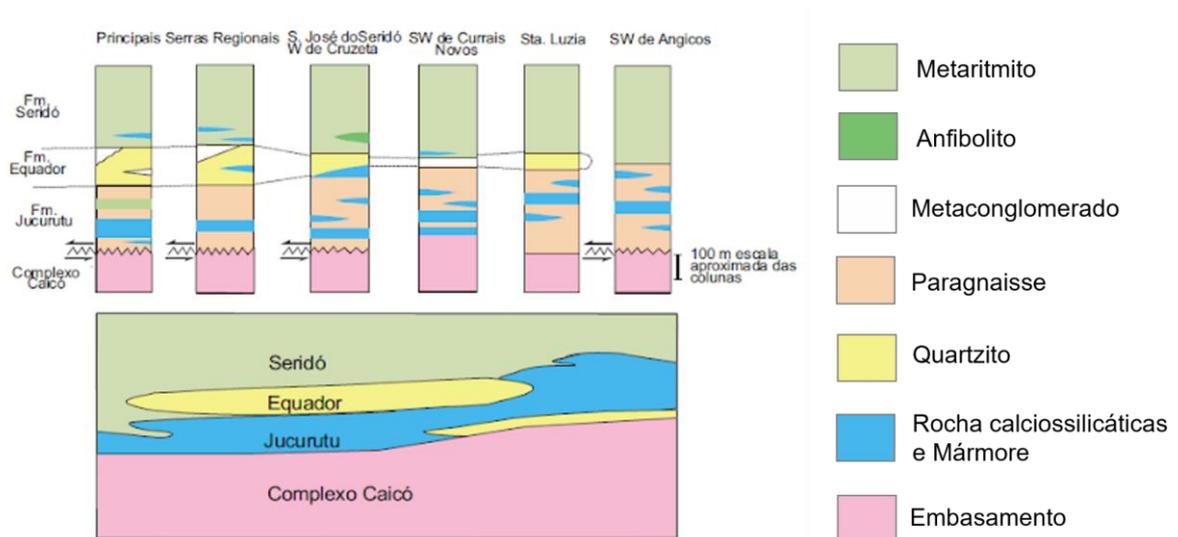
As rochas do Grupo Seridó foram submetidas a metamorfismo, variando da fácies xisto verde a anfibolito superior, e sua estratigrafia ainda constitui motivo de divergências na literatura sobre a região. Os contatos com o embasamento são predominantemente marcados por zonas de cisalhamento (tangenciais ou transcorrentes). Contudo, em algumas regiões, são reconhecidas superfícies de não conformidade, representadas por metaconglomerados basais, nas supracrustais, e

diques de rochas básicas anfibolitizados que truncam um bandamento restrito aos gnaisses Caicó, conforme interpretações de campo feitas por Jardim de Sá (1978; 1984).

De acordo com Jardim de Sá e Salim (1980); Jardim de Sá (1984; 1994) e Archanjo e Salim (1986), o Grupo Seridó possui três unidades (Figura 3): a **Formação Jucurutu**, na base, com paragnaisses dominantes e intercalações de mármore, quartzitos, micaxistos, rochas calciossilicáticas, formações ferríferas, metavulcânicas e alguns metaconglomerados basais; a **Formação Equador**, intermediária, composta, principalmente, por quartzitos, por vezes intercalados com metaconglomerados e paragnaisses – essa unidade possui espessura muito variável e pode estar ausente em algumas regiões; e a **Formação Seridó**, no topo, composta por micaxistos diversos (aluminosos a feldspáticos, de baixo a alto grau metamórfico), com intercalações subordinadas de mármore, metavulcânicas, rochas calciossilicáticas e metaconglomerados, que ocorrem na base dessa formação.

O empilhamento estratigráfico do Grupo Seridó reflete uma evolução deposicional da unidade mais antiga para a mais jovem. Por outro lado, relações de interdigitação/graduação nos contatos sugerem uma (pelo menos parcial) contemporaneidade entre essas unidades na bacia original.

Figura 3 - Coluna estratigráfica do Grupo Seridó



Fonte: Jardim de Sá (1994); Santos e Ferreira (2002)

2.4 GRANITÓIDES BRASILIANOS

Na Faixa Seridó, ocorre uma extensa granitogênese imposta pelo evento Brasileiro, conhecida na região como os "granitóides G3" (Jardim de Sá *et al.*, 1981; Jardim de Sá, 1994), intrusivos tanto no embasamento da Faixa Seridó como nas rochas supracrustais. Essa granitogênese representa uma das feições mais importantes da Província Borborema, ocorrendo como batólitos, *stocks* e diques, cujas características petrográficas, químicas e geocronológicas diferem entre si. Nesse contexto, cabe destacar os trabalhos de Jardim de Sá (1994), Angelim (2006) e Nascimento *et al.* (2015), que classificaram essas rochas plutônicas com base em critérios de campo, estruturais e/ou geoquímicos.

Para Nascimento *et al.* (2015), na região do Domínio Rio Piranhas-Seridó, os principais períodos de atividade plutônica durante a orogênese Brasileira foram o Ediacarano (635 a 541 Ma) e o Cambriano (541 a 485 Ma), sendo o primeiro período o mais intenso. Jardim de Sá (1994) caracteriza essa granitogênese (os granitóides G3) como plútons sin- a tardi-tectônicos ao evento D3. Esses granitóides são encontrados ao longo de toda a Faixa Seridó, truncando estruturas preexistentes (referentes às fases D2 e D1) impressas nas rochas do embasamento, nas supracrustais e nos *augen* gnaisses G2.

Com base em dados petrográficos, texturais, geoquímicos e geocronológicos de várias amostras, Nascimento *et al.* (2015) conseguiram individualizar seis diferentes suítes magmáticas: (i) Alcalina; (ii) Alcalina Charnoquítica; (iii) Cálcio-alcalina; (iv) Cálcio-alcalina de alto K equigranular; (v) Cálcio-alcalina de alto K porfírica; e (vi) a suíte Shoshonítica.

Diversos trabalhos reportaram idades referentes a estes granitóides. Brito Neves *et al.* (2003) dataram alguns granitos da Província Borborema pelo método U-Pb em zircões, definindo idades de 635 ± 9 Ma para o granodiorito Conceição; 651 ± 15 Ma para o batólito Tavares; $584,5 \pm 2$ Ma para o granito Itaporanga; e 573 ± 45 Ma para o granitóide peralcalino Catingueira. Legrand *et al.* (1991) dataram o granito porfírico do Maciço de Acari pelo método U-Pb em zircões, definindo uma idade de intrusão de 555 ± 5 Ma, coincidente com a datação Rb-Sr em rocha total (Jardim de Sá, 1994), o qual propôs o intervalo de 580 ± 30 Ma para o evento de cinemática transcorrente (D3) na Faixa Seridó.

2.5 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Esta província, localizada dentro do Domínio PS, perpassando os Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, compreende o que Scorza (1944) chamou de Província Pegmatítica da Borborema (PPB). Os pegmatitos da PPB estão concentrados em uma área de aproximadamente 75 por 150 km, no segmento oriental da Faixa Seridó, entre as coordenadas 5°45' e 7°15' de latitude sul e 35°45' e 37° de longitude oeste (Beurlen *et al.*, 2014; Scorza, 1944; Soares *et al.*, 2007).

Nesta província estão catalogados mais de 1.500 pegmatitos, em uma área de ocorrência correspondente a cerca de 10.000 km², dentre os quais se incluem alguns granitos pegmatíticos (terminologia essa utilizada por Černý e Meintzer, 1988) que podem estar mineralizados em metais raros tais como Be, Ta-Nb, Li e Sn, gemas e minerais industriais como feldspato cerâmico, caulim e quartzo (Beurlen, 1995; Beurlen *et al.*, 2001; 2008; 2014; Da Silva *et al.*, 1995; Silva *et al.*, 2010; Silva; Crósta, 2011). A maior parte dos pegmatitos graníticos mineralizados em elementos raros é intrusiva nos micaxistos da Formação Seridó, subordinadamente nos quartzitos e metaconglomerados da Formação Equador, e os demais, nos gnaisses da Formação Jucurutu, nos granitos pós-tectônicos ou nos gnaisses e migmatitos paleoproterozoicos do embasamento (Beurlen *et al.*, 2009).

A região de ocorrência da PPB foi afetada estruturalmente pela zona de cisalhamento Patos, a sul, e por grandes zonas de cisalhamento NE-SW e N-S, que foram responsáveis pelo formato ovóide e alongado dos pegmatitos (Silva *et al.*, 2010). Em regiões específicas, a deformação plástica migra para uma deformação frágil em sítios transtracionais, que estão usualmente relacionados ao mecanismo principal de alojamento dos pegmatitos nessa região (Santos *et al.*, 2014). Essa tectônica frágil também controla a injeção de veios mineralizados e diques que truncam os corpos pegmatíticos.

Os primeiros trabalhos sobre a Província Pegmatítica da Borborema, realizados por Johnston Jr. (1945) e Rolff (1945), levaram em consideração a formação estrutural e a ocorrência destes corpos rochosos, de forma a classificar esses pegmatitos em homogêneos, heterogêneos e mistos. Com base na mineralogia e geoquímica, Baumgartner *et al.* (2006) classificaram os pegmatitos da PPB como pegmatitos de

elementos raros do tipo LCT, a partir de estudos de pegmatitos heterogêneos e da geração mais nova dos pegmatitos com idades brasileiras, não deformada.

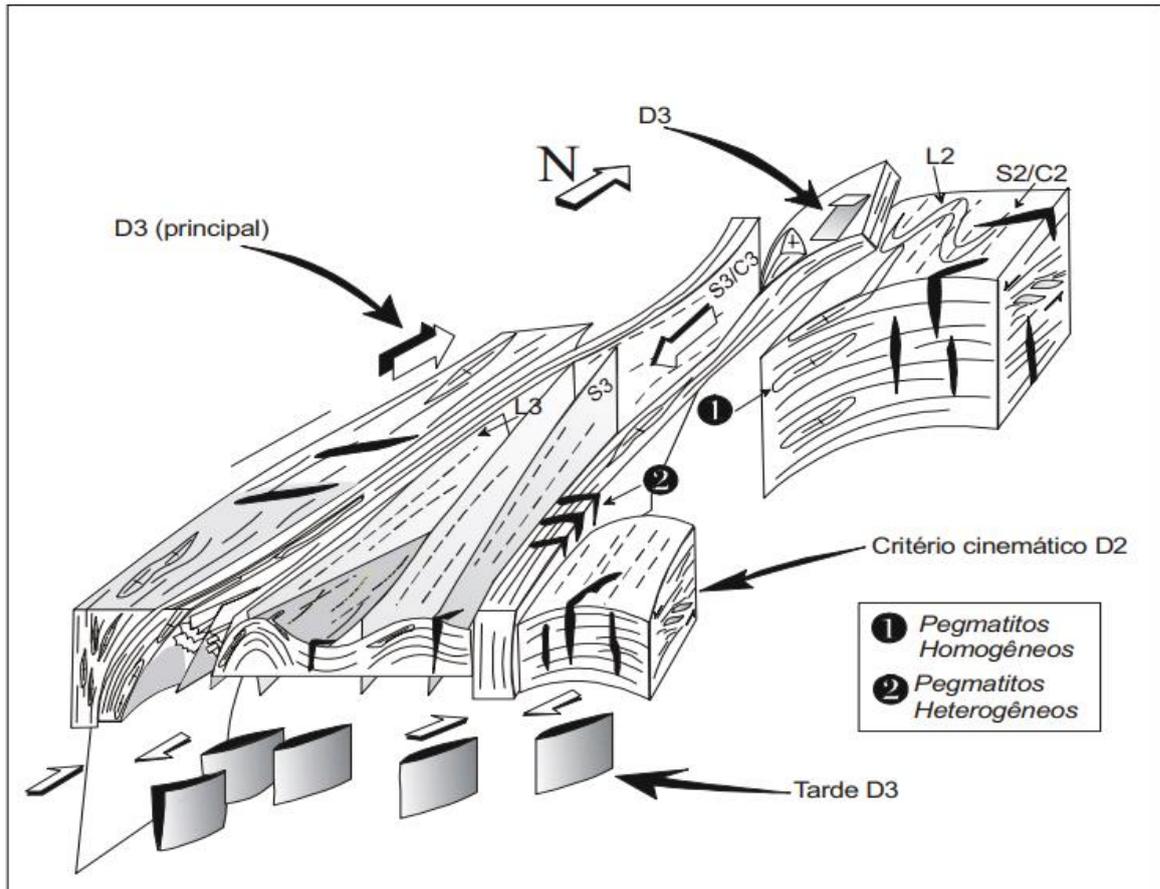
Para a CPRM (2008), os pegmatitos da PPB correspondem aos últimos estágios do magmatismo Brasileiro, formando corpos alongados que truncam as unidades pré-cambrianas da região. Legrand *et al.* (1993) discorreram sobre o posicionamento dos pegmatitos, cujas intrusões se colocaram durante ou após o funcionamento dos cisalhamentos mais recentes, correspondente à fase de deformação D3 de Jardim de Sá (1978). Da Silva (1993) observou que alguns pegmatitos mineralizados são deformados pelo tectonismo regional, concluindo que eles constituem mais de uma geração de pegmatitos.

Geocronologicamente, estudos realizados nos pegmatitos da PPB revelaram idades que variam entre 491 e 515 Ma para sua formação, estando assim relacionados com o final do Ciclo Brasileiro (Araújo *et al.*, 2005; Baumgartner *et al.*, 2006; Hollanda *et al.*, 2019; Palinkas *et al.*, 2019).

Segundo o DNPM/CPRM (1997), os pegmatitos do Grupo Seridó são classificados em dois tipos relacionados às idades relativas e a eventos tectônicos (Figura 4). O primeiro grupo é de pegmatitos mais antigos (pré a sin-tectônicos), com o alojamento de pegmatitos homogêneos mostrando um alto grau de deformação e com orientação correspondente à estruturação regional (NE-SW).

O segundo grupo é relativamente mais novo, tardi-tectônico ou pós fase D3, e apresenta alojamento dos pegmatitos heterogêneos truncando as unidades pré-cambrianas ao longo das juntas de distensão escalonadas, geradas pela movimentação tardia, dúctil-frágil das zonas de cisalhamento, com uma orientação E-W. São, provavelmente, geneticamente relacionados aos granitos de mesma idade (Araújo *et al.*, 1998; 2001).

Figura 4 - Relações estruturais entre pegmatitos e suas encaixantes



Fonte: Araújo *et al.* (2001)

Duas datações U-Pb obtidas em ferrocolumbita e manganocolumbita nos pegmatitos por Baumgartner *et al.* (2006) indicaram idades de $514,9 \pm 1,1$ Ma e $509,5 \pm 2,3$ Ma, que apontam um magmatismo do Cambriano inferior a médio, interpretados como tardi- a pós-tectônicos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Será abordada neste capítulo a definição de pegmatitos, bem como sua gênese e classificação, além de aspectos relacionados à zonação interna e regional dessas rochas. Também serão aqui abordados os fundamentos das metodologias utilizadas para análise e estudo dos pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema.

3.1 DEFINIÇÕES E GÊNESE DOS PEGMATITOS

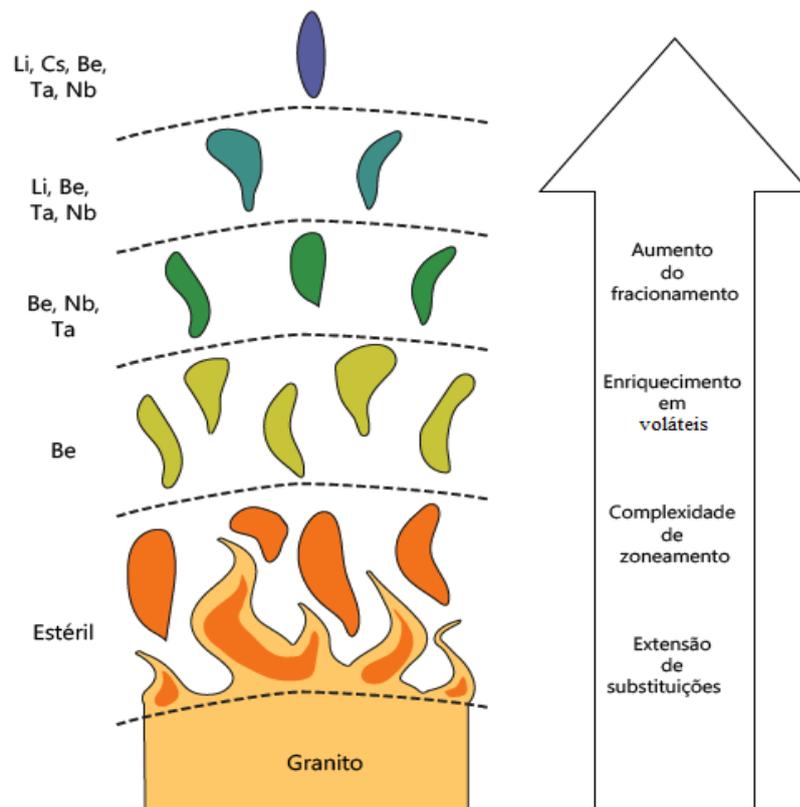
Segundo London (2008a), pegmatitos são rochas ígneas, majoritariamente de composição granítica, distinguidas de outras rochas ígneas pelos cristais de granulometria extremamente grossa, mas também de tamanho variável, ou ainda por uma abundância de cristais com hábitos esqueletais, gráficos ou com forte crescimento direcional.

Os pegmatitos são conhecidos pela presença de excelentes minerais-gema e que há muito são explorados como fontes primárias de feldspato, quartzo e mica para fins industriais. Além disso, por registrarem diferentes processos ígneos, fornecem informações sobre o comportamento e concentração de metais estratégicos e raros na crosta terrestre, como Li, Sn, Ta, Nb, Be, Cs, Rb, Sc, Th, U e Elementos Terras Raras (ETR) (London, 2008a; Linnen *et al.*, 2012).

O modelo mais aceito para a formação dos pegmatitos sugere que esses corpos representam fusões residuais derivadas da evolução e cristalização de magmas graníticos, com a concentração progressiva de elementos incompatíveis, voláteis e raros, e componentes fluxantes que abaixam a temperatura de cristalização e as taxas de nucleação dos cristais (Simmons; Webber, 2008). Richard Jahns, em estudos pioneiros sobre a gênese de pegmatitos (Jahns, 1955; Jahns; Burnham, 1969), considerou que magmas silicáticos coexistentes com vapor de água seriam o material inicial a partir do qual os pegmatitos seriam gerados. Experimentos mais recentes de London (1992; 2005) sugeriram, entretanto, que a presença de uma fase de vapor aquoso não é necessária para o desenvolvimento de pegmatitos, tendo B, F, P e Li, conjuntamente com H₂O, o papel de elementos essenciais (Simmons; Webber, 2008).

Nesse modelo, corpos menos diferenciados localizam-se mais próximos ao granito fonte, enquanto aqueles com maior concentração de elementos raros estão distribuídos a uma distância maior (Figura 5). Essa distância está relacionada com a estabilidade termal da composição do magma, ou seja, fusões com menores temperaturas e viscosidades, que resultam da maior concentração em elementos fluxantes à medida que o magma é fracionado, migram para mais longe (Černý, 1991a).

Figura 5 - Evolução química ao longo de um grupo pegmatítico rico em Lítio com a distância do granito



Fonte: Modificado de London (2008a)

Em um segundo modelo petrogenético, os pegmatitos se originam da fusão parcial direta de metassedimentos, como seqüências evaporíticas ricas em elementos fluxantes (B e Li) e outros elementos incompatíveis, sem a necessidade de magmas graníticos parentais. Essa hipótese petrogenética poderia explicar casos em que não

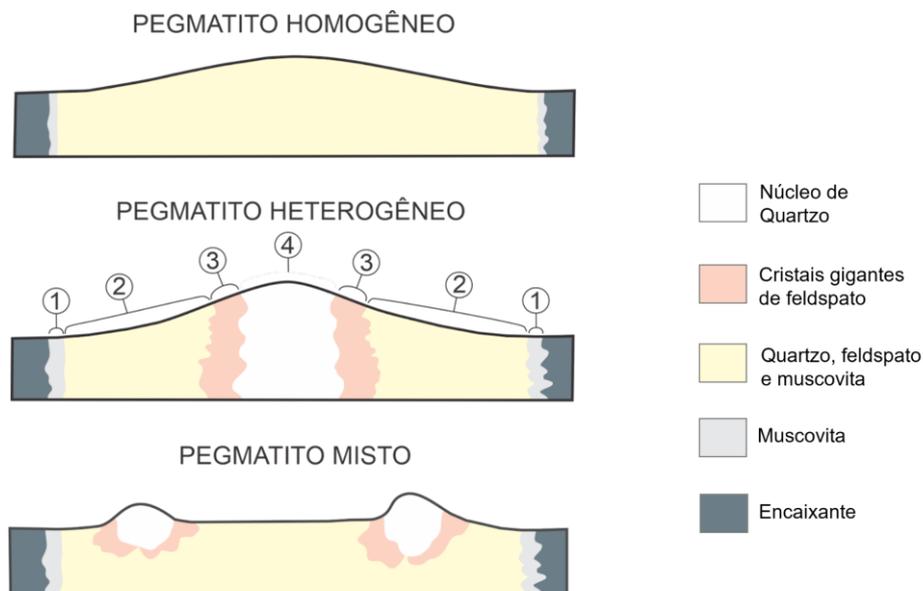
há um padrão de zoneamento entre pegmatitos estéreis e enriquecidos ou relação com um granito parental (Černý, 1991a).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE PEGMATITOS

Existem diversas formas de classificar os pegmatitos, levando-se em consideração fatores como mineralogia, geoquímica, gênese, textura interna ou tamanho, por exemplo. Os modelos tradicionais os classificam quanto à distribuição dos minerais ao longo do corpo, que pode ser homogênea, heterogênea e mista (Figura 6), e quanto à família petrogenética (LCT e NYF). No entanto, recentemente uma terceira classificação tem sido tratada nas discussões a respeito dos pegmatitos, e leva em consideração a avaliação individual dos pegmatitos de acordo com as assembleias mineralógicas (Wise *et al.*, 2022).

A caracterização dos pegmatitos homogêneos se dá pela distribuição regular de seus minerais essenciais (quartzo, feldspato e mica) ao longo do corpo rochoso, onde a granulometria apresenta variação de centímetros a decímetros, com intercrescimento gráfico entre quartzo e feldspato. Já nos pegmatitos heterogêneos, os minerais se apresentam preferencialmente em cada uma das quatro zonas distintas (Figura 6), dispostas em relação ao centro do pegmatito, descritas como zona de borda (zona I), zona de parede (zona II), zona intermediária (zona III) e zona de núcleo (zona IV), propostas por Johnston Jr. (1945) e Cameron *et al.* (1949). Os minerais de maior interesse econômico (berilos, tantalatos, turmalinas etc) estão situados na zona intermediária.

Figura 6 - Classificação estrutural dos pegmatitos



Fonte: Johnston Jr. (1945); Rolff (1945)

Os pegmatitos mistos seguem as seguintes características: são intermediários entre os homogêneos e os heterogêneos; apresentam bolsões de quartzo, localizados na massa pegmatítica semelhante à Zona II dos pegmatitos heterogêneos; em torno desses bolsões existe uma zona semelhante à Zona III dos pegmatitos heterogêneos; e as mineralizações econômicas, nestes locais, são geralmente disseminadas (Rolff, 1946).

O segundo critério utilizado para classificar pegmatitos se baseia na diferenciação entre famílias petrogenéticas. Černý (1991a) propôs uma subdivisão dos pegmatitos de elementos raros e mirolíticos, originados por processos de diferenciação ígnea de magmas parentais. Essa subdivisão resulta em duas famílias químicas distintas, determinadas pelas fontes plutônicas, bem como pelo enriquecimento em elementos químicos, pela presença de assembleias minerais e pelos tipos de granitos associados. Essas famílias são conhecidas como LCT (Li-Cs-Ta) e NYF (Nb-Y-F).

A família LCT (Li-Cs-Ta) tem a marca de fontes graníticas do tipo S, peraluminosas, cujos magmas formam-se pela anatexia de rochas metassedimentares ou pelo baixo percentual de fusão parcial de rochas ígneas (ou metaígneas) do embasamento (Černý; Ercit 2005). Com o avanço do fracionamento

magmático, torna-se progressivamente enriquecida em álcalis raros, berílio, boro, estanho e fósforo, apresentando baixas razões Nb/Ta.

A família NYF (Nb-Y-F), por sua vez, é mais associada com granitos tipo A e I, subaluminosos a metaluminosos, moderadamente fracionados, originados por uma variedade de processos que envolvem a crosta empobrecida ou contribuições do manto, como por exemplo: (1) diferenciação direta de magmas basálticos mantélicos; (2) fusão de protólitos da crosta inferior ou intermediária; (3) fusão de litologias juvenis não depletadas em ambiente orogênico; (4) combinação dos processos 2 e 3; e (5) fusão de crosta sílica pré-enriquecida em elementos NYF por fluidos derivados do manto (Černý; Ercit 2005) – sendo enriquecida em ETR pesados e flúor, e com altas razões Nb/Ta.

Existe ainda uma terceira família, que seria a mistura das duas anteriores, chamada NYF + LCT. Forma-se, principalmente, pela contaminação dos granitos NYF com elementos LCT de litologias supracrustais, ou por anatexia de protólitos mistos, com diferentes quantidades de elementos NYF e LCT (Černý; Ercit 2005). Essa família contém granitos e pegmatitos com características geoquímicas e mineralógicas combinadas.

Segundo a classificação proposta por Wise *et al.* (2022), a análise das assinaturas químicas dos pegmatitos, representadas pela mineralogia acessória identificada, representa os critérios mais adequados para agrupamento de pegmatitos com as mais diversas características. Essa abordagem surgiu com o objetivo de incluir outros tipos de pegmatitos que eram omitidos em modelos de classificação anteriores.

A nova proposta utiliza um conjunto de minerais acessórios mais abrangente para classificar os pegmatitos e define três grupos de pegmatitos, que são geneticamente relacionados a magmas residuais de plútons graníticos ou à anatexia de protólitos metaígneos ou metassedimentares (Tabela 2).

Tabela 2 - Sistema de classificação de grupos pegmatíticos

Magmas residuais de plútons graníticos			
Grupo	1	2	1 e 2
Rocha fonte	Granito S	Granito A	Granito I
Afinidade química	Peraluminoso	Peralcalino, meta- a peraluminoso	Per- a metaluminoso
Assinatura química	Be, Nb, Ta, P, Sn, Li, Cs e B	ETR, Be, Nb e F	B, Be, ETR, Nb, Ti, Li e Ca
Produtos diretos de anatexia			
Grupo	1	2	3
Rocha fonte	Rochas metamórficas de fácies anfibolito a granulito		
Assinatura química	Be, Nb, Ta, P, Li e B	ETR, U, Be	Al, Be e B

Fonte: Wise *et al.* (2022)

Os pegmatitos do Grupo 1 estão relacionados a magmas peraluminosos e são tipicamente enriquecidos em Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Ta > Nb, B e F, reconhecidos em três tipos: (i) berilo ± fosfato, (ii) ± espodumênio ± petalita e (iii) ± lepidolita ± elbaíta.

Os pegmatitos do Grupo 2 são compostos, principalmente, por quartzo e K-feldspato, além de conterem fluorita, helvita, magnetita, hyalita, epídoto, titanita e zircão. Uma característica determinante dos minerais destes pegmatitos é o enriquecimento em Fe. Além disso, o feldspato mais comum é a microclina amazonítica e a mica dominante é a biotita.

Já os pegmatitos do Grupo 3 são fortemente peraluminosos e compostos por quartzo, K-feldspato e plagioclásio, além de muscovita, biotita, granada e/ou turmalina. Os pegmatitos deste grupo podem conter: (i) andalusita, sillimanita, cianita e/ou cordierita, (ii) crisoberilo, berilo e/ou phenakita e (iii) dumortierita, grandidierita, werdingita e boralsilita (Wise *et al.*, 2022).

Os principais minerais de minério encontrados nos pegmatitos são: 1) minerais de lítio: espodumênio, petalita, lepidolita, ambligonita, trifilita e litiofilita; 2) minerais de

berílio: berilo; 3) minerais de nióbio-tântalo: columbita e tantalita; 4) minerais de tório e terras raras: monazita, torita, allanita, gadolinita e xenotímio; e 5) minerais-gemas: berilos (água-marinha, heliodoro, morganita), fenaquita, topázio, espodumênio (kunzita), turmalinas (dravita, rubelita, schorlita) e safiras (Biondi, 2003).

3.3 ZONAÇÃO DOS PEGMATITOS

Uma das mais importantes classificações de pegmatitos, ainda usada como referência, é aquela feita por Cameron *et al.* (1949) e Johnston Jr. (1945), que abordam considerações importantes acerca da estrutura interna dos pegmatitos, além de discutirem a origem geológica dessas rochas. Os autores propuseram uma sequência de camadas internas com determinada associação ou assembleia mineralógica, ordenadas a partir das paredes da câmara magmática, limitadas pelo contato com a rocha encaixante para o centro da intrusão, sendo, dessa forma, sua origem atribuída à cristalização fracionada.

Ainda segundo Cameron *et al.* (1949) e Johnston Jr. (1945), as zonas pegmatíticas podem ocorrer de acordo com diversas associações mineralógicas, não necessariamente presentes em todos os pegmatitos, e cujos minerais são ordenados em ordem decrescente de abundância. As associações mineralógicas mais comuns são compostas por plagioclásio, K-feldspato e quartzo, combinados com muscovita, biotita, ambligonita, espodumênio e lepidolita. A ocorrência desses minerais e de acessórios como turmalina, berilo, topázio, columbita-tantalita e fosfatos é usada para definir cada assembleia.

É possível identificar na Tabela 3 a sequência paragenética da zonação mineralógica, na qual as zonas externas (1) a (3) correspondem predominantemente às zonas de borda e zonas de parede, dominadas por plagioclásio. Nas zonas intermediárias é possível notar uma predominância de K-feldspato sobre plagioclásio em pegmatitos quimicamente simples, e minerais de lítio predominam em corpos mais evoluídos (London *et al.*, 2012). As seis primeiras zonas são interpretadas como provenientes de magma silicático; as zonas remanescentes, o núcleo e os preenchimentos de fraturas devem ter influência de gases ou foram recristalizados no estado subsólido.

Tabela 3 - Associações mineralógicas das zonas pegmatíticas

ZONA	ASSOCIAÇÃO MINERALÓGICA
1	Plagioclásio + quartzo + muscovita
2	Plagioclásio + quartzo
3	Quartzo + pertita + plagioclásio (\pm muscovita, \pm biotita)
4	Pertita + quartzo
5	Pertita + quartzo + plagioclásio + ambligonita + espodumênio
6	Albita + quartzo + espodumênio
7	Quartzo + espodumênio
8	Lepidolita + albita + quartzo
9	Quartzo + microclina
10	Microclina + albita + quartzo + micas litiníferas
11	Núcleo de quartzo

Fonte: Cameron *et al.* (1949)

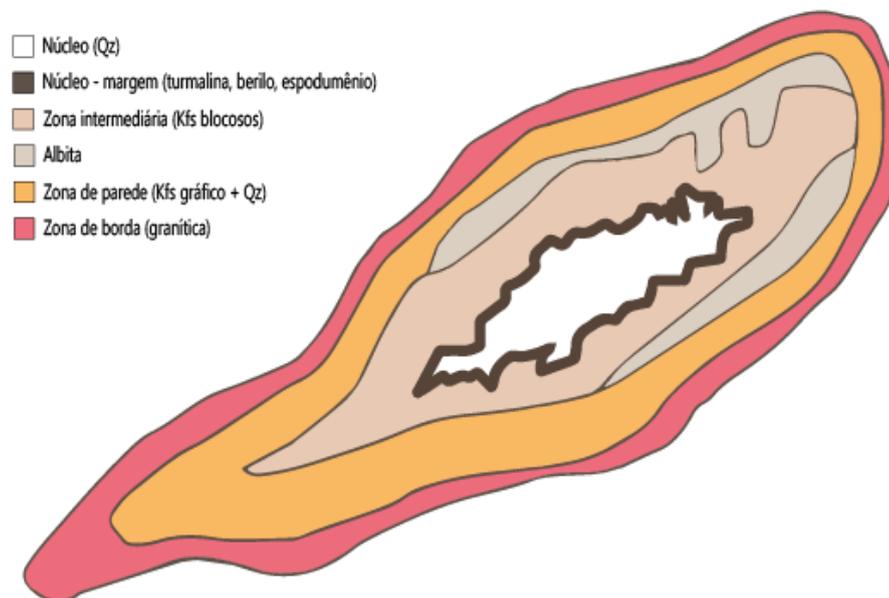
A estrutura interna dos pegmatitos zonados pode ser subdividida em três partes principais: 1) zonas de cristalização primária (zona de borda, zona de parede, zonas intermediárias e núcleo); 2) Corpos de substituição/unidades metassomáticas; e 3) preenchimentos de fraturas (Heinrich, 1953; Cameron *et al.*, 1949; Černý, 1991b). Essa zonação interna é descrita, da borda para o interior do corpo, da seguinte forma (Figura 7):

- (I) Zona de borda - é representada por uma camada fina e de textura hipidiomórfica, semelhante a um granito, e envolve o pegmatito em contato com a encaixante;
- (II) Zona de parede - apresenta textura mais grossa e é uma camada mais espessa do que a anterior. Além do plagioclásio e quartzo, predominantes, pode apresentar muscovita, biotita, K-feldspato, granada, turmalina, apatita, berilo e columbita. K-feldspato e quartzo formam cristais esqueléticos e textura gráfica;
- (III) Zona intermediária - é caracterizada por um aumento relativo no tamanho dos cristais, em comparação às zonas anteriores. Esta zona tende a ser dominada por um ou dois minerais, tipicamente microclínio pertítico, plagioclásio,

muscovita, espodumênio, petalita ou montebrasita, todos associados com quartzo;

- (IV) **Núcleo** - é a porção mais interna do corpo pegmatítico, predominando quartzo nos pegmatitos comuns. Os pegmatitos ricos em Li, na maioria, contêm núcleos de quartzo, mas podem também ser pobres nesse mineral e conter albita e lepidolita, juntamente com uma variedade de minerais raros.

Figura 7 - Estrutura interna de pegmatitos zonados em seção horizontal, na qual é possível observar o padrão concêntrico das zonas bem como a distribuição mineralógica e textural comumente observada nesses corpos



Fonte: Adaptada de Černý (1991a)

Além dessas zonas, Cameron *et al.* (1949) descreveram unidades atípicas, geralmente de baixa frequência e proporção em campos de pegmatitos. Elas são caracterizadas por: zonas de preenchimento de fraturas, corpos de substituição, aplitos acamadados e cavidades miarolíticas.

Os estágios geoquímicos de evolução do processo pegmatítico foram caracterizados por Ginzburg (1960), sendo esse o aspecto principal para analisar a zonação regional de pegmatitos. Segundo este autor, a evolução geoquímica dos pegmatitos é caracterizada pela variação da quantidade relativa de álcalis nos diversos estágios, porém outros fatores também influenciam, como intervalo de profundidade de formação, enriquecimento em voláteis e intensidade de processos

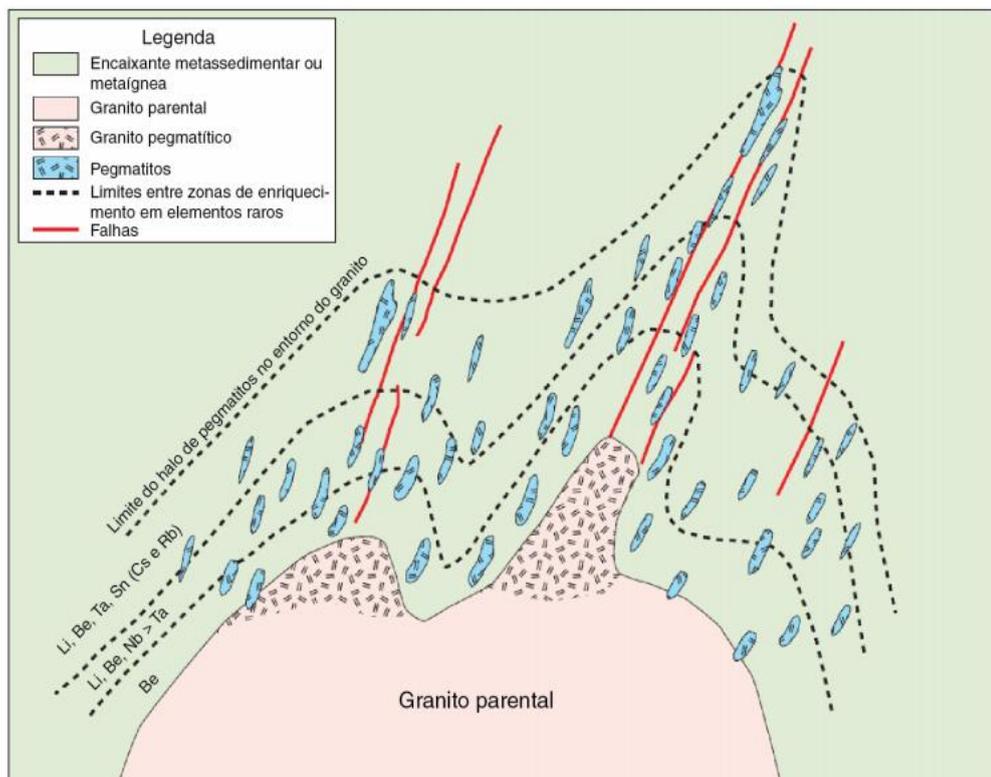
metassomáticos tardios, em decorrência da interação dos pegmatitos com a rocha encaixante.

Associações minerais específicas podem ser indicativas do grau de evolução das fusões que geraram os pegmatitos. Černý e Ercit (1985), por exemplo, observaram que a diversidade de minerais de Nb e Ta cresce com o fracionamento dos pegmatitos. Em geral, com o fracionamento há um incremento de Mn e Ta e um decréscimo de Fe e Nb em minerais de Nb-Ta. Bradley *et al.* (2017) discutiram essa zonação regional em termos da mineralogia característica dos corpos pegmatíticos, variando das porções mais proximais a distais em relação à fonte ígnea.

A viscosidade das fusões pegmatíticas diminui com o aumento do conteúdo de H₂O, F, P, B, Rb, Cs e Be, de modo que as porções mais evoluídas são as mais móveis e posicionam-se mais distantes do granito parental (Černý, 1982a). Esse comportamento leva a um zoneamento regional dos pegmatitos, esquematizado por Černý (1991b).

Os pegmatitos mais proximais, e menos evoluídos, contêm essencialmente os minerais formadores de um granito, como quartzo, K-feldspato, plagioclásio sódico, muscovita e biotita, e subordinadamente, granada, apatita, turmalina e zircão. Em seguida, ocorrem pegmatitos portadores de berilo. Esses, por sua vez, são seguidos de pegmatitos portadores de columbita e berilo. Por fim, a próxima zona é caracterizada pela ocorrência de tantalita e aluminossilicatos de lítio (zona Li, Be, Ta, Sn, Cs e Rb); e no caso dos pegmatitos mais evoluídos e distais podem ocorrer pollucita, um aluminossilicato de Cs e Na (Figura 8). Assim, na prospecção de elementos de importância econômica (Ta, Cs, Li, dentre outros), deve-se levar em consideração esse modelo de zonação, buscando-se identificar os pegmatitos evoluídos, ou seja, mais distais em relação à fonte (Bradley *et al.*, 2017).

Figura 8 - Modelo esquemático (sem escala) do padrão de zonação regional ideal em um campo pegmatítico, adaptado por Galeschuk e Vanstone (2005) a partir de Trueman e Černý (1982). Se a figura for considerada como um corte, os granitos pegmatíticos ilustrados estariam posicionados na cúpula do granito parental



Fonte: Bradley *et al.* (2017)

3.4 SENSORIAMENTO REMOTO E PDI

As tecnologias verdes, como os veículos elétricos e baterias, representam um setor importante e ascendente da economia no mundo moderno (Christmann *et al.*, 2015) e o Lítio (Li) tornou-se um metal crítico para a indústria de energia verde (Grosjean *et al.*, 2012; Arrobas *et al.*, 2017; Müller *et al.*, 2019). Essa crescente demanda exige uma revisão das técnicas de exploração geológica para pegmatitos Li – Cs – Ta (LCT) que são aplicáveis ao trabalho de empresas de mineração. A exploração de Li com o recurso de dados e técnicas de sensoriamento remoto representa um campo emergente, com várias dificuldades e possibilidades desconhecidas (Perrota *et al.*, 2005; Cardoso-Fernandes; Teodoro; Lima, 2019; Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020; Dantas, 2020).

Nesse contexto, os dados de sensoriamento remoto têm sido uma ferramenta importante na prospecção geológica, uma vez que essa ferramenta permite encontrar áreas de interesse para exploração e possibilita o acesso a informações de forma

rápida, barata e não invasiva, favorecendo a indústria da mineração e a exploração geológica, especialmente em áreas inacessíveis e remotas. Rajesh (2004), em uma visão geral do uso de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na exploração mineral, aponta a dificuldade de localizar mineralizações usando apenas dados de sensoriamento remoto, destacando a importância da integração com outros tipos de dados geológicos.

Levando-se em consideração o contexto regional no qual os corpos pegmatíticos do Seridó estão inseridos, os resultados obtidos das missões dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 se destacam, pois funcionam particularmente bem em ambientes áridos caracterizados por uma abundância limitada de vegetação para delinear intrusões graníticas, alunita hidrotermal e minerais de argila, e minerais silicatados contendo Lítio (espodumênio e petalita), usando combinações de banda RGB, proporções e análise seletiva de componentes principais (Cardoso-Fernandes; Teodoro; Lima (2019); Kalinowski ;Oliver, 2004).

Em um estudo de caso da região de Fregeneda-Almendra, na Espanha e Portugal, Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019) utilizaram e desenvolveram uma variedade de assinaturas espectrais para identificar pegmatitos LCT atualmente em exploração, por meio de mapeamento de halo de alteração hidrotermal e identificação direta de minerais contendo Li. Neste contexto, foi demonstrada a importância das bandas térmicas na discriminação de pegmatitos portadores de Li por meio de dados de sensoriamento remoto, uma vez que os minerais silicatados (espodumênio e petalita) apresentam bandas de emissão distintas no espectro térmico.

As composições de bandas e razões de banda mais aplicáveis para a determinação de corpos pegmatíticos, ou de áreas enriquecidas em minerais de Li, foram possíveis nas cenas obtidas pelo Landsat-8 e pelo Sentinel-2, devido às suas resoluções espacial, espectral e temporal. Para isso, as combinações escolhidas foram aquelas que apresentaram uma boa resposta para a identificação de espodumênio, lepidolita e argilas/minerais de alteração, além dos óxidos de ferro, pois permitiram inferir o tipo de rocha que abriga esses minerais.

3.5 AEROGEOFÍSICA

Métodos geofísicos aerotransportados, principalmente a magnetometria e radiometria, são ideais para a caracterização de áreas pouco conhecidas como os corpos pegmatíticos da PPB. Tais métodos têm rápida cobertura, são não destrutivos e normalmente apresentam boa resolução, a depender da profundidade de investigação, do tamanho do alvo e da altura do voo no levantamento.

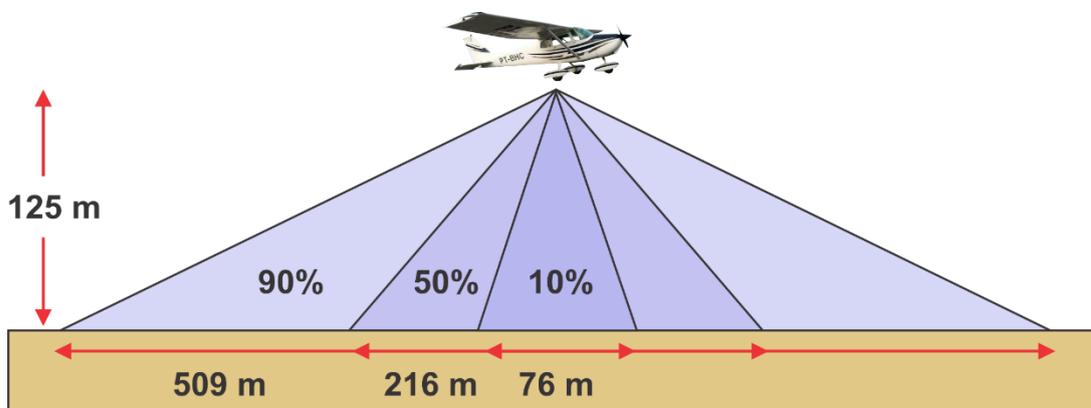
Levantamentos radiométricos aerotransportados regionais são uma ferramenta aplicável para identificar intrusões e *stocks* de granito por meio da análise de dados do espectrômetro K – Th – U, permitindo detectar, por exemplo, a possível fonte de calor do sistema de mineralização (COOK *et al.*, 1996; Schetselaar; Chung; Kim, 2000). Levantamentos radiométricos e magnéticos aerotransportados são geralmente conduzidos simultaneamente e, embora os pegmatitos LCT muitas vezes não contenham minerais de sulfeto magnéticos ou condutores (Trueman; Černý, 1982; Ahtola *et al.*, 2015), os levantamentos magnéticos permitem que os geólogos estabeleçam o controle estrutural sobre a colocação dos granitos e o correlacionem com o cisalhamento regional, falhas e zonas distensivas a anomalias minerais e geoquímicas conhecidas, estabelecendo, portanto, uma via de migração de fluidos e potenciais armadilhas de mineralização.

Com a evolução tecnológica das últimas décadas, os métodos geofísicos passaram de fontes de análises qualitativas secundárias para fontes primárias na identificação e interpretação de novos depósitos minerais. Este processo foi impulsionado em virtude da crescente escassez de recursos minerais em superfície, levando à exploração de alvos a maiores profundidades e ao aumento do custo agregado para extração. Nesse viés, segundo Ribeiro *et al.* (2013), a aplicação da geofísica é a ferramenta de melhor custo/benefício para a identificação de áreas com probabilidade de ocorrência mineral, além de evidenciar estruturas geológicas que possam abrigar mineralizações de interesse econômico e auxiliar mapeamentos geológicos e estruturais.

3.5.1 Gamaespectrometria

A gamaespectrometria, tradicionalmente utilizada como apoio ao mapeamento geológico regional e à prospecção mineral de urânio, experimentou avanços importantes nos últimos anos (Ribeiro *et al.*, 2013). Este método geofísico mede o contraste entre as principais fontes de radiação gama detectadas na superfície terrestre, e a aquisição dos dados é feita através de um espectrômetro aerotransportado (Figura 9). Na natureza existem mais de cinquenta isótopos radioativos diferentes, porém a maioria é rara ou possui energia radioativa fraca. Com isso, as principais fontes de radiação gama observadas na natureza são o potássio (^{40}K) e elementos das séries do urânio (^{238}U) e do tório (^{232}Th), os quais viabilizam a prospecção pelo método por suas concentrações mais elevadas na crosta superior (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Figura 9 - Campo de captação de um espectrômetro de raios gama aerotransportado. Esta figura mostra, para um espaço uniforme, o tamanho da área no solo de onde vêm os fótons gama registrados pelo detector



Fonte: Grasty *et al.* (1991b)

O método gamaespectrométrico apresenta pouca profundidade de penetração, chegando ao máximo em torno de 30 a 40 cm em meios anidros. Essa baixa penetração se deve à interferência que o meio proporciona às medições, assim reduzindo a espessura média investigada (Minty, 1988).

Fatores ambientais atenuam as medidas radiométricas de forma significativa. Dentre os principais fatores responsáveis pela atenuação pode-se apontar a presença de cobertura de solo, capaz de atenuar até 95% da emissão gama com apenas 35 cm de espessura (Minty *et al.*, 1997). A vegetação é outro fator que pode interferir de

maneira significativa na aquisição de U e Th e até 15% da emissão de K. A umidade relativa do ar, presença de nuvens, variação da temperatura e da pressão atmosférica interferem na aquisição por reterem água e aerossóis na atmosfera. A inversão térmica, por sua vez, pode causar o falseamento nos dados adquiridos por conta da retenção de radônio e, por fim, deve-se levar em consideração efeitos direcionais, quando as janelas de detecção gama não estiverem orientadas no plano de aquisição (Gunn, 1998).

Dados aerogamaespectrométricos requerem uma série de correções iniciais para que os espectros adquiridos possam ser analisados com relação à sua concentração na crosta. A partir desses dados corrigidos, é possível obter informações com mapas de U, Th e K que, em conjunto com o conhecimento geológico e estrutural da área de interesse, podem ser uma importante ferramenta nos mais variados estudos de Ciências da Terra.

A partir das contagens individuais, mapas de razões radiométricas de U/Th, U/K e Th/K são confeccionados. Estes podem auxiliar no diagnóstico de mudanças do tipo de rocha, alteração hidrotermal, geomorfologia e variações da concentração do radioelemento dentro de corpos ígneos. Tipos de rochas em uma mesma região podem apresentar distinção entre a concentração de U, Th e K, sendo que suas razões podem indicar os limites dessas concentrações (Ribeiro *et al.*, 2013).

Corpos ígneos podem ser mapeados através das concentrações dos radioelementos, pois o processo de enriquecimento destes, dentro do corpo, ocorre com a diferenciação magmática e a alteração hidrotermal, sendo o corpo ígneo mais evoluído aquele com concentrações maiores de K em relação às de Th e U, e os menos evoluídos aqueles com altos valores de U, Th e K (Tabela 4). A diferença nas razões de U/K e Th/K é mais representativa do que na razão U/Th, já que, durante a gênese e evolução do corpo granítico, o comportamento geoquímico não é uniforme (Iza *et al.*, 2018).

Tabela 4 - Minerais radioativos e suas respectivas ocorrências

Elemento	Mineral	Ocorrência
Potássio	Feldspato, Ortoclásio e Microclina	Principais constituintes de rochas ígneas ácidas e pegmatitos
	Muscovita	
	Alunita	Alteração em rochas vulcânicas
	Silvita, Carnalita	Depósitos salinos em sedimentos
Tório	Monazita	Granitos, pegmatitos e gnaisses
	Torianita	Granitos, pegmatitos e pláceres
	Torita, Uranotorita	
Urânio	Uraninita	Granitos, pegmatitos e veios de Ag, Pb, Cu, etc.
	Carnotita	Arenitos
	Gumita	Associado à uraninita

Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2009)

Recentemente, a introdução de gamaespectrômetros de alta resolução e a transformação das contagens por segundo (cps) em % de K, eU (urânio equivalente) e eTh (tório equivalente) em ppm, acompanhadas por um notável avanço das técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG e dos sistemas de processamento digital de imagens, além do posicionamento por satélite (*Global Positioning System* – GPS), têm permitido extrair informações valiosas dos dados gamaespectrométricos em correspondência à integração de dados exploratórios multifonte.

Uma das aplicações modernas da gamaespectrometria é a possibilidade de identificar áreas de alteração hidrotermal e estabelecer suas relações com processos de mineralização de metais base (Cu-Pb-Zn), (Shives; Charnonneau, 2000). Além disso, tal método também contribui na identificação de possíveis zonas de mineralização em corpos pegmatíticos.

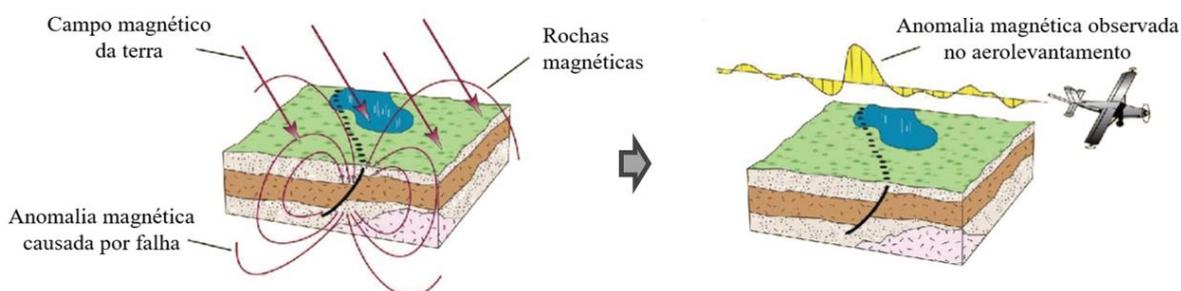
3.5.2 Magnetometria

A magnetometria é uma das técnicas mais utilizadas no mapeamento geofísico regional e pode auxiliar na avaliação estrutural e na identificação de estruturas magnéticas. Trata-se de um método geofísico que mede a magnitude e a orientação do campo geomagnético. Essa interação magnética, que depende principalmente do

campo magnético primário gerado no núcleo da Terra e das magnetizações induzidas e remanentes das rochas que compõem a crosta terrestre, tende a ser variável conforme as propriedades físicas das rochas com as quais interagiu, como a susceptibilidade magnética e o campo magnético (Lowrie, 2007).

Os levantamentos magnetométricos podem ser terrestres ou aéreos, a depender da escala de detalhe com a qual são trabalhados. Normalmente, os levantamentos terrestres são realizados sobre áreas relativamente pequenas, sobre alvos predefinidos e com espaçamento pequeno entre as medidas; já para os dados aeromagnetométricos (Figura 10), o espaçamento entre as linhas de voo depende do grau de detalhe exigido para o alvo de exploração desejado e dos recursos financeiros disponíveis. Para o reconhecimento de áreas, geralmente são realizados espaçamentos maiores, e para levantamentos de detalhe as linhas são menos espaçadas. Cabe ressaltar que a altura do voo deve ser a mais baixa possível, de modo que não afete a segurança do levantamento.

Figura 10 - Aquisição de dado magnético através de aeromagnetômetro e identificação de anomalia magnética causada por uma falha geológica



Fonte: Geosiam Geophysical Services Co. Ltd. (2021)

Segundo Conego Junior (2019), o processamento dos dados magnéticos visa evidenciar as anomalias magnéticas, buscando realçar ou atenuar os comprimentos de ondas a depender do objetivo da investigação, destacando da melhor forma os contrastes que originam as anomalias magnéticas as quais se deseja interpretar. O Campo Magnético Anômalo (CMA) representa influências da heterogeneidade magnética da região de pesquisa. Ele é composto pela superposição de diversas fontes magnéticas oriundas de diferentes profundidades.

A remoção da influência de fontes profundas possibilita o realce de anomalias mais superficiais, um processo conhecido como separação regional-residual. Essa separação é possível devido à utilização de filtragens, que neste caso é o filtro Gaussiano. Porém, outras técnicas de filtragem também podem ser utilizadas para melhorar o dado magnético, sendo as principais: Sinal analítico, Primeira Derivada, Redução ao Polo, Continuação para cima/para baixo, dentre outras (Conego Júnior, 2019).

O método magnético tem relevância para o estudo de corpos pegmatíticos, pois pode auxiliar, principalmente, nos aspectos estruturais da rocha, seja na identificação da direção desses corpos ou das características da rocha encaixante; ou até mesmo para observar se existe relação entre as direções dos pegmatitos ou dos diques e/ou outras estruturas que recobrem a região de estudo.

3.6 TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA A CARACTERIZAÇÃO MINERAL

A caracterização mineral é uma importante etapa da pesquisa científica e da indústria, como o setor de mineração. Através dos procedimentos de análise química, é possível realizar uma caracterização mineralógica de rochas e identificação de minerais de minério, suas propriedades e concentração, além dos minerais de ganga.

Existem diversas maneiras para analisar e caracterizar determinado material como um mineral. Neumann *et al.* (2004) ressaltam que a maneira a ser adotada vai variar não apenas com o mineral em análise, mas também com os objetivos da caracterização, além da capacidade analítica e dos recursos financeiros disponíveis.

As técnicas analíticas de fluorescência e difração estão entre alguns dos resultados encontrados na literatura a respeito de metodologias utilizadas para caracterização mineral. Ambas utilizam raios X como fonte de radiação para as análises e geram dados tanto quantitativos como qualitativos.

3.6.1 Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica analítica multielementar, não destrutiva, que pode ser utilizada para fins qualitativos ou quantitativos na determinação dos elementos constituintes de uma amostra. De acordo com Potts *et*

al. (2003), a espectrometria por Fluorescência de Raios X pode proporcionar uma análise qualitativa baseada na identificação dos elementos químicos ($Z > 10$) presentes em uma amostra. Além disso, essa técnica também permite fazer uma análise quantitativa relacionada às concentrações, estabelecendo a proporção de cada elemento que se encontra presente na amostra (Borjesson *et al.*, 2003).

O processo de excitação da amostra ocorre devido à irradiação por partículas, como elétrons, prótons ou íons produzidos em aceleradores de partículas ou ondas eletromagnéticas, além do processo mais utilizado, que é através de tubos de raios X. Segundo Dutra e Gomes (1984), esse feixe primário resulta na produção de uma radiação secundária de acordo com as características de cada elemento químico presente na amostra, podendo ocorrer absorção, emissão e espalhamento de radiação eletromagnética, conforme destacaram Skoog *et al.* (2009).

Segundo Asfora (2010), a interação com a matéria também pode ocorrer por efeito fotoelétrico, no qual um fóton incidente é completamente absorvido pelo átomo do material e um elétron é ejetado, deixando um buraco na camada em que orbita. No entanto, para provocar a emissão do elétron do átomo, é necessário ceder ao átomo uma energia maior que a sua energia de ligação. Contudo, quando isso ocorre, os raios emitidos possuem um comprimento de onda e uma energia específicos que são característicos de cada elemento.

A medição se dá ao se analisar os ângulos de reflexão e as intensidades de radiação que é emitida quando os elétrons retornam ao seu estado de energia mais baixo, possibilitando a identificação dos elementos e quantificá-los (Melo Júnior, 2007). Conseqüentemente, a análise qualitativa pode ser feita pela investigação dos comprimentos de onda dos raios X. A análise quantitativa, por sua vez, é realizada por meio da medição da intensidade de energia das linhas espectrais que estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (Nascimento-Filho, 1999).

A Fluorescência de Raios X é uma técnica bastante versátil, permitindo analisar amostras líquidas ou sólidas, além de ser uma análise simples e de ter uma grande capacidade de detecção de elementos químicos.

3.6.2 Difractometria de Raios X

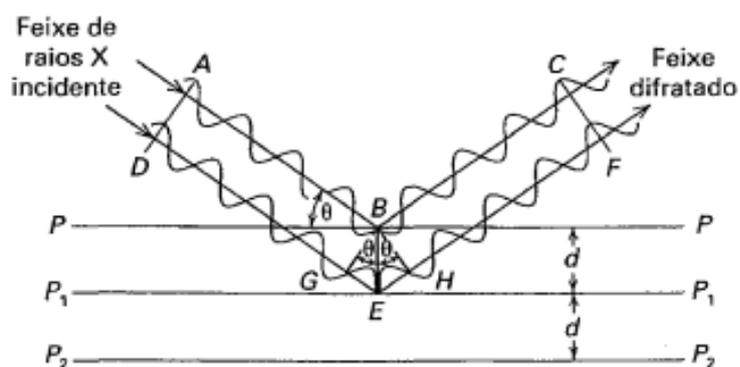
A Difractometria de Raios X (DRX) é uma importante técnica analítica utilizada para caracterizar as estruturas de materiais cristalinos e pode ser adotada em uma ampla área de conhecimento. Ela requer pequena quantidade de amostra (< 1g), além de ser um procedimento de baixos custos operacionais e rápido quando totalmente automatizado. Nas geociências, essa técnica analítica é muito importante para auxiliar na caracterização mineralógica das rochas.

A DRX é baseada no princípio de que os planos de difração e suas distâncias interplanares são características de cada substância, considerando-se que o padrão de difração por ela gerado também é característico (Antoniassi, 2010; Formoso, 1984). Segundo Shackelford (2008), a principal relação que demonstra a condição do espaçamento necessário para que ocorra a difração construtiva é a equação de Bragg (Equação 1), determinada por:

Equação 1.
$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta$$

Onde λ é o comprimento de onda da radiação X, d é o espaçamento interplanar, determinado diretamente pelos índices de Miller para o plano e os parâmetros geométricos da cela unitária, θ é o ângulo de espalhamento, normalmente conhecido como ângulo de Bragg, e n é um número inteiro correspondente à ordem de difração (Figura 11). Segundo a lei de Bragg, quando um cristal difrata raios X, cada feixe difratado constitui uma reflexão, sendo atribuída a um conjunto de planos/família (Gomes, 1984).

Figura 11 - Esquema do fenômeno de difração relatado por Bragg



Fonte: Klein e Dutrow (2012)

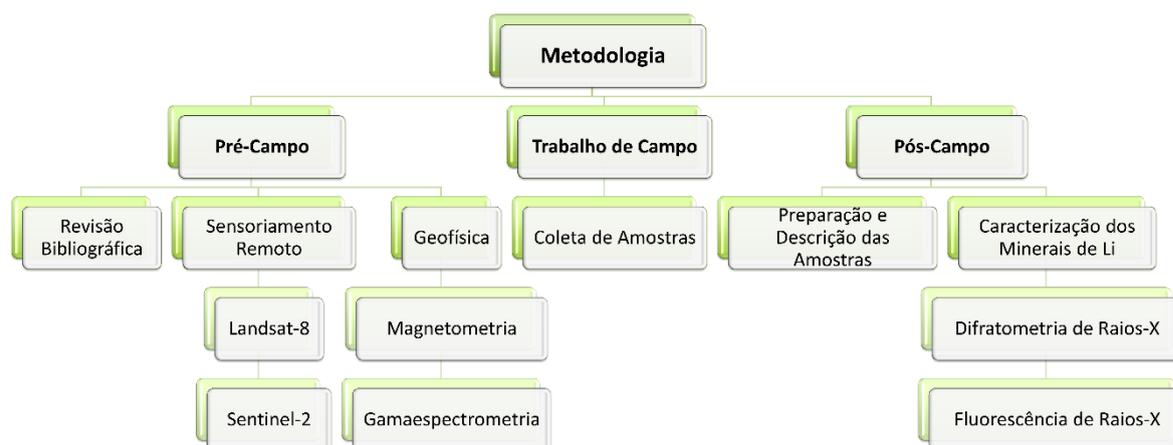
Segundo Cullity e Stock (2001), a caracterização de uma amostra é feita por meio da comparação de seu difratograma com padrões de referência, disponíveis em bancos de dados de DRX. No processo de identificação de materiais cristalinos, os picos mais intensos de cada composto cristalino presente no banco de dados são comparados aos picos do difratograma da amostra. Terminado o processo de busca e comparação, os valores dos resultados de busca são expressos em ordem decrescente de pontuação. A coincidência de valores, ou a quase coincidência, leva à identificação do mineral.

Essa técnica analítica está sujeita a resultados errôneos em decorrência de algumas variáveis, como por exemplo: fatores instrumentais, fatores intrínsecos à amostra e preparação de amostras. Caso haja alguma alteração nessas variáveis, os resultados da análise estarão sujeitos a apresentar respostas diferentes do esperado, podendo resultar em interpretações variadas.

4 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos empregados para o desenvolvimento do projeto são apresentados na Figura 12 e descritos nos tópicos a seguir.

Figura 12 - Organograma representando a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora desta pesquisa (2023)

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

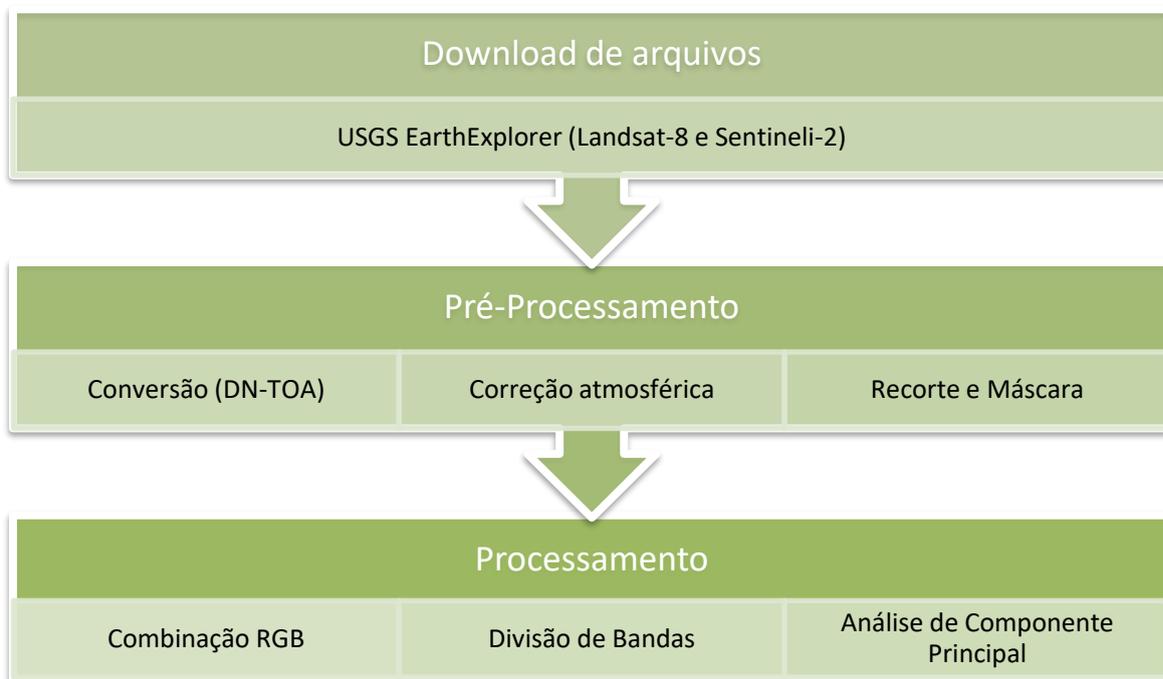
Preliminarmente, realizou-se o levantamento dos dados disponíveis sobre os pegmatitos da PPB, bem como trabalhos relacionados à prospecção de lítio e caracterização de minerais do elemento. Dessa forma, foram compilados artigos científicos, teses, dissertações, projetos de mapeamento e anais de eventos, entre outros. Para tal finalidade, utilizaram-se diferentes sistemas de buscas de dados, incluindo *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciELO*, *Web of Science*, Periódicos CAPES e os sistemas de bibliotecas de diversas universidades.

4.2 SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

Esta etapa consiste na elaboração de um banco de dados georreferenciados a partir de bases cartográficas disponíveis em diferentes sítios (ex. GeoSGB e IBGE). Nesta base de dados, também constam as cenas da área de estudo obtidas pelos sensores dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2.

Através do Processamento Digital de Imagens (PDI) de diferentes bandas espectrais desses satélites, conforme proposto por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019) e Cardoso-Fernandes *et al.* (2020), foram identificados pegmatitos litiníferos na área de estudo, através das técnicas de composição RGB, divisão de bandas e análise do componente principal (PCA). O fluxograma na Figura 13 exemplifica o fluxo de trabalho proposto por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019) e as etapas aplicadas neste trabalho. Os dados foram trabalhados no *software* livre de Geoprocessamento QGIS.

Figura 13 - Fluxograma esquemático das etapas do geoprocessamento



Fonte: Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

No primeiro momento, foram obtidas as imagens dos sensores orbitais OLI e TIRS do Landsat-8 e MSI do Sentinel-2, devido às suas melhores resoluções

espectrais e espaciais. Foram priorizadas imagens com baixa cobertura de nuvens (menor que 10%) e pouca cobertura vegetal (época de seca), para facilitar a interpretação das imagens processadas. As imagens foram adquiridas gratuitamente no portal *EarthExplorer* do USGS (*United States Geological Survey*).

As imagens do Landsat-8 foram registradas pelos sensores no dia 29/10/2021, dispostas em 11 bandas espectrais diferentes, sendo cinco bandas no espectro do visível e infravermelho próximo (VNIR), duas bandas no infravermelho de ondas curtas (SWIR), todas com resolução espacial de 30 m, além de uma banda pancromática com resolução espacial de 15 m, e duas bandas no infravermelho termal (TIR) com resolução espacial de 100 m (Tabela 4). Contudo, para este trabalho foram utilizadas apenas as imagens contidas nas bandas 2, 3, 4, 5, 8 e 11.

As imagens do Sentinel-2 foram registradas pelo sensor MSI no dia 13/10/2021, amostradas em 13 bandas espectrais, com dez bandas variando no VNIR e três no SWIR. O sensor possui uma maior variabilidade na resolução espacial, com quatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m e três bandas com 60 m de resolução (Tabela 5). As imagens do Sentinel-2 utilizadas neste trabalho estão contidas nas bandas 2, 3, 4, 8 e 12.

Tabela 5 -. Características dos satélites e sensores utilizados

Satélite/Sensor	Data	Bandas	Resolução Espacial (m)	
Landsat-8 OLI, TIRS	24/10/2019	4 – Visível	30	
		B1-B7: 1 – NIR		
		2 – SWIR		
		B8: 1 – PAN		15
		B9: 1 – CIRRUS		30
		B10-B11: 2 – TIR	100	
Sentinel-2 MSI	17/09/2020	10 – VNIR	10 - (B2-B4 e B8)	
			20 - (B5-B7 e B8b)	
			60 - (B1 e B9)	
		3 – SWIR	20 - (B11 e B12)	
			60 - (B10)	

Fonte: The European Space Agency (2022); Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

Após a obtenção das imagens é necessário empregar algumas correções, uma vez que os dados brutos possuem ruídos causados pela atmosfera, como dispersão, absorção e refração da energia eletromagnética refletida pela superfície, e que são

capturados pelos sensores. As imagens do Sentinel-2 foram obtidas no nível 2, ou seja, convertidas para a reflectância da superfície. No entanto, as imagens do Landsat-8 estavam no nível 1, e fez-se necessária a conversão dos números digitais (DNs) para Topo da Atmosfera (TOA). Posteriormente, foi necessário realizar uma correção atmosférica, denominada Subtração de Objeto Escuro (DOS1), para converter TOA para a reflectância de superfície. Todo o pré-processamento das imagens foi realizado no *software* livre QGIS, versão 3.16.5, utilizando-se a ferramenta complementar *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), versão 7.8.26.

Após a conversão das imagens, foi realizado o recorte da área de estudo, com o intuito de diminuir ruídos exteriores e o espaço necessário para o armazenamento dos dados. Utilizando-se os valores obtidos através do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), pôde-se aplicar uma máscara nas imagens com a intenção de eliminar corpos de água e vegetação, os quais poderiam gerar ruídos nos resultados posteriores. Através do SCP também se realizou uma modelagem pancromática nas imagens do Landsat-8, utilizando-se a banda 8 pancromática (15 m), resultando em imagens das bandas 2 a 4 com melhores resoluções espaciais (de 30 m para 15 m), propiciando a identificação de regiões antes imperceptíveis.

A técnica proposta por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019) consiste na utilização de combinações RGB, divisão de bandas e análise do componente principal (PCA), o que permite identificar possíveis alvos de interesse na região em estudo. Para esse processamento, utilizaram-se os *softwares* QGIS versão 3.16.5 e SNAP versão 8.0 (disponível no *site* da Agência Espacial Europeia – ESA).

4.2.1 Combinações RGB

Combinações RGB englobam técnicas que possibilitam interpretar uma imagem multiespectral (Novak; Soulakellis, 2000). Consiste em uma combinação de três bandas distintas, o que resulta em uma imagem colorida que destaca regiões de interesse (Pour; Hashim, 2015). A combinação ocorre com bandas nas quais o mineral de interesse possui importantes características de absorção e reflectância. Foram utilizadas as combinações propostas e testadas por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019), destacadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Combinações RGB utilizadas

Combinações RGB		Alvos
Landsat-8	Sentinel-2	
3-2-11	3-2-12	Minerais portadores de Lítio
7-3-11	-	

Fonte: Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

4.2.2 Divisão de bandas

Essa técnica é empregada com o intuito de destacar diferenças espectrais específicas, dividindo uma banda de maior reflectância por uma banda com menor reflectância. As bandas propostas por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019) basearam-se nas assinaturas espectrais de minerais como o espodumênio e lepidolita (Tabela 7). Ambos os minerais são portadores de lítio e são encontrados em pegmatitos heterogêneos presentes na Província Pegmatítica da Borborema, conforme identificou Beurlen *et al.* (2008). Neste trabalho, após a divisão das bandas, aplicou-se uma coloração baseada no histograma da imagem resultante, cujo procedimento foi realizado no *software* SNAP.

Tabela 7 - Divisão de bandas utilizadas

Divisão de Bandas		Mineral Alvo
Landsat-8	Sentinel-2	
3/5	3/8	Espodumênio
4/7	4/12	Lepidolita

Fonte: Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

4.2.3 Análise de componente principal (PCA)

Conforme destacou Loughlin (1991), o método PCA consiste em uma técnica estatística utilizada com o intuito de isolar determinadas assinaturas espectrais, ou seja, eliminar o *background*. Dessa forma, a técnica destaca as assinaturas presentes no conjunto de bandas utilizadas para calcular o componente principal. Cardoso-

Fernandes, Teodoro e Lima (2019) propuseram utilizar dois conjuntos de bandas para a prospecção de lítio: um conjunto composto por duas bandas e outro composto de quatro bandas espectrais (Tabela 8).

Tabela 8 - Conjunto de bandas aplicadas no PCA

Conjunto PCA	
Landsat-8	Sentinel-2
3, 5	3, 8
2, 3, 5, 11	2, 3, 8, 11

Fonte: Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

4.3 AEROGEOFÍSICA

A área de estudo é contemplada pelos produtos obtidos no Projeto Aerogeofísico Paraíba-Rio Grande do Norte 1092, da CPRM, finalizado em 2010 e cuja aquisição contou com posicionamento por satélite (GPS), direção de linhas de voo N-S com espaçamento de 500 metros, linhas de controle E-W com espaçamento de 10 quilômetros e altura de voo de 100 metros (CPRM, 2010). Neste projeto, os dados magnéticos e radiométricos aéreos de alta resolução foram adquiridos e processados pela Lasa Engenharia e Prospecções S/A e pela Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda., com o uso de magnetômetro de vapor de césio 3x Scintrex CS-3 e Geometrics G-822A para medir variações magnéticas e radioelementos da Terra, respectivamente. Esses sensores, com intervalos de registro de aproximadamente 0,1 s (aproximadamente 7 m), foram montados em 3 aeronaves Cessna Caravan de asa fixa e 3 aeronaves Piper Navajo (CPRM, 2010).

O método de gridagem de mínima curvatura (tamanho da malha de 50 m) é adequado para interpretação magnética e radiométrica. Este método de gridagem foi adotado neste estudo por causa de seus componentes Laplaciano e dos parâmetros de tensão (Briggs, 1974; Swain, 1976; Webring, 1981; Li; Gotze, 1999). O *software* Geosoft Oasis Montaj™ versão 2021 foi usado na análise dos dados aeromagnéticos e gamaespectométricos. Por sua vez, o *software* QGIS versão 3.16.5 foi utilizado para a análise de dados geoespaciais e a geração de mapas.

4.3.1 Magnetometria

A magnetometria é uma técnica muito importante para auxiliar na prospecção de recursos minerais em subsuperfície, sendo vastamente utilizada para identificar contatos geológicos, sejam eles devido a diferenças litológicas ou a estruturas como falhas, fraturas, zonas de cisalhamento e descontinuidades crustais. Esse método propõe a investigação da subsuperfície a partir das anomalias do campo magnético terrestre gerado pela propriedade magnética das rochas, chamada de susceptibilidade magnética (Kearey; Brooks; Hill, 2009; Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Os dados magnéticos do projeto aerogeofísico Rio Grande do Norte-Paraíba 1092 passaram por uma série de processamentos, a fim de obter principalmente informações relativas à geometria dos corpos pegmatíticos e ao controle estrutural na colocação deles na área de estudo. De acordo com Kearey, Brooks e Hill (2009), a filtragem dos dados magnéticos é realizada utilizando-se técnicas matemáticas que realçam ou atenuam feições planares e lineares, possibilitando a distinção entre o sinal da fonte de interesse e o ruído, que é um sinal produzido por fontes indesejáveis. Além disso, a filtragem dos dados magnéticos também permite separar o sinal que é produzido por fontes rasas e profundas, como também permite a detecção de heterogeneidades que ocorrem próximas da superfície.

Essa técnica de filtragem é realizada utilizando-se a Transformada de Fourier, que manipula os dados no domínio da frequência e permite que o reconhecimento das anomalias seja de melhor qualidade e com um maior nível de detalhamento (Kearey; Brooks; Hill, 2009). Os principais produtos selecionados para a análise de áreas favoráveis à ocorrência de pegmatitos foram os mapas aeromagnetométricos de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e o Derivada de Gradiente Vertical (DZ).

O filtro de Amplitude do Sinal Analítico foi utilizado para delinear bordas de fontes magnéticas em profundidade, determinando a geometria da fonte (Li, 2006). Segundo Blakely (1996), o ASA consiste na combinação dos gradientes horizontal e vertical da anomalia. Seus resultados são dependentes da profundidade, extensão e ângulo de mergulho do corpo, além da direção do campo magnético da Terra.

As derivadas dos campos potenciais são utilizadas para ampliar os sinais de alta frequência, provenientes de fontes rasas e eliminar os efeitos regionais de

grandes comprimentos de onda (Milligan; Gunn, 1997). O filtro da derivada vertical amplifica as respostas de baixo comprimento de onda e alta frequência, e minimiza as anomalias de grande comprimento de onda e baixa frequência. O resultado deverá apresentar anomalias nas bordas destas fontes rasas (Nettleton, 1954).

A derivada vertical é utilizada na magnetometria, principalmente, para estudos de fontes rasas, realçando respostas relacionadas a comprimentos de onda curtos. Representam campos magnéticos onde há a eliminação dos efeitos regionais e da interferência entre anomalias adjacentes, sendo eficiente para a análise de feições estruturais regionais, como falhamentos de empurrão e padrões de deformação (Milligan; Gunn, 1997).

4.3.2 Gamaespectrometria

A gamaespectrometria é um importante método geofísico para auxiliar nos mapeamentos geológicos de superfície, uma vez que diferentes tipos de rochas podem ser reconhecidas pelas assinaturas radioativas identificadas através desse método. Os elementos de maior interesse em exploração radiométrica são o equivalente do urânio (^{238}eU), o equivalente do tório (^{232}eTh) e o potássio (^{40}K). Segundo Kearey, Brooks e Hill (2009), os isótopos destes elementos químicos desintegram-se espontaneamente e emitem partículas que liberam energia na forma de radiação eletromagnética.

A interpretação dos dados radiométricos tem como objetivo delimitar áreas com diferentes níveis de radioatividade de elementos equivalentes do urânio, equivalentes do tório e do potássio, elaborando-se desse modo mapas de unidades radiométricas (Tabela 9). Esses mapas indicam de uma forma qualitativa a distribuição dos três radioelementos nos materiais de superfície (Kearey; Brooks; Hill, 2009).

Tabela 9 - Concentração média de radioelementos em rochas ígneas

TIPOLOGIA	U (PPM)	Th (PPM)	K (%)
Granitoides	0,4 – 7,8	2, 3 - 45	0,3 – 4,5
Granitos, riolitos etc	4,5	15	-
Ácida intrusiva	0,1 - 30	0,3 – 9,6	2,6 – 5,5
Pegmatitos	0,3 - 1	0,3 – 9,6	2,6 – 5,5
Aplitos	1,8	3 - 20	0,6 - 4
Ácida extrusiva	0,8 – 16,4	1,1 - 41	1 – 6,5
Quartzo feldspática porfirítica	1,3 – 2,9	6 - 14	1 - 5
Média	5,7	31,6	3,2
Desvio padrão	8,7	68,2	2,6
Coefficiente de variação	1,5	2,2	0,8

Fonte: Modificada de Silva *et al.* (2010)

A composição ternária RGB, obtida a partir da combinação desses canais, permite analisar proporcionalmente a contribuição de cada elemento (U, Th e K) e definir domínios gamaespectrométricos. Segundo Dickson e Scott (1997), dentro de um dado tipo de rocha existe uma ampla variação das concentrações de radioelementos, o que impossibilita uma classificação petrográfica prévia com base apenas nos dados gamaespectrométricos. Contudo, em pequenas regiões, diferentes tipos de rocha podem ser identificados com base na concentração relativa dos radioelementos.

As variações nas concentrações dos radioelementos podem ser realçadas através da aplicação de razões entre os três canais, tal como aplicado em dados de reflectância. Como existe alta correlação entre os canais, as razões frequentemente mostram feições sutis que não são aparentes quando esses dados são analisados isoladamente.

4.4 TRABALHOS DE CAMPO E COLETA DE AMOSTRAS

A metodologia de campo se deu através de caminhamentos realizados com o suporte do aplicativo *Avenza Maps* de forma regional, entre os municípios de Parelhas, Carnaúba dos Dantas, Equador (RN), Nova Palmeira e Pedra Lavrada (PB), onde foram visitados 14 pontos previamente destacados pelo método de sensoriamento remoto e pelo mapa do projeto lítio da CPRM (2018). Alguns corpos pegmatíticos portadores de Li foram identificados, e amostras representativas desses corpos, bem como dos minerais de lítio, foram coletadas para caracterização mais

detalhada. Além disso, também foram visitados pontos onde foi possível descrever as rochas encaixantes dos pegmatitos.

As descrições dos afloramentos de pegmatitos se deu seguindo uma sequência lógica de acordo com as zonas (em corpos zonados), onde foram abordadas observações acerca das assembléias mineralógicas, texturas, estruturas e relações entre as zonas. A descrição dos afloramentos das rochas encaixantes contemplou critérios mineralógicos, estruturais e metamórficos, abrangendo também as relações texturais e de contato com as intrusões (veios e diques). As amostras coletadas foram colocadas em sacos plásticos e identificadas de acordo com a litologia e a localização.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DE LÍTIO

A etapa de caracterização dos minerais de lítio é importante para a identificação das diferentes fases minerais, considerando-se possíveis impurezas, e a determinação da composição química deles, incluindo a concentração de Li nas diferentes fases minerais. Para tanto, foram utilizadas as técnicas de Difração de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

As amostras coletadas em campo foram descritas macroscopicamente e fotografadas no laboratório de Petrografia da UAMG-UFCG. Na sequência, as amostras foram britadas em um britador de mandíbulas. Contudo, aquelas com tamanho superior à abertura foram quebradas em tamanhos menores, permitindo, assim, sua efetiva britagem (Figura 14).

Figura 14 - Britador de Mandíbulas



Fonte: Acervo da autora (2023)

Em seguida, o material britado foi direcionado a um moinho de bolas – fator de enchimento em torno de 40% e corpos moedores com diâmetros de 20 e 10 mm – para cominuição e obtenção do fino desejado, ou seja, abaixo de 200 malhas (Figura 15). O produto do moinho foi então direcionado à etapa de peneiramento, o qual foi realizado a seco, em peneira da série Taylor, com abertura única de 0,074 mm.

Figura 15 - Moinho de Bolas



Fonte: Acervo da autora (2023)

A caracterização dos minerais portadores de Li ocorreu no Laboratório de Caracterização de Materiais, na Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, pelo método do pó (amostras pulverizadas), onde as amostras pulverizadas passaram por uma peneira ABNT n° 200 (0,074 mm) para serem submetidas às análises químicas de Fluorescência e Difractometria de Raios X.

A composição química dos materiais foi determinada por espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). Esta técnica se baseia no princípio da absorção de raios X pelo material que provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Essa análise química foi realizada através de espectrometria de Fluorescência de Raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu EDX 720) para obter os óxidos presentes na composição das amostras (Figura 16).

Figura 16 - Espectrômetro de Raios X



Fonte: Acervo da autora (2023)

O equipamento operou com as seguintes condições: tensão do tubo Ti-U 50 kV, corrente no tubo de 78 μ A, colimador 10 mm, tempo real de integração de 100 s. Já o tubo Na-Sc operou com tensão de 15 kV, corrente de 874 μ A, colimador 10 mm e com tempo real de integração de 100 s. Ambos operaram sob o vácuo.

A caracterização mineralógica foi realizada utilizando-se a Difração de Raios X (DRX), que consiste em uma análise qualitativa capaz de identificar as fases mineralógicas presentes na amostra. Para esta análise, as amostras são colocadas em recipiente de alumínio e depois no Difratorômetro Shimadzu XRD6000 (Figura 17) com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 kV, corrente de 40 kv e 30 mA, modo de escaneamento por passos (*fixed time scan*), com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6 s, com ângulo 2θ percorrido de 5° a 60° . O comprimento de onda utilizado foi de 1,5406 Å, já que o metal utilizado como alvo no ensaio foi o cobre.

Figura 17. Difratorômetro de Raios X



Fonte: Acervo da autora (2023)

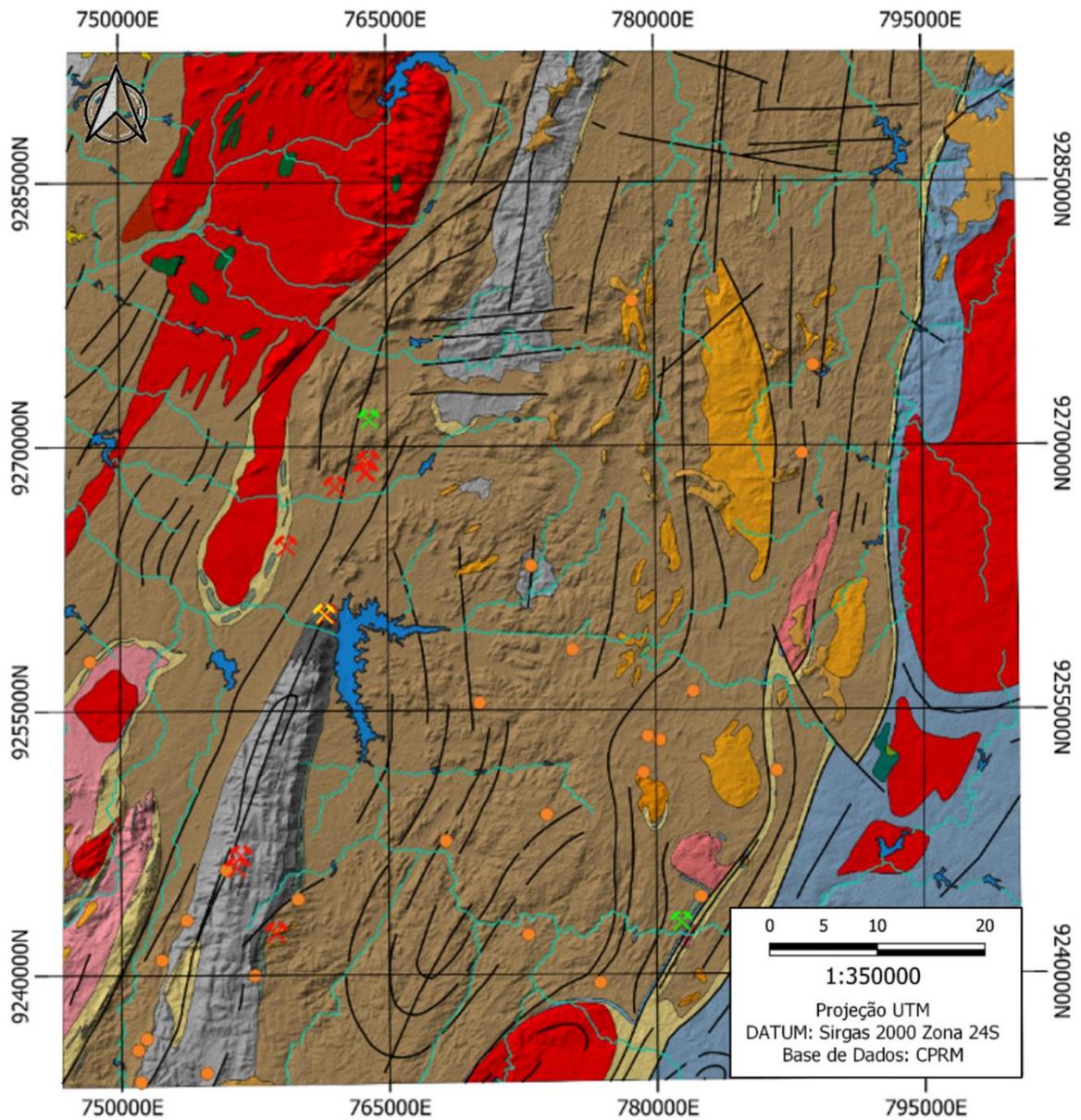
Os dados foram pré-processados e em seguida utilizou-se o *software* Origin 2019 para plotar os difratogramas com os dados disponíveis. Inicialmente, os valores de intensidade de difração foram normalizados, em seguida, o gráfico foi editado, possibilitando visualizar as informações contidas nas distâncias de varredura (2 θ).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As etapas iniciais do projeto foram voltadas para a realização de alguns estudos através do processamento de dados remotos multifonte, sendo estes direcionados para a elaboração de um mapa geológico baseado nos arquivos vetoriais disponibilizados no banco de dados da CPRM, com um recorte para a área de estudo, além do geoprocessamento de imagens dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8, e da aerogeofísica dos dados magnéticos e gamaespectrométricos do projeto aerogeofísico 1092 da CPRM (Rio Grande do Norte - Paraíba).

Por estar contida na PPB, a geologia da área estudada está diretamente associada com os aspectos regionais da província, detalhados pela CPRM no projeto ARIM (Áreas de Relevante Interesse Mineral), o qual reúne diversas informações da PPB (CPRM, 2018), além de ocorrências minerais identificadas em afloramentos (Figura 18). O mapa geológico da área de estudo foi elaborado com base no “Mapa Geológico e de Recursos Minerais de Lítio da Província Pegmatítica da Borborema”, na escala 1:250.000 (CPRM, 2018).

Figura 18 - Mapa geológico da área de estudo



Legenda	
	Drenagem Unifilar
	Drenagem Bifilar
	Estruturas
	Ocorrência Não Identificada
	Possível Ocorrência
	Ocorrência Identificada
	Pontos Não Visitados

Unidades Litológicas	
	Depósitos Aluvionares
	Campos Novos - Argilitos
	Basalto Macau
	Serra dos Martins
	Basalto Rio Ceará-Mirim
	Diques de Pegmatito
	Dona Inês
	Alcalina Caxexa
	São João do Sabugi
	Itaporanga
	Seridó - Biotita Xisto
	Formação Equador
	Equador - Metaconglomerado
	Formação Jucurutu
	Jucurutu - Calcissilicatos
	Jucurutu - Mármore
	Granitóides Brasileiros
	Jardim do Seridó
	Complexo Caicó
	Complexo Serrinha - Pedro Velho
	Formação Seridó

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

5.1 GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO

A etapa de geoprocessamento de imagens de satélite foi realizada com base na metodologia descrita e proposta por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019), a qual é composta pelas técnicas de combinação RGB, divisão de bandas e análise do componente principal (PCA), e é direcionada à identificação de pegmatitos portadores de minerais de lítio.

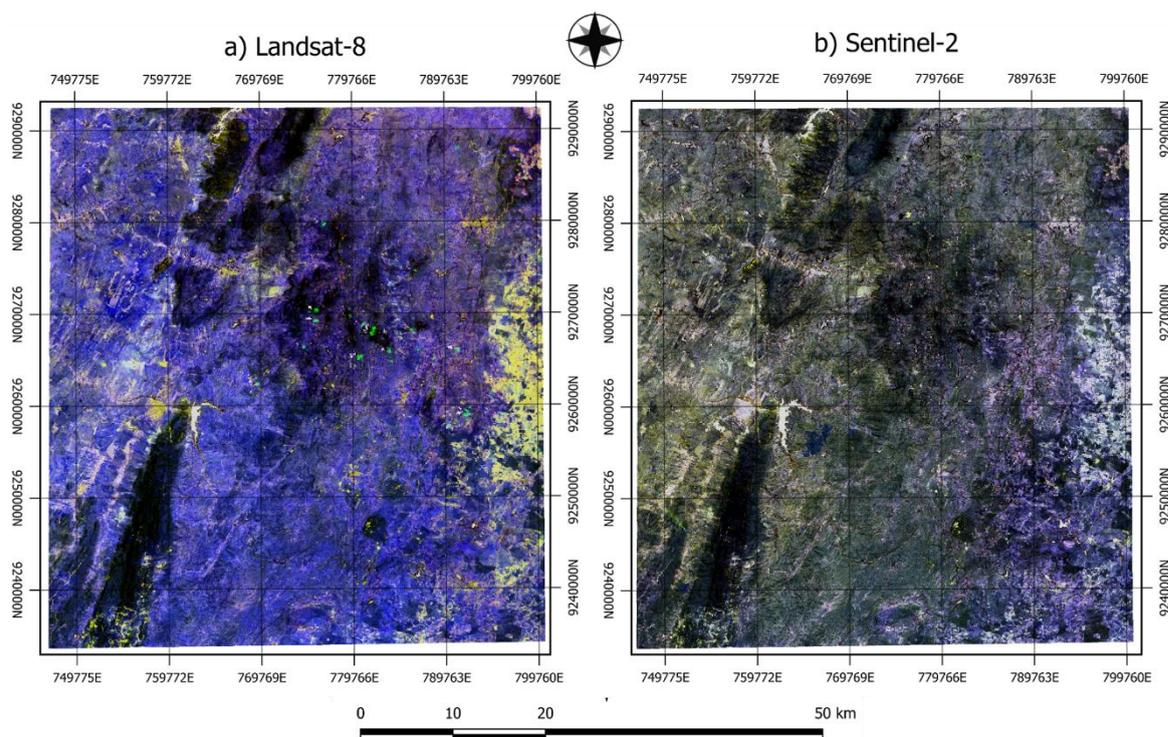
Foram testados alguns métodos propostos pelos autores, associados aos grupos e subgrupos de bandas indicados. No entanto, nem todas as combinações de bandas apresentaram resultados satisfatórios. Por isso, apenas os resultados relevantes serão apresentados e discutidos.

5.1.1 Combinações RGB

Dentre as combinações apresentadas para destacar zonas com possíveis mineralizações de lítio (Tabela 1), a que melhor destacou esses alvos foi a composição entre as bandas 3-2-11 para o Landsat-8, composta por duas bandas na faixa do visível e uma banda no TIR. Nesse conjunto, os alvos destacados apresentam coloração amarelo/dourado, assim como as áreas urbanas e regiões de agricultura, o que gera um ruído que dificulta a interpretação dos alvos portadores de lítio (Figura 19a). Resultados semelhantes foram obtidos por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019).

Diferentemente do Landsat-8, o Sentinel-2 não apresenta bandas no TIR, portanto, as bandas combinadas correspondem a duas bandas no visível e uma banda no SWIR (3-2-12, respectivamente). Esse conjunto apresentou resultados semelhantes ao do Landsat-8, no entanto, com uma melhor relação sinal/ruído, já que as regiões de agricultura foram destacadas em coloração roxo claro a branco, enquanto os possíveis alvos litiníferos apresentaram coloração amarelo/dourado (Figura 19b). As combinações conseguiram destacar pegmatitos conhecidos, onde foram identificadas ocorrências minerais de lítio (Figura 18). Ambas as combinações RGB foram produzidas sem nenhuma máscara aplicada às imagens, já que corpos de água e a vegetação não diminuíram significativamente a relação sinal/ruído.

Figura 19 - Imagens obtidas para a combinação RGB proposta. a) Combinação 3-2-11 para Landsat-8. b) Combinação 3-2-12 para Sentinel-2. As possíveis zonas mineralizadas em lítio correspondem aos pixels de cor amarelo/dourado



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

5.1.2 Divisão de Bandas

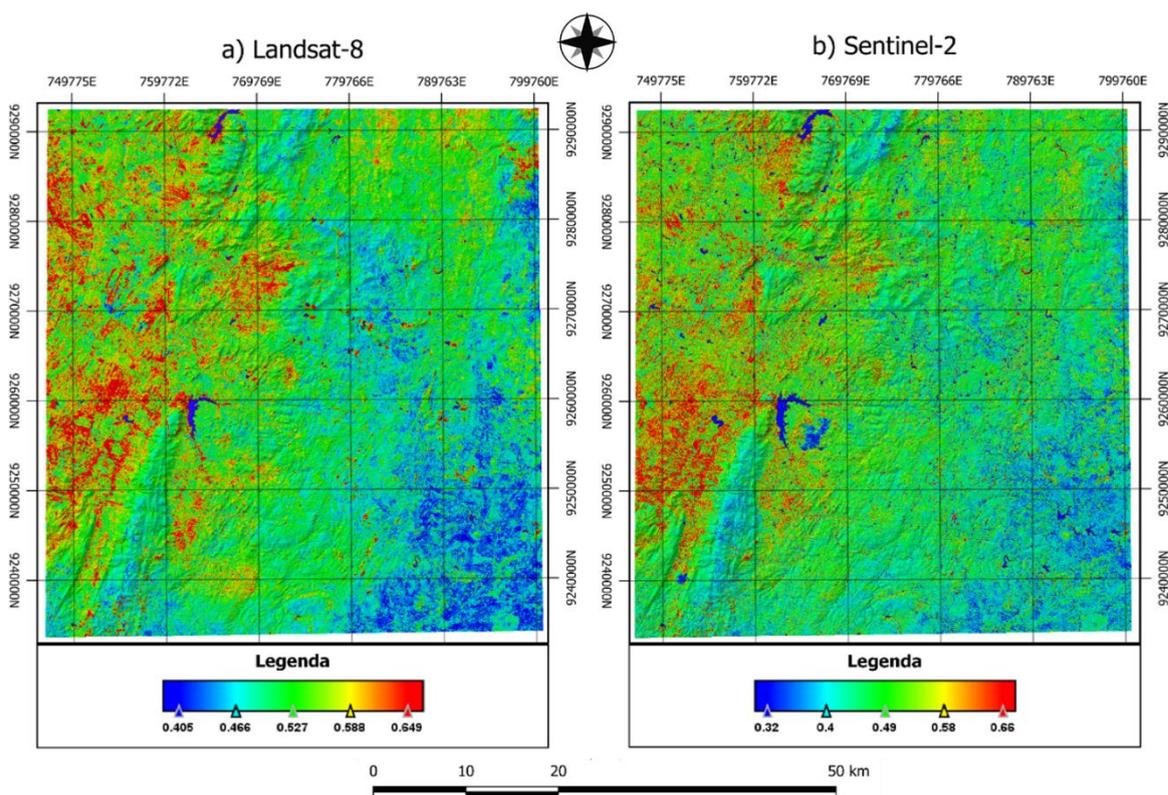
Nesta etapa foram abordadas duas investigações distintas, buscando-se analisar as respostas espectrais dos minerais lepidolita e espodumênio. Dessa forma, dois conjuntos de imagens com resultados semelhantes foram obtidos, os quais também destacaram zonas com possíveis ocorrências de mineralizações de lítio, além de reconhecerem áreas mineralizadas em lítio previamente identificadas.

Foi realizada a divisão das bandas já mascaradas, ou seja, sem os corpos de água e vegetação. As zonas que apresentaram maiores reflectâncias foram destacadas em vermelho, com base no histograma de cada imagem.

Na relação de bandas utilizadas para analisar a lepidolita (4/7 – Landsat-8 e 4/12 – Sentinel-2), foi possível destacar zonas previamente observadas nas combinações RGB, nas quais foram identificados possíveis alvos para mineralização de lítio, o que representa um resultado satisfatório. No entanto, nas imagens de ambos os satélites pode-se observar pequenos ruídos, representados pelas áreas de agricultura e áreas urbanas a oeste da área de estudo (Figura 20).

No mapa da esquerda é possível observar o produto da divisão das bandas 4/7 do Landsat-8. E no mapa da direita, a divisão das bandas 4/12 do Sentinel-2. Zonas de maiores reflectâncias apresentam coloração vermelho, calculadas pelo histograma de cada imagem representado na legenda.

Figura 20 - Resultado da divisão de bandas propostas para mapeamento da lepidolita

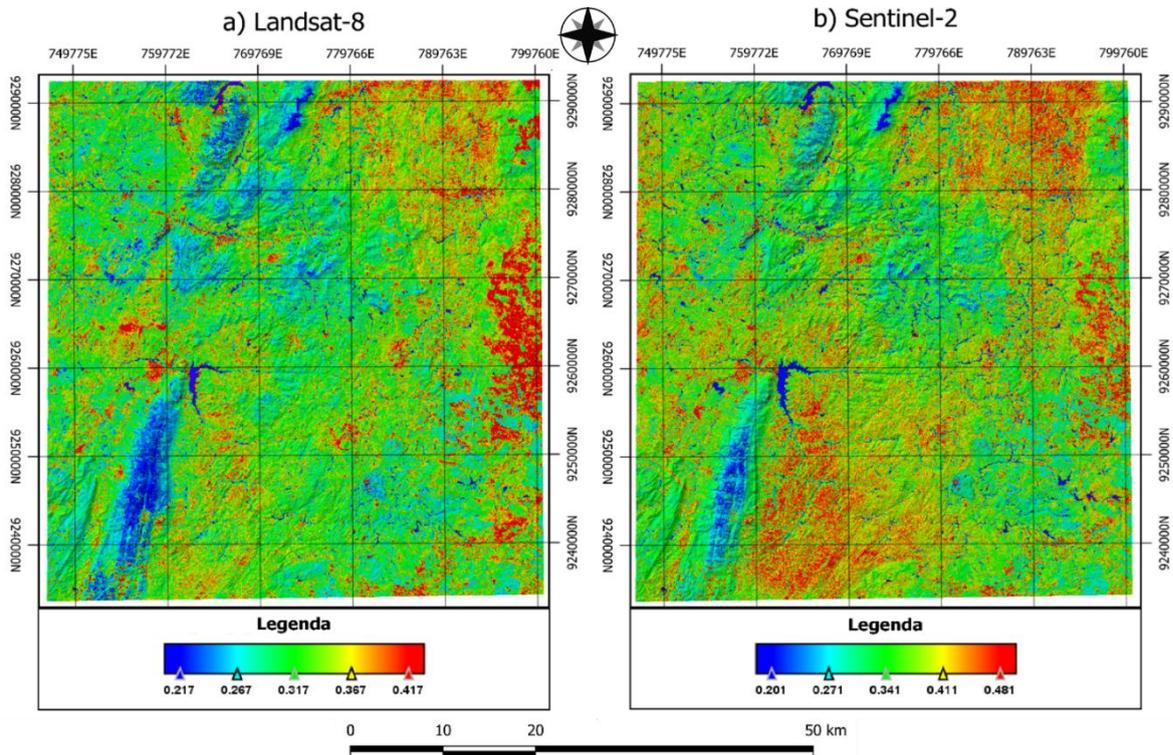


Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Nas bandas utilizadas para analisar o mineral espodumênio (3/5 – Landsat-8 e 3/8 – Sentinel-2), obteve-se uma menor relação sinal/ruído, pois as áreas de agricultura apresentaram um alto valor de reflectância, assim como as zonas com possíveis mineralizações, o que dificultou a interpretação. No entanto, as divisões de bandas para o espodumênio realçaram zonas semelhantes na análise da lepidolita e pelas combinações RGB (Figura 21).

No mapa da esquerda é possível observar o produto da divisão das bandas 3/5 do Landsat-8. E no mapa da direita, a divisão das bandas 3/8 do Sentinel-2. Zonas de maiores reflectâncias apresentam coloração vermelho, calculadas pelo histograma de cada imagem representado na legenda

Figura 21 - Resultado da divisão de bandas propostas para mapeamento do espodumênio



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

5.1.3 Análise de Principal Componente (PCA)

A partir dessa técnica, foi possível destacar as zonas com possíveis mineralizações de lítio do *background*. Dessa forma, os ruídos causados pelas áreas de agricultura e manchas urbanas foram eliminados, possibilitando a identificação dos pegmatitos e zonas de interesse também observados pelas técnicas aplicadas anteriormente. As combinações propostas (Tabela 10) apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 10 - Conjunto de bandas aplicadas no PCA

Conjunto PCA			
Espodumênio		Lepidolita	
Landsat-8	Sentinel-2	Landsat-8	Sentinel-2
3,5	3,8	4,7	4,12

Fonte: Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019)

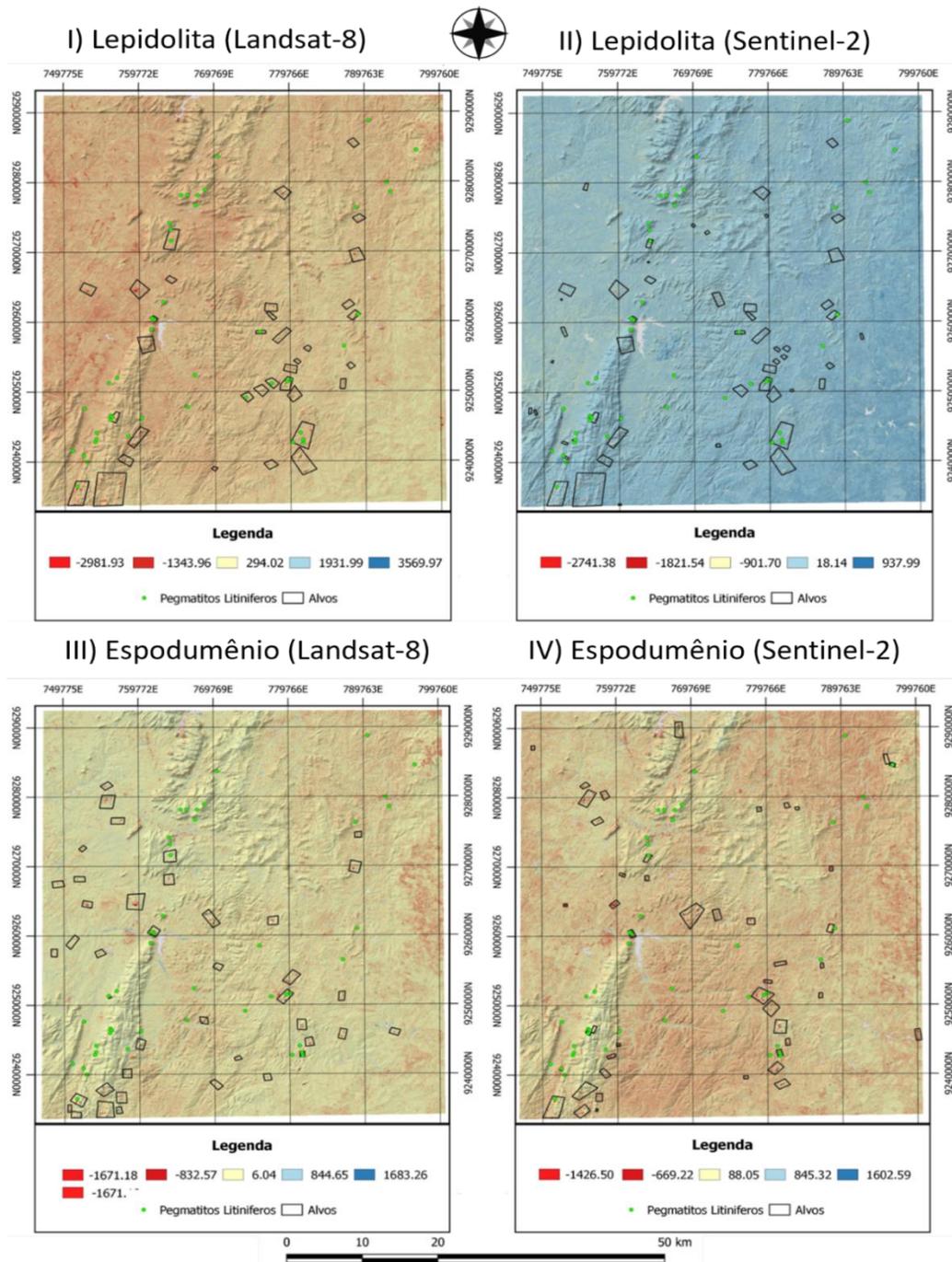
O conjunto de 4 PCs obteve os mesmos resultados para o conjunto de 2 PCs, apenas com leves variações no brilho de pequenas áreas. Por isso, apenas as imagens obtidas pelos 2 PCs serão apresentadas. Para facilitar a visualização das zonas de interesse, uma coloração foi aplicada nas imagens. As possíveis mineralizações estão destacadas em vermelho e envoltas por polígonos. Pôde-se também relacionar os resultados obtidos com pegmatitos litiníferos previamente identificados (pontos verdes no mapa), sendo possível constatar a relação entre ambos, que se localizam próximos ou diretamente na área mapeada.

As imagens apresentadas na Figura 22 mostram os resultados da PCA para os minerais de lítio lepidolita e espodumênio, obtidas a partir do processamento das imagens do Landsat-8 e Sentinel-2.

Em (I) está representada a PC da imagem do satélite Landsat-8 destacando as áreas potenciais para ocorrência de lepidolita; e em (II) também está representada a PC destacando as áreas potenciais para ocorrência de lepidolita, mas com imagens do satélite Sentinel-2.

Em (III) e (IV) são observados esses mesmos produtos de PC, mas destacando áreas potenciais para a ocorrência do mineral espodumênio, tanto para o satélite Landsat-8 (III) quanto para o Sentinel-2 (IV). Em todos os mapas apresentados a seguir, as áreas com potenciais mineralizações de Li estão representadas por *pixels* em vermelho e destacadas em preto.

Figura 22 - Imagens obtidas com conjunto de PCs, para mapeamento de lepidolita e espodumênio. Zonas com possíveis mineralizações apresentam pixels vermelhos e estão destacadas em preto



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Com base nos produtos de processamento digital de imagens, foi possível obter um bom resultado na identificação de áreas potenciais para a ocorrência de pegmatitos que contêm minerais de Lí. Nesse sentido, apesar de uma baixa relação sinal/ruído, a combinação RGB conseguiu mapear diversas zonas potenciais de

pegmatitos litiníferos, além de identificar aqueles já mapeados previamente. Já a técnica de divisão de bandas, também destacou diversas zonas potenciais e com melhor relação sinal/ruído, isso porque foram utilizadas assinaturas espectrais de minerais de lítio (espodumênio e lepidolita), promovendo uma busca mais específica, que, conseqüentemente, permitiu mapear possíveis zonas alvos e pegmatitos litiníferos. A análise do componente principal (PCA) permitiu a obtenção dos melhores resultados, já que melhorou consideravelmente o sinal das imagens, destacando os alvos de maneira isolada.

5.2 AEROGEOFÍSICA

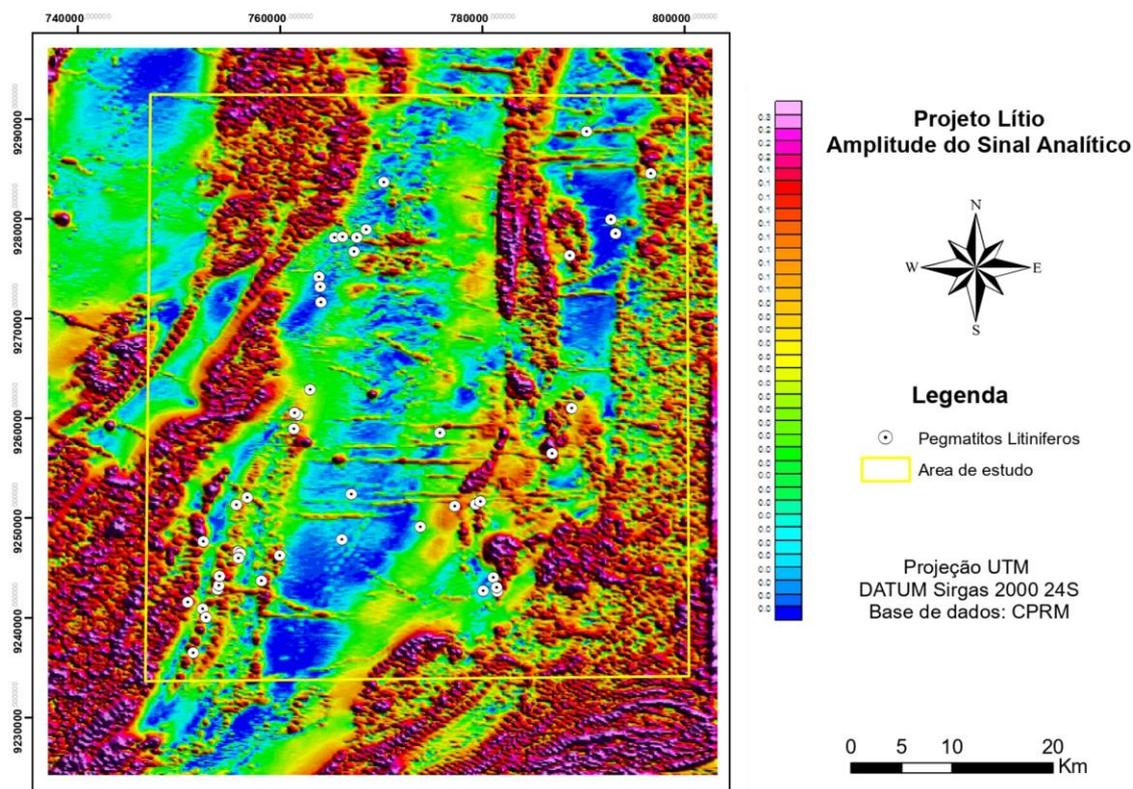
Os produtos geofísicos podem ser utilizados tanto de forma qualitativa, na geração de mapas litogeofísicos, de domínios magnéticos e interpretação de estruturas magnéticas, quanto de forma quantitativa, através da caracterização tridimensional dos parâmetros físicos de anomalias (contraste de susceptibilidade magnética). Os resultados dos dados geofísicos serão apresentados na sequência, no formato de mapas magnéticos e radiométricos.

5.2.1 Dados Magnéticos

Os resultados referentes aos dados magnéticos foram baseados em dois mapas produzidos através de dois tipos de filtragem: mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e mapa de Derivada Vertical (DZ). Ambos os produtos têm como principal objetivo realçar estruturas que venham a ocorrer na área de estudo, além de destacar também possíveis corpos que revelem um contraste de susceptibilidade magnética.

O mapa da Amplitude do Sinal Analítico (Figura 23) realçou anomalias magnéticas com valores de 0,0 a 0,3 nT. O ASA frequentemente corresponde a contatos litológicos, falhas, fraturas e intrusões, dessa forma, o mapa apresenta assinaturas magnéticas seguindo um padrão de distribuição mais orientada, acompanhando dois *trends* preferenciais, um NE-SW e outro E-W. A cor azul corresponde a baixos valores da susceptibilidade magnética, a cor verde a valores médios e a cor vermelha a valores altos.

Figura 23 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA)



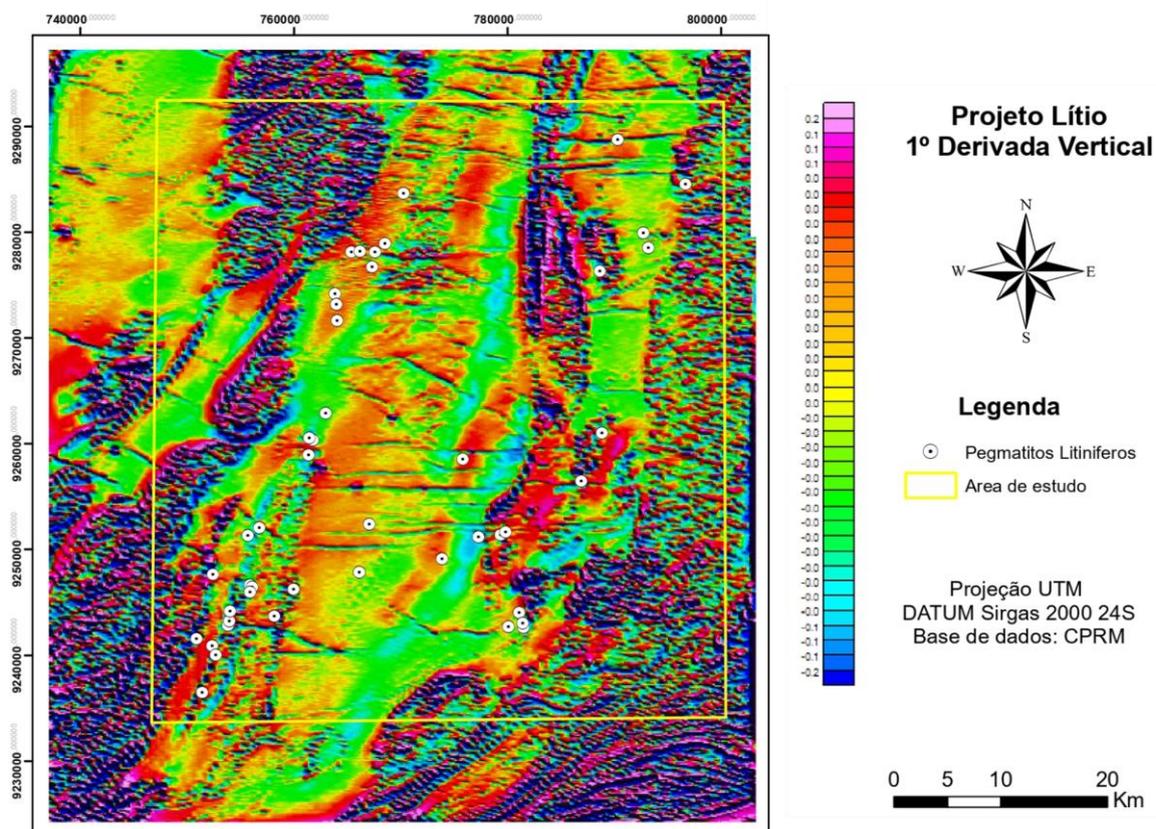
Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Os contatos entre as intrusões graníticas e as rochas do embasamento (Formação Seridó) apresentam altos contrastes magnéticos, sendo observados, principalmente, na porção oeste do mapa. Há ainda uma área de anomalia magnética positiva a leste e sudeste da área, representando as rochas do Domínio Geológico São José do Campestre (Complexo Serrinha-Pedro Velho).

É possível observar neste mapa que os pontos plotados referentes à ocorrência de pegmatitos litiníferos correspondem, em sua maioria, a “altos magnéticos”, confirmando o controle estrutural na colocação dos corpos pegmatíticos. Há ainda uma grande região central, representando uma anomalia negativa, com uma presença maior de estruturas que seguem um padrão de direção E-W.

Outro produto proveniente dos dados magnéticos foi o mapa de Derivada Vertical (Figura 24), cujas anomalias magnéticas apresentam valores variando de -0,2 a 0,2 nT/m. Da mesma forma, as assinaturas magnéticas expressas por essa filtragem mostram lineamentos magnéticos correspondentes aos apresentados no mapa anterior.

Figura 24 - Mapa de Derivada Vertical (DZ)



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Neste mapa, todos os pontos referentes à ocorrência de pegmatitos litiníferos estão plotados em “altos magnéticos”, que correspondem a fontes magnéticas rasas onde os limites dos corpos são destacados pelo método, principalmente na região central do mapa. Além disso, nessa mesma região também é possível observar uma maior densidade de estruturas com trend E-W.

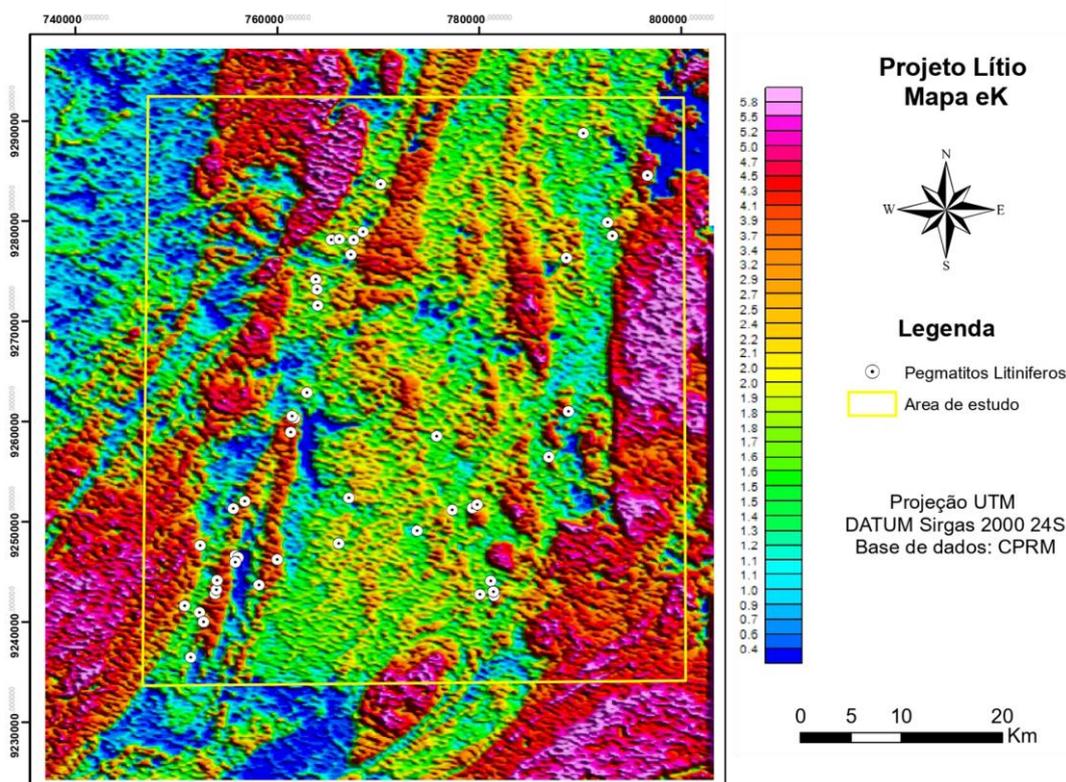
5.2.2 Dados Gamaespectrométricos

Os resultados referentes aos dados radiométricos foram baseados em cinco mapas confeccionados: mapa de Potássio (K), mapa de Urânio equivalente (eU), mapa de Tório equivalente (eTh), mapa de composição RGB e mapa Fator F. Esses produtos fornecem informações superficiais sobre a rocha estudada, permitindo assim a obtenção de dados sobre a radiação emitida naturalmente pelos radioelementos utilizados.

Com a finalidade de compreender o comportamento dos elementos analisados no levantamento gamaespectrométrico, será brevemente abordado o comportamento geoquímico dos radioelementos K, U e Th na natureza, estabelecendo-se assim os fundamentos para uma apreciação dos resultados obtidos.

O mapa de potássio oferece informações sobre o teor deste elemento na superfície, cujos valores dispostos variam de 0,4% a 5,8% de concentração de potássio para a área estudada (Figura 25). Observa-se que as anomalias de potássio estão dispostas de uma forma organizada ao longo do mapa, acompanhando os padrões estruturais com *trend* NE-SE. As anomalias de potássio estão relacionadas, principalmente, às intrusões graníticas e pegmatíticas, além dos quartzitos, metaconglomerados e paragnaisses. Essas rochas normalmente são quartzofeldspáticas e gnáissicas ricas em feldspatos e muscovitas, justificando os altos teores de potássio.

Figura 25 - Mapa de Concentração do Elemento Potássio (K)

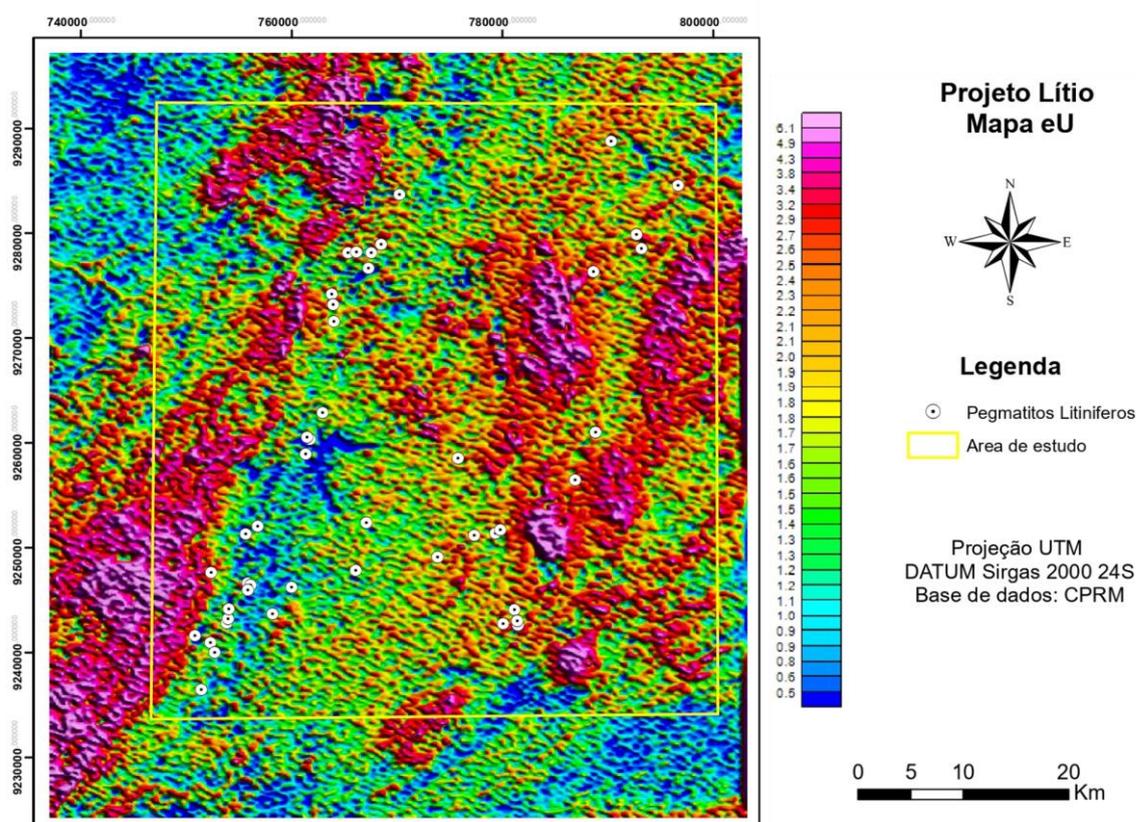


Fonte: Elaborada pela autora (2023)

O mapa de concentração do elemento Urânio equivalente (eU) apresenta concentrações em ppm, por não ser este um elemento tão abundante quanto o

anterior. Dessa forma, as anomalias apresentadas no mapa variam de 0,5 a 5,1 ppm e ocorrem de forma mais dispersa, mas ainda assim é possível observar um lineamento, o qual corresponde às estruturas já observadas nos demais produtos (Figura 26). Porém, é notável a presença de uma anomalia na porção leste da área de estudo, destacada pela coloração em tons mais quentes (vermelho a rosa). As anomalias de urânio estão muito relacionadas ao grau de intemperismo e também às intrusões graníticas e pegmatíticas, devido às ocorrências de zircão e monazita, dentre outros minerais.

Figura 26 - Mapa de Concentração do Elemento Urânio (U)



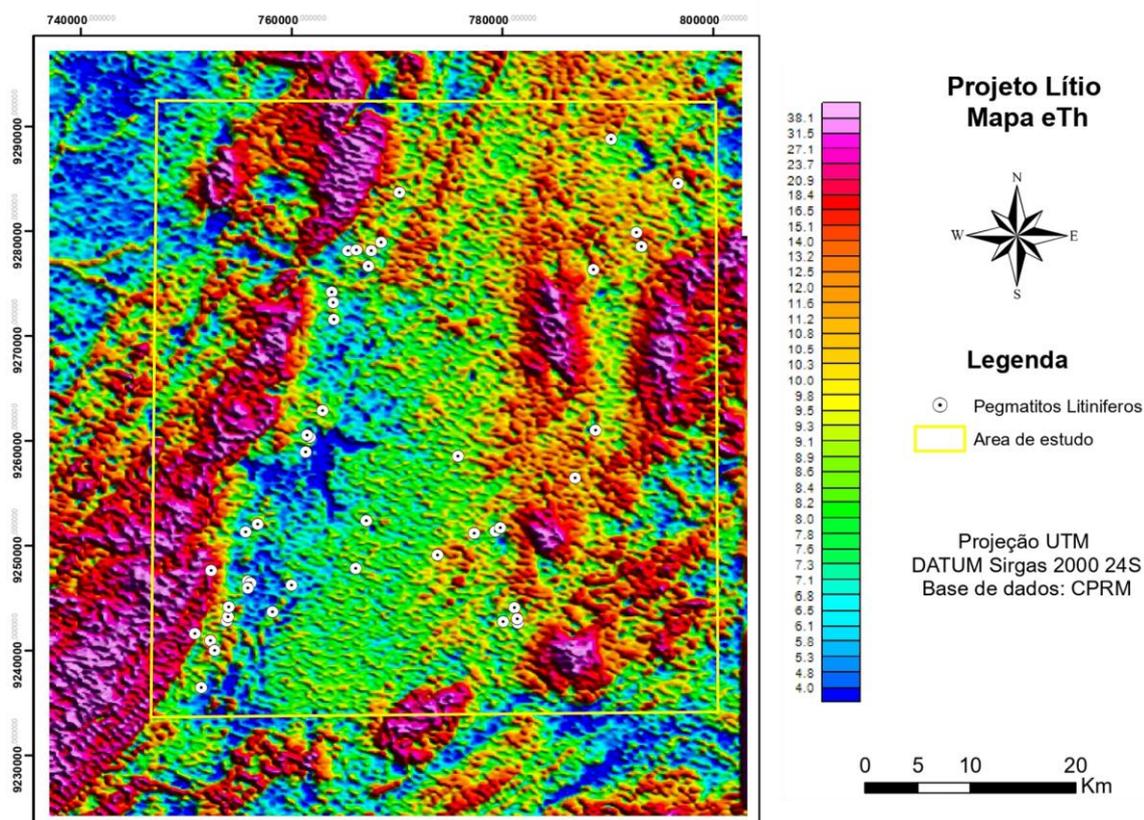
Fonte: Elaborada pela autora (2023)

O mapa de concentração do elemento Tório (Th) apresenta valores dispostos que variam entre 4,0 a 38,1 ppm, concentrações muito marcantes, caso se leve em consideração a abundância desse elemento na superfície e os demais produtos radiométricos (Figura 27). Em geral, as altas concentrações equivalentes de tório estão intimamente relacionadas à monazita, apatita e torita em granitos e pegmatitos.

Além disso, nesse mapa também é possível observar alguns lineamentos

demarcados pelas anomalias, acompanhando a estruturação da região, já percebidas anteriormente. Nesse produto, assim como no mapa de concentração do elemento urânio, é notável a presença de uma anomalia na porção leste da área de estudo, local onde estão plotados alguns pontos referentes à ocorrência de pegmatitos litiníferos. Já a porção oeste do mapa, apresenta uma grande anomalia correspondente às estruturas que obedecem ao *trend* NE-SW. No entanto, nessa região os pontos de ocorrência de pegmatitos litiníferos estão plotados em locais cujas anomalias são mais baixas.

Figura 27 - Mapa de Concentração do Elemento Tório (Th)

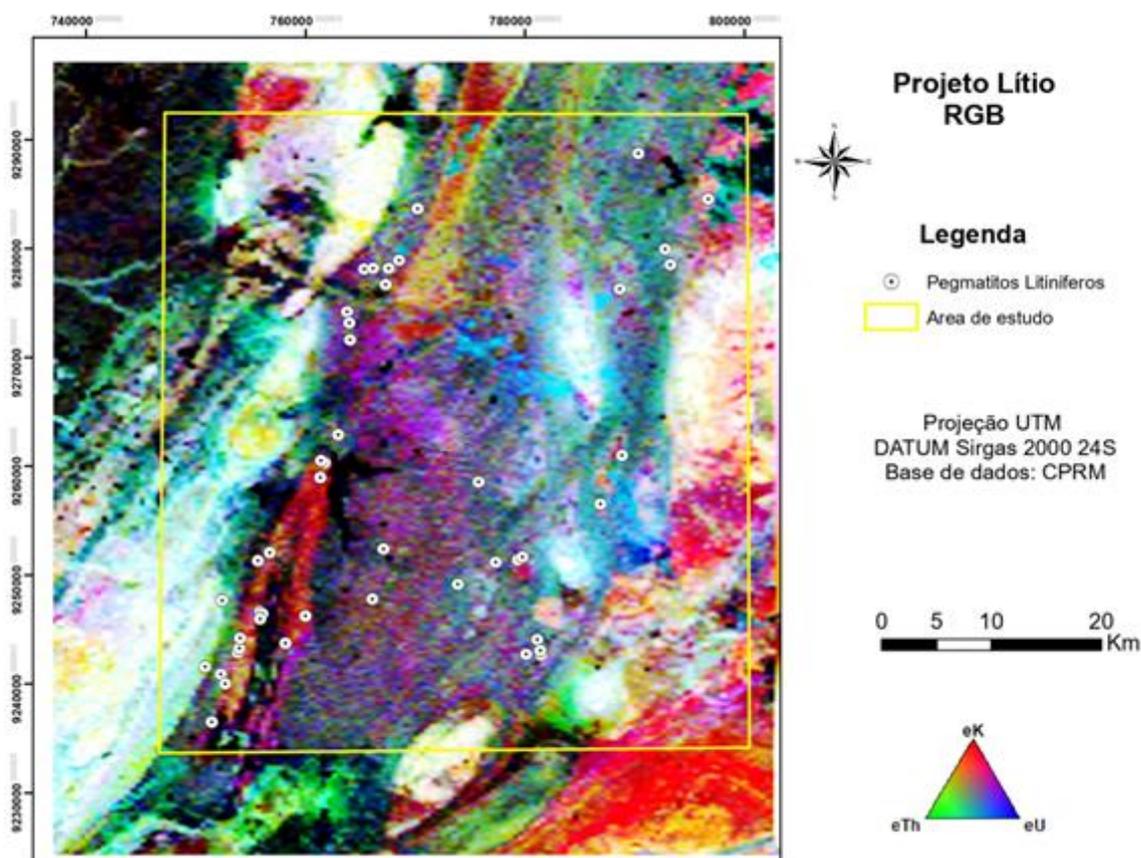


Fonte: Elaborada pela autora (2023)

O mapa ternário de composição RGB mostra as concentrações dos elementos radioativos presentes na região, representando o potássio no canal vermelho, o tório no canal verde e o urânio no canal azul (Figura 28). É possível observar que os pontos plotados a oeste no mapa estão destacados em anomalias de coloração vermelha, relacionadas às áreas de ocorrência dos quartzitos e metaconglomerados da

Formação Equador, que são rochas ricas em feldspato e muscovita, hospedeiras de enxames de pegmatitos também ricos nessas fases minerais.

Figura 28 - Mapa de Composição RGB



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Os demais pontos plotados na região central do mapa estão localizados em regiões que apresentam tons de roxo, representando altos teores de urânio e potássio, e tons de ciano, representando altos teores de urânio e tório. Essas regiões correspondem, principalmente, a rochas da Formação Seridó, onde são encontrados micaxistos com biotitas muscovitas, granadas, cordieritas, silimanitas etc.

5.3 TRABALHOS DE CAMPO

As campanhas de campo realizadas ao longo do projeto foram fundamentais para validar as técnicas empregadas, e foi possível identificar corpos pegmatíticos com ocorrência de minerais de lítio, comprovando assim a eficácia dos métodos empregados. Durante as campanhas de campo, foram visitados alvos previamente

identificados pelos produtos remotos multifonte, com observação de relações com encaixante, estruturas associadas, mineralogia do pegmatito e identificação de minerais portadores de lítio, com coleta de amostras.

Inicialmente, foi feito um reconhecimento da área de estudo com a visita a alguns garimpos que apresentavam histórico de ocorrências litíferas (CPRM, 2022), bem como a coleta de algumas amostras de minerais portadores de lítio para as análises de caracterização mineral.

Duas campanhas de campo foram realizadas para coleta de dados, sendo a primeira realizada entre os dias 05 e 08 de maio, e a segunda entre os dias 29 de setembro a 02 de outubro de 2022. Essa etapa teve como objetivo o reconhecimento da área de estudo, bem como comprovar alguns alvos identificados através dos métodos remotos, e realizar a coleta de dados e amostras de corpos pegmatíticos com relativo interesse econômico para a exploração de minerais de Lítio. Durante as etapas de campo foram visitados 26 pontos de afloramento de pegmatitos e rochas encaixantes,

A maioria dos corpos estudados já havia sido explorada pela atividade garimpeira, e isso em parte contribuiu para as análises de campo, pois as rochas se encontravam com uma grande área de exposição. No entanto, em alguns pontos isso acabou tornando as interpretações mais desafiadoras, uma vez que expressiva parte do material de interesse econômico já havia sido removido. Ainda assim, foi possível, em alguns casos, identificar, na análise mesoscópica, os minerais portadores de Lítio, como por exemplo, espodumênio, ambligonita ou trifilita, além da mineralogia acessória clássica dos pegmatitos.

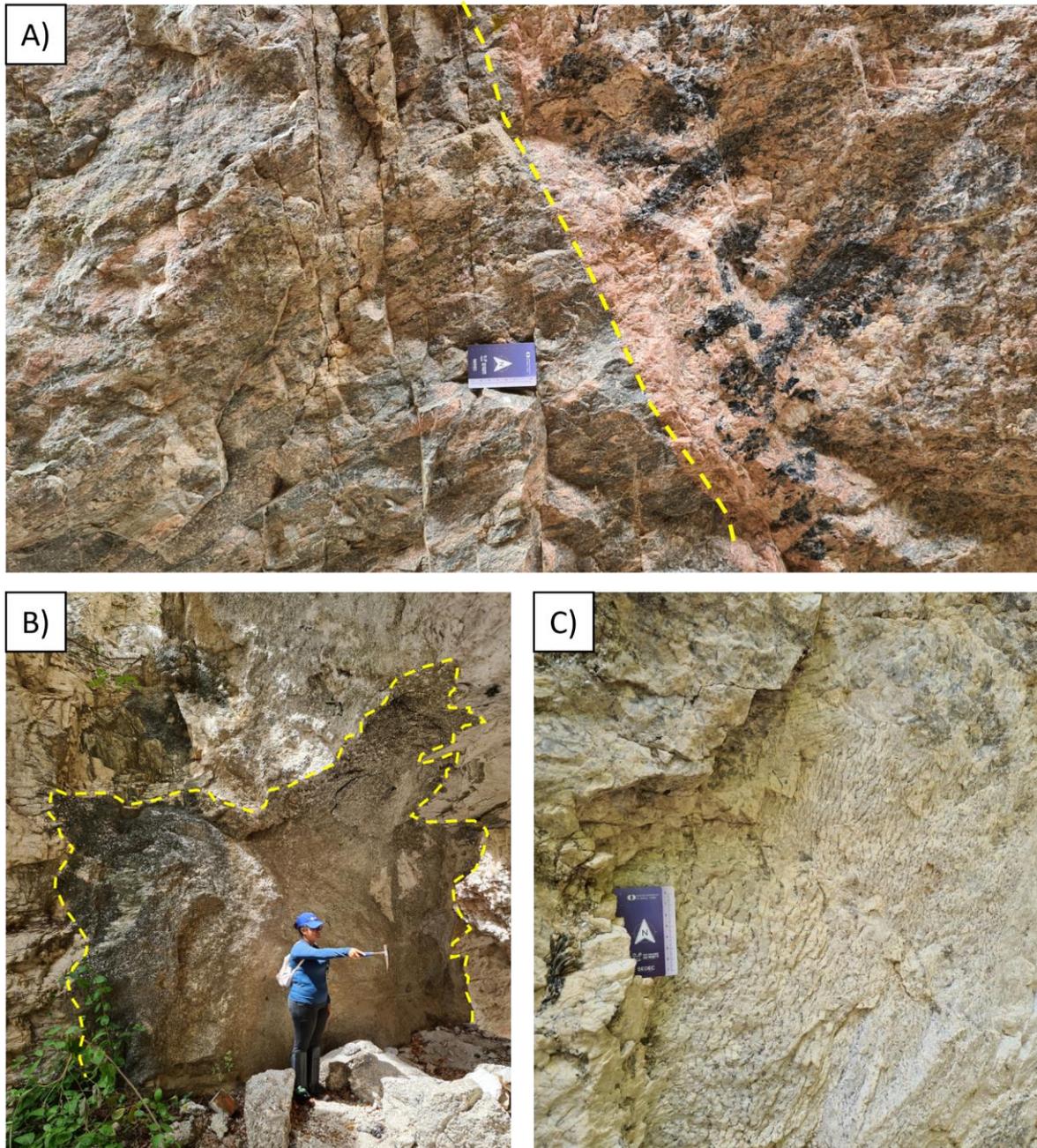
Os principais corpos pegmatíticos visitados na primeira etapa de campo com potencial para ocorrência litífera foram: **Capoeira** (Parelhas/RN), **Salgadinho** (Carnaúba dos Dantas/RN) e **Serra Branca** (Pedra Lavrada/PB). O pegmatito Capoeira, onde atualmente se faz exploração de turmalina paraíba pela Brazil Paraíba Mine, foi visitado mais de uma vez. Nas duas oportunidades, foi possível visualizar o corpo na superfície, em trincheiras, e em subsuperfície, nas galerias da mina.

Neste local, foram analisadas duas trincheiras de um pegmatito heterogêneo com um zoneamento bem definido, caracterizado pela mineralogia diagnóstica de cada zona. O contato entre a encaixante (metaconglomerado da Formação Equador)

e o pegmatito, denominado zona de borda ou zona de parede, é caracterizado pelo crescimento de cristais de turmalina preta (Schorlita) perpendicular ao contato (Figura 29.A).

Foram observados pacotes de muscovita de ordem métrica no contato entre as zonas de borda e intermediária (Figura 29.B), bem como megacristais de feldspato alcalino e textura de intercrescimento do tipo textura gráfica (Figura 29.C). Foi também observada uma assembléia mineralógica bem diversa, com cristais diversos de quartzo (rosa, leitoso, fumê), plagioclásio, feldspato alcalino, micas (muscovita e biotita), schorlita, molibdenita e alguns minerais de cobre (bornita, azurita e crisocola).

Figura 29 - Pegmatito Capoeira. A) Contato entre pegmatito e metaconglomerado, formação de feldspatos alcalinos e turmalinas pretas na zona de borda do pegmatito; B) Bolsão de muscovita na zona intermediária do pegmatito (tracejado amarelo); e C) Intercrescimento de quartzo e albita com textura gráfica



Fonte: Acervo da autora (2022)

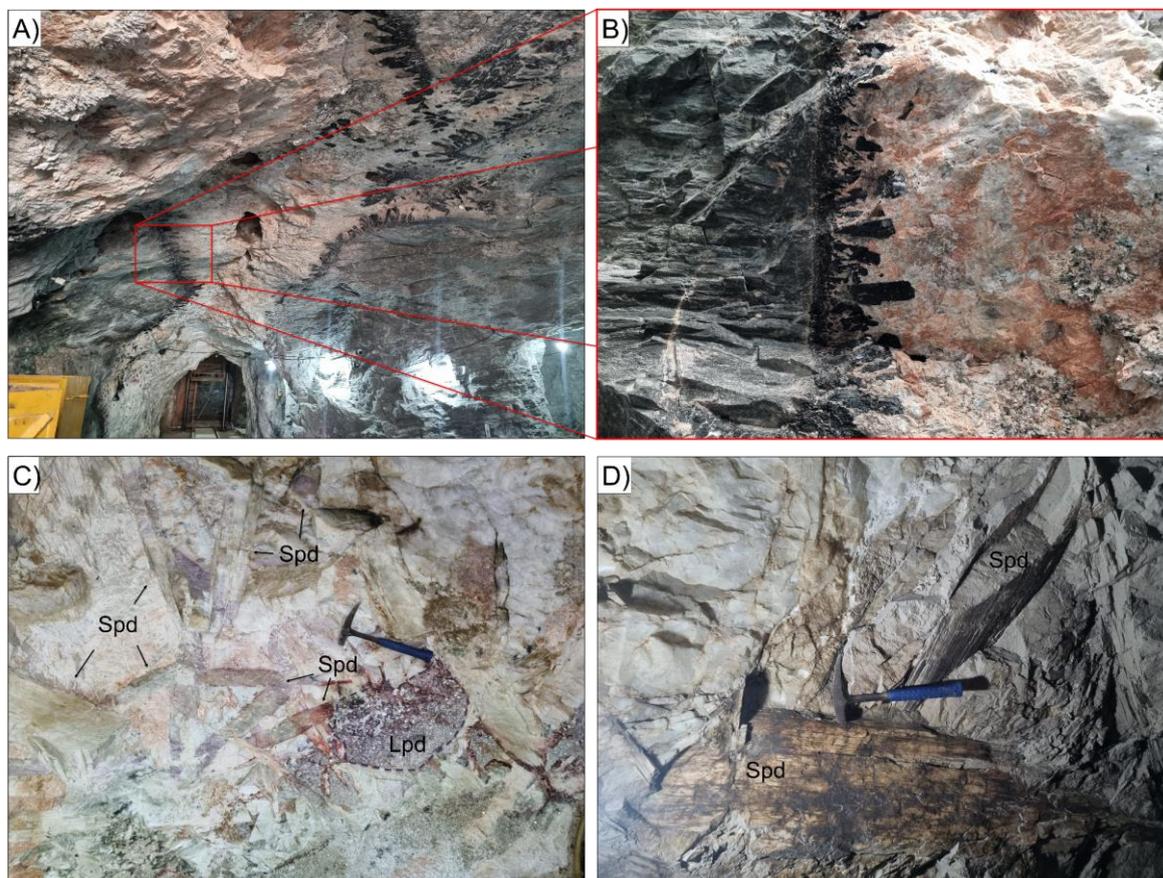
Durante a segunda etapa de campo, foi realizada uma visita técnica às galerias da Brazil Paraíba Mine. Nesta oportunidade, foi visualizado em subsuperfície um dos corpos pegmatíticos do sistema, denominado Capoeira II, e seu comportamento desde o contato com a rocha encaixante, zona de borda, zona intermediária e núcleo.

O pegmatito Capoeira II ocorre seguindo direção E-W (aproximadamente 110°

Az) e está encaixado no metaconglomerado da Formação Equador. A zona de borda é bem definida ao longo do corpo, com ocorrência de cristais de schorlitas, bem cristalizados ou não, perpendiculares a algumas paredes da rocha encaixante (Figura 30.A e B). Ainda nesta zona ocorre uma grande quantidade de cristais de granada (espessartita), muscovita com hábito “*fishtail*” e alguns geodos de turmalina paraíba, apatita e euclásio.

Na zona intermediária do corpo pegmatítico há ocorrência de uma grande variedade mineralógica, com cerca de 58 minerais catalogados até o momento (MINDAT). É nesta zona que são encontrados diversos minerais litiníferos, com presença de uma grande quantidade de espodumênio de cores diversas (castanho, verde, rosa, roxo, branco), próximo aos bolsões de quartzo, em cristais centimétricos a métricos encaixantes (Figura 30.C e D). O núcleo do pegmatito capoeira é formado por bolsões de quartzo de cores variadas.

Figura 30 - Pegmatito Capoeira. A) Contato entre pegmatito e rocha encaixante; B) Detalhe do contato, mostrando cristais de schorlita perpendiculares à parede da encaixante; C) Transição entre zona intermediária e núcleo de quartzo, com desenvolvimento de minerais de lítio, como espodumênio de colorações variadas e lepidolita; e D) Detalhe de cristais métricos de espodumênio próximo ao núcleo de quartzo



Fonte: Acervo da autora (2022)

O pegmatito Salgadinho, atualmente requerido pela Casa Grande Mineração, está sob regime de concessão de lavra para exploração de feldspato. No entanto, o corpo pegmatítico apresentou alta potencialidade para a ocorrência litinífera, visto que foram identificados diversos cristais de espodumênio de ordem centimétrica. Neste ponto, foi obedecido o mesmo critério de descrição do afloramento, da encaixante para o núcleo do corpo pegmatítico.

O corpo está encaixado nos xistos da Formação Seridó, e sua colocação tem um importante fator estrutural, uma vez que foi observado que há uma grande falha na região do afloramento, possibilitando o alojamento do pegmatito (Figura 31.A e B). No entanto, essa estrutura também foi observada cortando o corpo, sendo um possível canal de percolação de fluidos mineralizantes.

A zona de borda é caracterizada pela presença de grandes cristais de muscovita com textura “rabo de peixe” e algumas schorlitas. Já na zona intermediária, foram identificados bolsões com intercrescimento de cristais de muscovita, biotita e quartzo fumê, além de cristais de espodumênio de ordem centimétrica distribuídos ao longo de toda a zona (Figura 31.C e D). Também foi identificada uma variedade de cristais de quartzo (rosa, leitoso, fumê, hialino, roxo), plagioclásio, feldspato alcalino e epidoto.

Figura 31 - Pegmatito Salgadinho. A) e B) Conjunto de falhas cortando o corpo pegmatítico (tracejado branco); C) e D) Cristais de espodumênio na zona intermediária (seta azul)



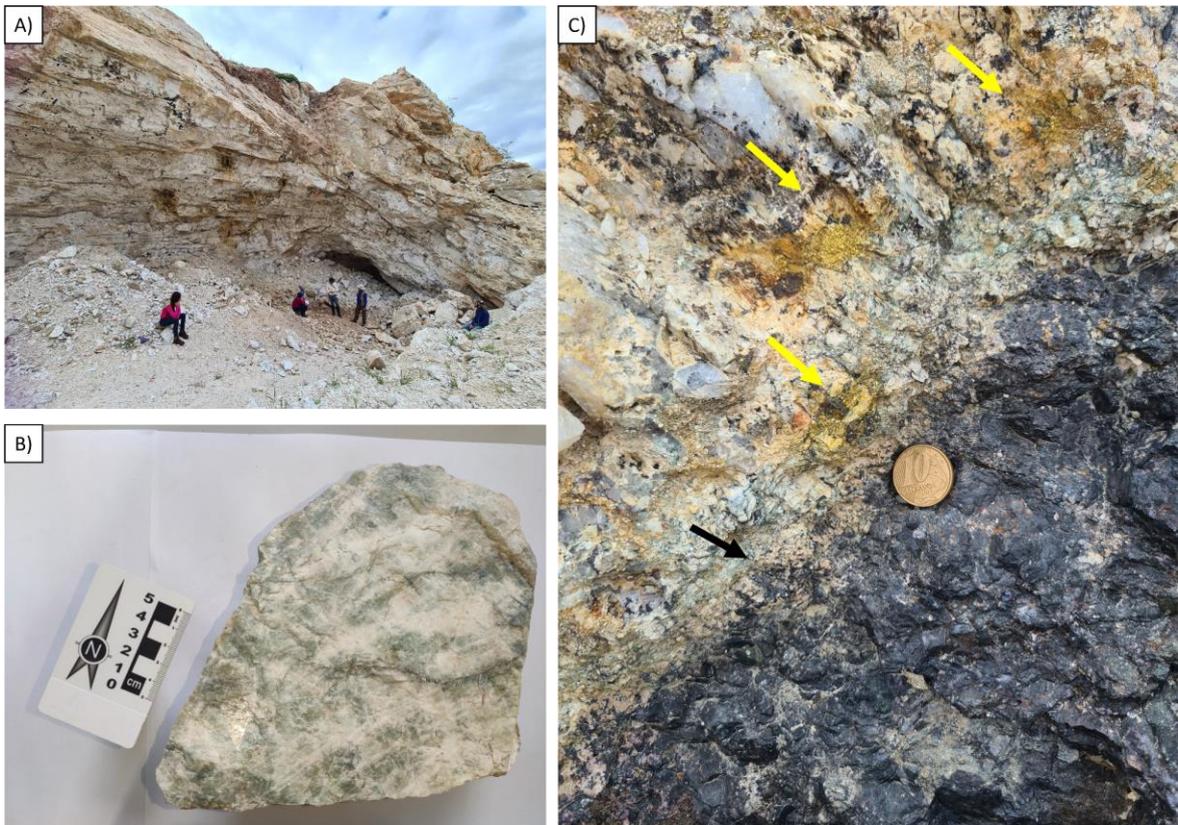
Fonte: Acervo da autora (2022)

O pegmatito Serra Branca, também em fase de exploração, apresentou a maior diversidade mineralógica dentre os afloramentos visitados nesta etapa de campo, bem como alta potencialidade para a ocorrência litinífera. Trata-se de um pegmatito heterogêneo com zonações bem definidas e uma assembléia mineralógica muito variada.

Na zona intermediária, apesar de já ter sido muito explorada pela mineração (Figura 32.A), foi identificada uma vasta variedade mineralógica. No entanto, é caracterizada pela presença de feldspato potássico abundante, por vezes enriquecido com mineralizações de turmalina preta (variedade schorlita), muscovita em placas ou exibindo hábito radial, ambligonita (Figura 32.B) e albita. Além disso, foram identificados alguns bolsões de minerais escuros, os quais são potencialmente fosfatos de lítio (trifilita e litiofilita), associados a uma mineralogia de alteração caracterizada principalmente por pirita secundária (Figura 32.C). Granada de coloração marrom-escuro pode ocorrer subordinadamente e de forma disseminada.

Neste ponto, além dos minerais litiníferos, foram encontrados outros minerais de interesse econômico (elementos raros), como tantalita e cassiterita. Foram observadas algumas feições interessantes, como textura de intercrescimento com ortoclásio e com albita (textura gráfica), e textura radial nas muscovitas (rabo de peixe).

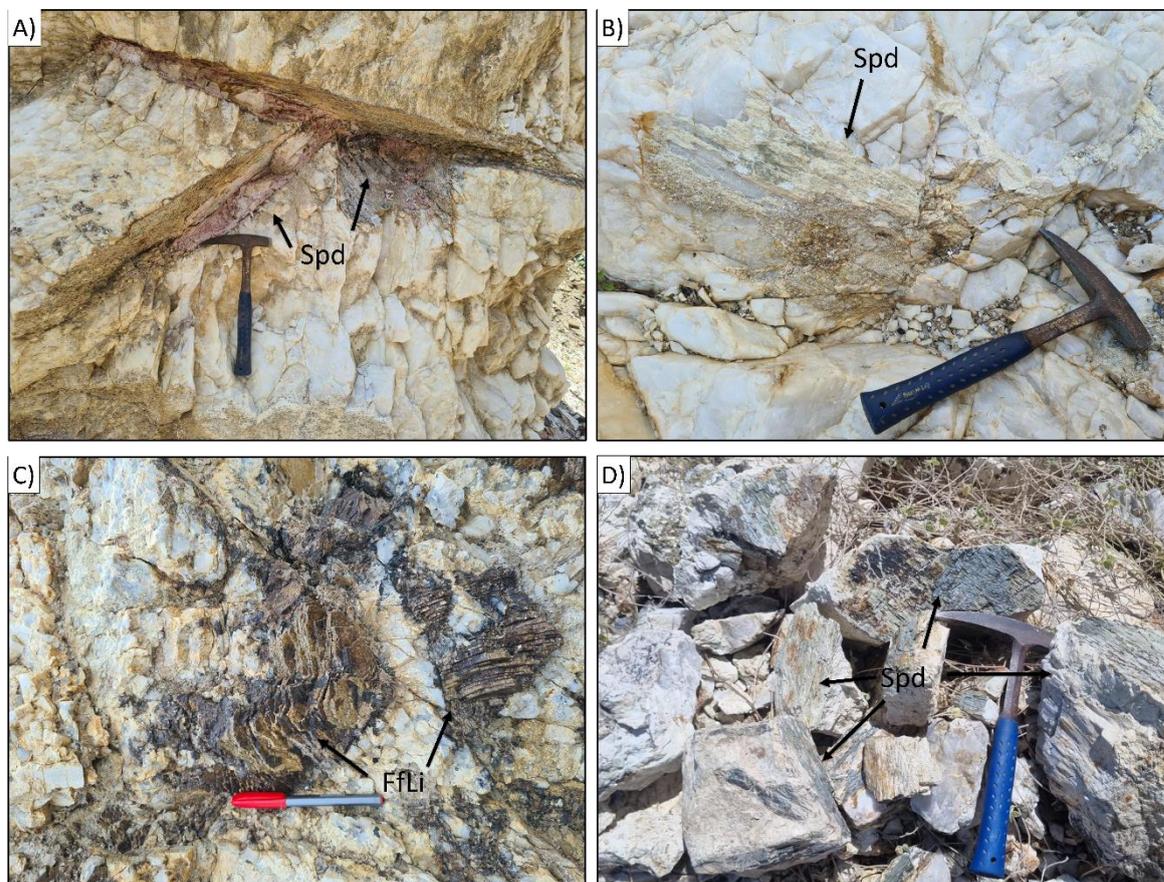
Figura 32 - Pegmatito Serra Branca. A) Zona intermediária explorada pela mineração; B) Cristal de Amblygonita coletado na zona intermediária do pegmatito; e C) Bolsão de potencial fosfato de lítio (seta preta) e formação de cristais de alteração - pirita (seta amarela)



Fonte: Acervo da autora (2022)

Durante a segunda etapa de campo, outros pegmatitos com histórico de ocorrência de minerais litiníferos foram visitados, como por exemplo Pendanga (Nova Palmeira/PB), Quintos de Baixo e Quintos de Cima (Parelhas/RN), Tibiri (Parelhas/RN) e Kombi (Parelhas/RN). Em virtude do estado avançado de exploração desses corpos, não foi possível fazer uma descrição detalhada deles, porém, os potenciais minerais de Li foram observados em pilhas de “rejeito” (Figura 33).

Figura 33 - Pegmatitos visitados durante a segunda campanha de campo, onde foi possível observar apenas partes do corpo ou material do rejeito. A) Espodumênio no pegmatito Pendanga; B) Espodumênio no pegmatito Tibiri; e C) Fosfato de Li (trifilita) no pegmatito Quintos de Cima e D) Espodumênios no pegmatito Kombi. Seta preta indicando minerais de Li



Fonte: Acervo da autora (2022)

5.4 CARACTERIZAÇÃO MINERAL

Foram coletadas diversas amostras de minerais potencialmente litíferos nos pegmatitos visitados ao longo do projeto, com o objetivo de realizar a caracterização mineral, mediante análises pelos métodos de DRX e FRX. Essas análises foram realizadas nos minerais espodumênio, amblygonita, lepidolita e litiofilita. As amostras coletadas apresentaram apenas uma fase mineral, e das 10 amostras analisadas, seis foram caracterizadas como espodumênios, duas como amblygonitas, uma como lepidolitas e uma como um mineral de alteração da litiofilita, chamado de ferrisicklerita.

Os difratogramas, bem como os valores percentuais da composição obtidos na Fluorescência de Raios X para cada amostra analisada, podem ser observados abaixo. As distâncias interplanares foram calculadas a partir da Lei de Bragg, o que

permitiu identificar a amostra em questão através de difratogramas padrões estabelecidos na literatura e disponíveis no banco de dados do Museu Heinz Ebert e RRUFF.

5.4.1 Difractometria de Raios X

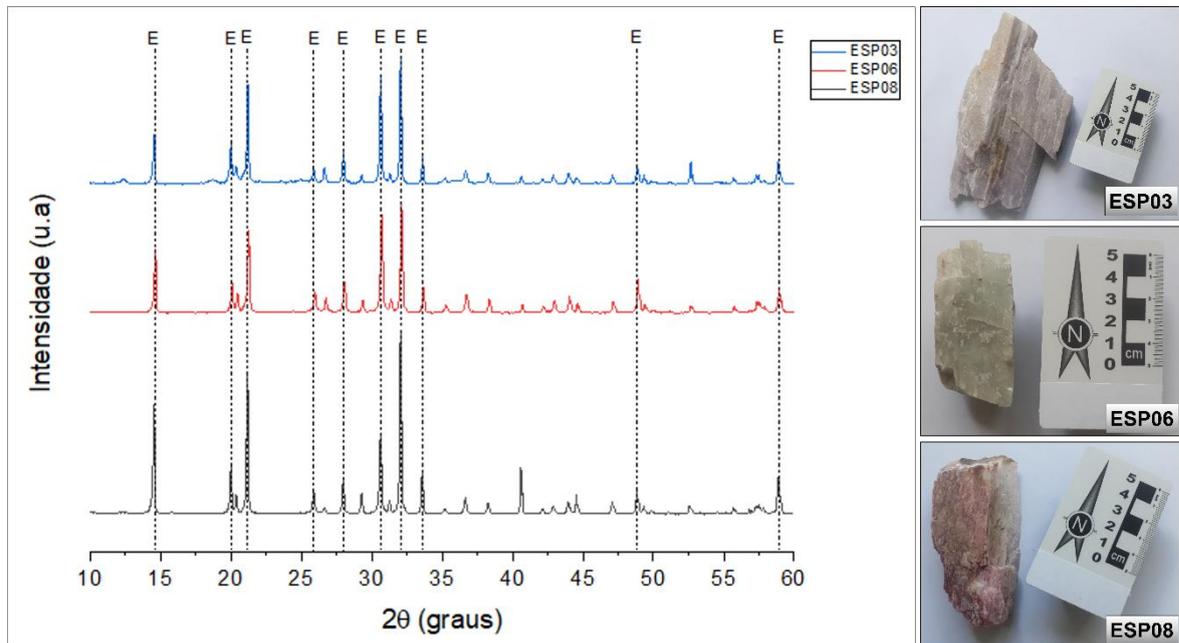
A DRX permite determinar qualitativamente os minerais analisados. Para este método, foram feitas análises mineralógicas de 12 amostras, nas quais foram obtidos difratogramas processados pelo *software* Origin 2019, cujos resultados foram expressos em termos qualitativos.

As amostras de espodumênio analisadas são provenientes dos pegmatitos Capoeira, Salgadinho, Pendanga e Quintos, todos inseridos no contexto da Província Pegmatítica da Borborema, entre os Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba.

No corpo pegmatítico denominado **Capoeira**, situado em Parelhas/RN e onde atualmente está atuando a mineração de turmalina paraíba, denominada Brazil Paraíba Mine, foram coletadas amostras de espodumênio de cores distintas.

As distâncias interplanares foram calculadas a partir da Lei de Bragg, o que permitiu identificar a amostra em questão. Com o resultado das análises, foram gerados difratogramas cujos picos coincidem com os do mineral espodumênio (Figura 34), de acordo com padrões estabelecidos na literatura e disponíveis nos bancos de dados já mencionados. O resultado das análises gerou os seguintes difratogramas.

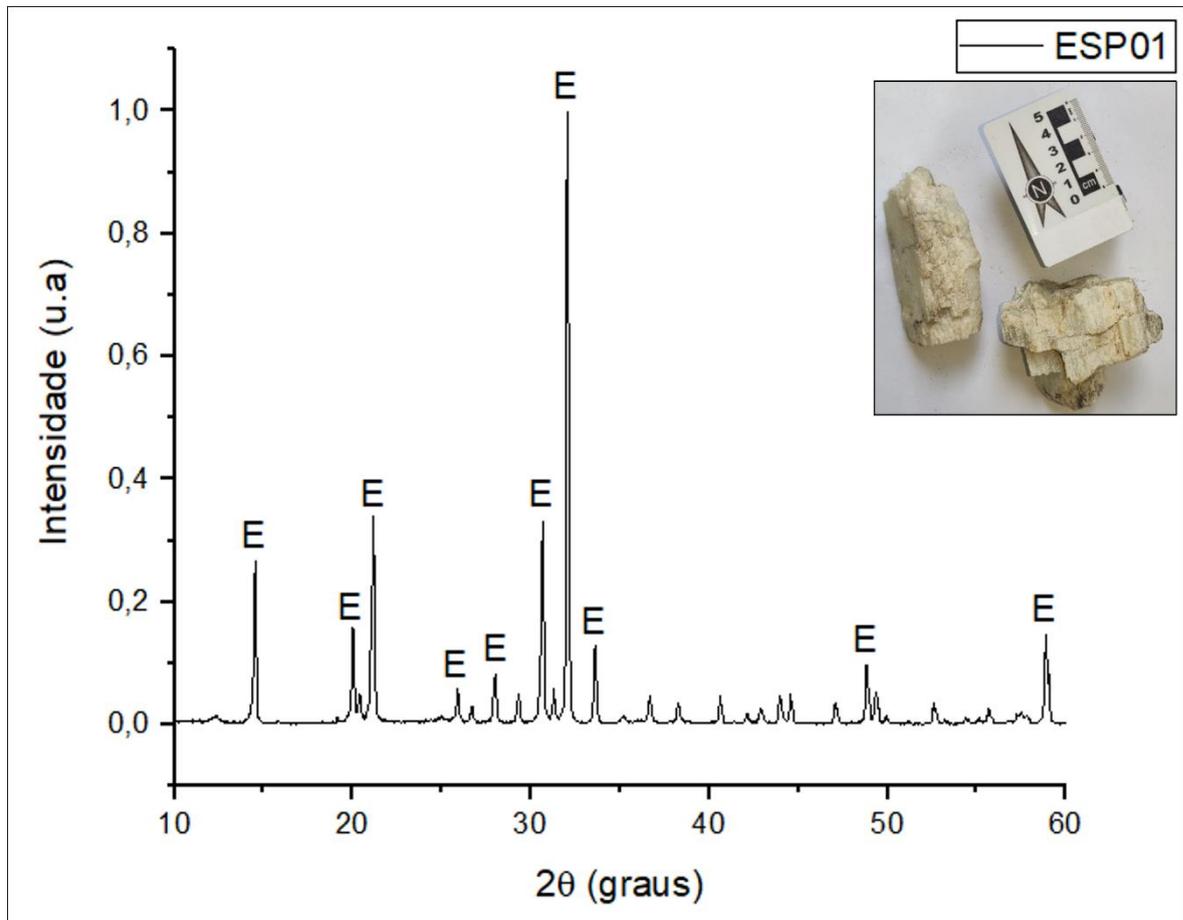
Figura 34 - Amostras de espodumênio coletadas no pegmatito Capoeira e difratogramas (E: espodumênio)



Fonte: Acervo da autora (2023)

No corpo pegmatítico denominado **Salgadinho**, situado em Carnaúba dos Dantas/RN, onde atualmente está atuando uma mineradora de feldspato denominada Casa Grande Mineração, foram coletadas amostras de espodumênio. O resultado das análises gerou o seguinte difratograma (Figura 35), cujos picos são coincidentes com os do mineral espodumênio.

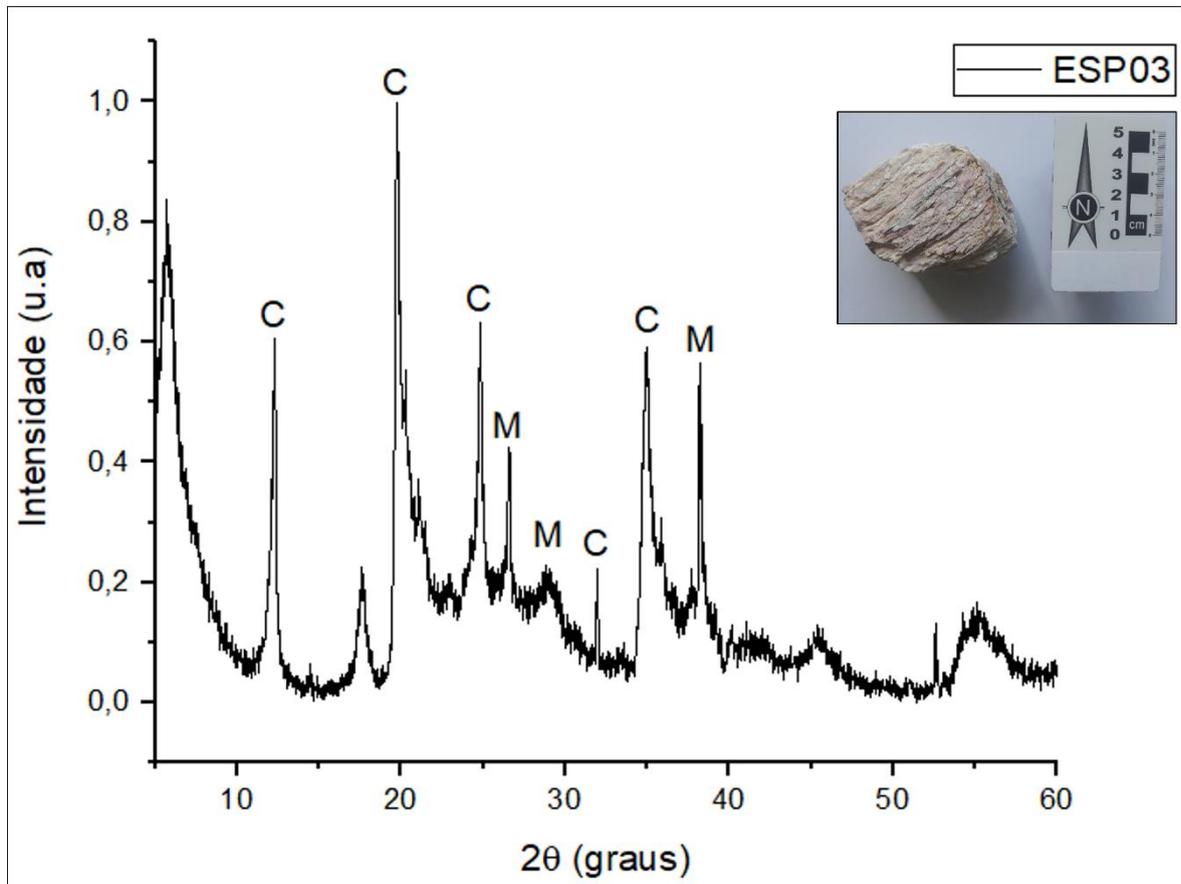
Figura 35 - Difratoograma resultante da análise feita na amostra de espodumênio do pegmatito Salgadinho (E: espodumênio)



Fonte: Acervo da autora (2023)

No corpo pegmatítico denominado **Pendanga**, localizado no município de Nova Palmeira/PB, foi coletada uma amostra de espodumênio rosa bastante caulinizado. O resultado das análises gerou um difratograma (Figura 36), cujos picos coincidiram com mais de um mineral: caulinita e muscovita. Essa resposta provavelmente está associada ao elevado grau de alteração da amostra para argilominerais, que se encontrava exposta e bastante intemperizada no afloramento.

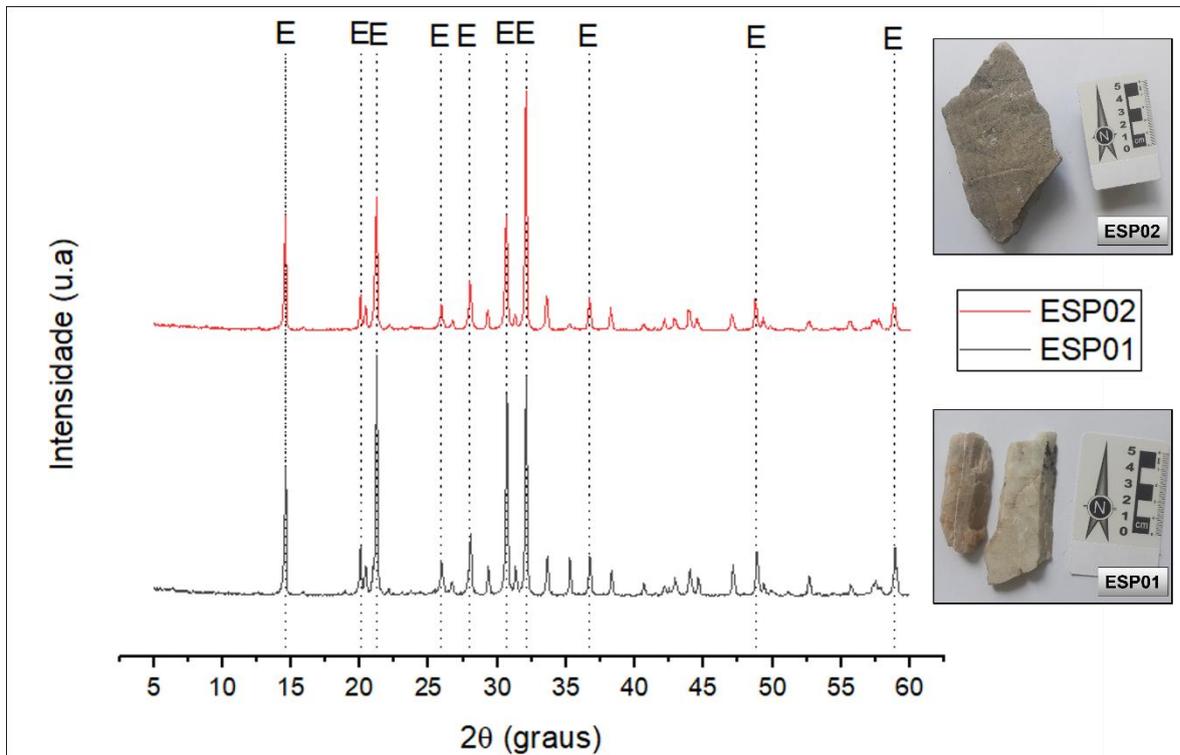
Figura 36 - Difratoograma resultante da análise feita na amostra de espodumênio alterado do pegmatito pendanga (C: caulinita; M: muscovita)



Fonte: Acervo da autora (2023)

No corpo pegmatítico denominado **Quintos**, localizado no município de Parelhas/RN e onde já atuou uma mina de turmalina paraíba, conhecida como “Mina dos Alemães”, atualmente inativa, foram coletadas duas amostras de espodumênio de cores distintas. O resultado das análises gerou um difratograma (Figura 37) cujos picos são coincidentes com os do mineral espodumênio.

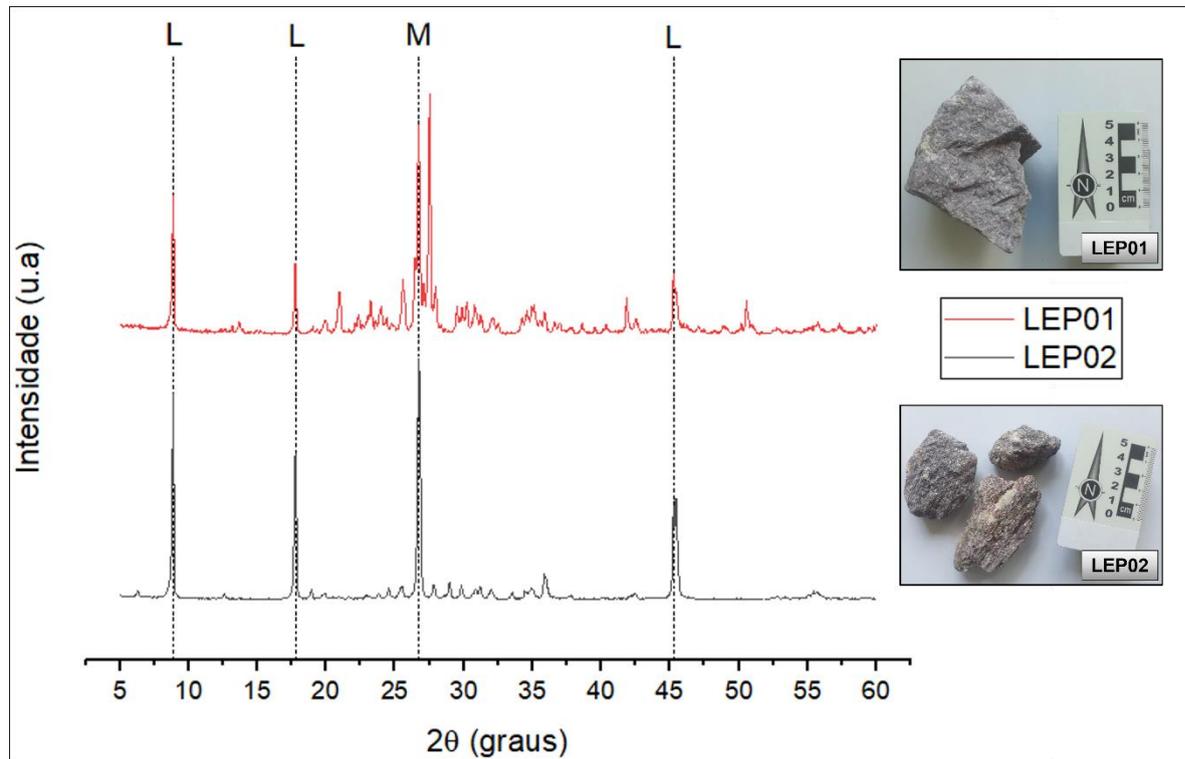
Figura 37 - Difratoograma resultante da análise feita nas amostras de espodumênio do pegmatito Quintos (E: espodumênio)



Fonte: Acervo da autora (2023)

As amostras de lepidolita também são provenientes dos pegmatitos **Quintos** e **Capoeira**. As análises geraram os difratogramas (Figura 38) apresentados a seguir, nos quais é possível observar a maioria dos picos correspondentes aos da lepidolita. No entanto, também são apresentados alguns picos distintos, correspondentes a impurezas de muscovita na amostra coletada.

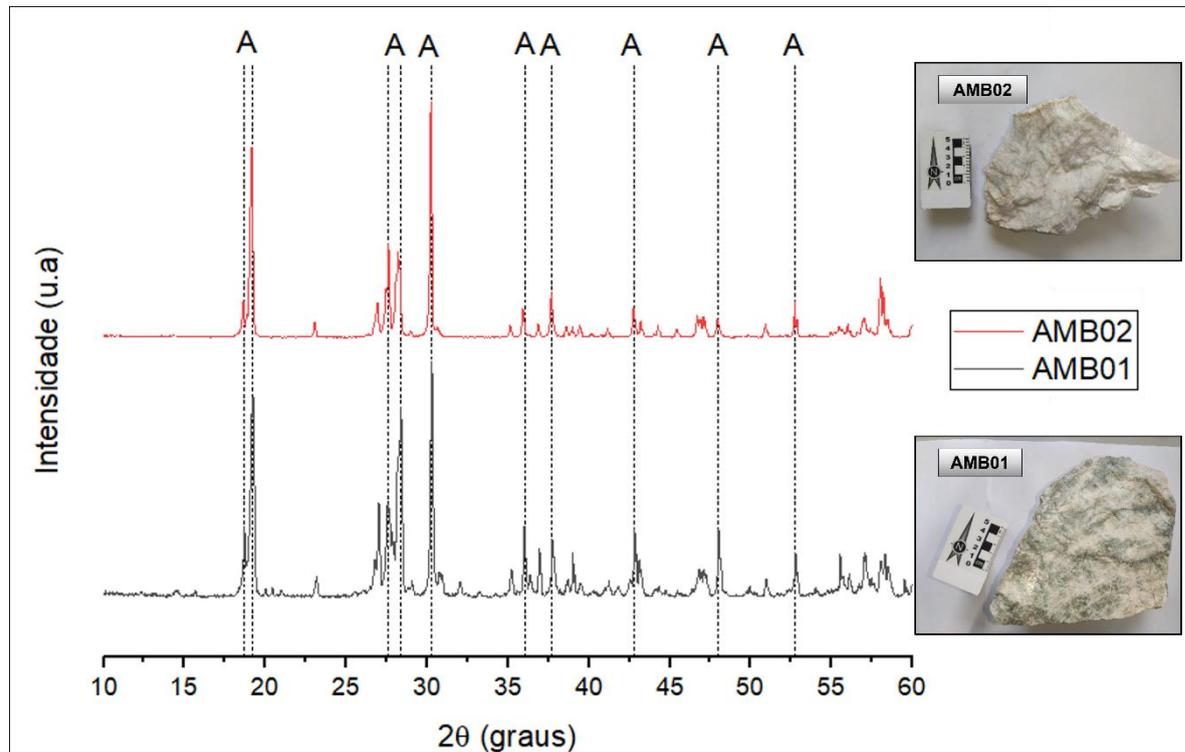
Figura 38 - Difratoograma resultante da análise feita nas amostras de lepidolita do pegmatito Quintos (LEP01) e Capoeira (LEP02) (L: lepidolita; M: muscovita)



Fonte: Acervo da autora (2023)

As amostras de amblygonita analisadas são provenientes do pegmatito **Serra Branca**. Foi coletada uma amostra de amblygonita de colorações variadas, uma na cor verde (AMB01) e outra de cor lilás (AMB02). O resultado das análises gerou dois difratogramas (Figura 39), cujos picos são coincidentes com os do mineral amblygonita.

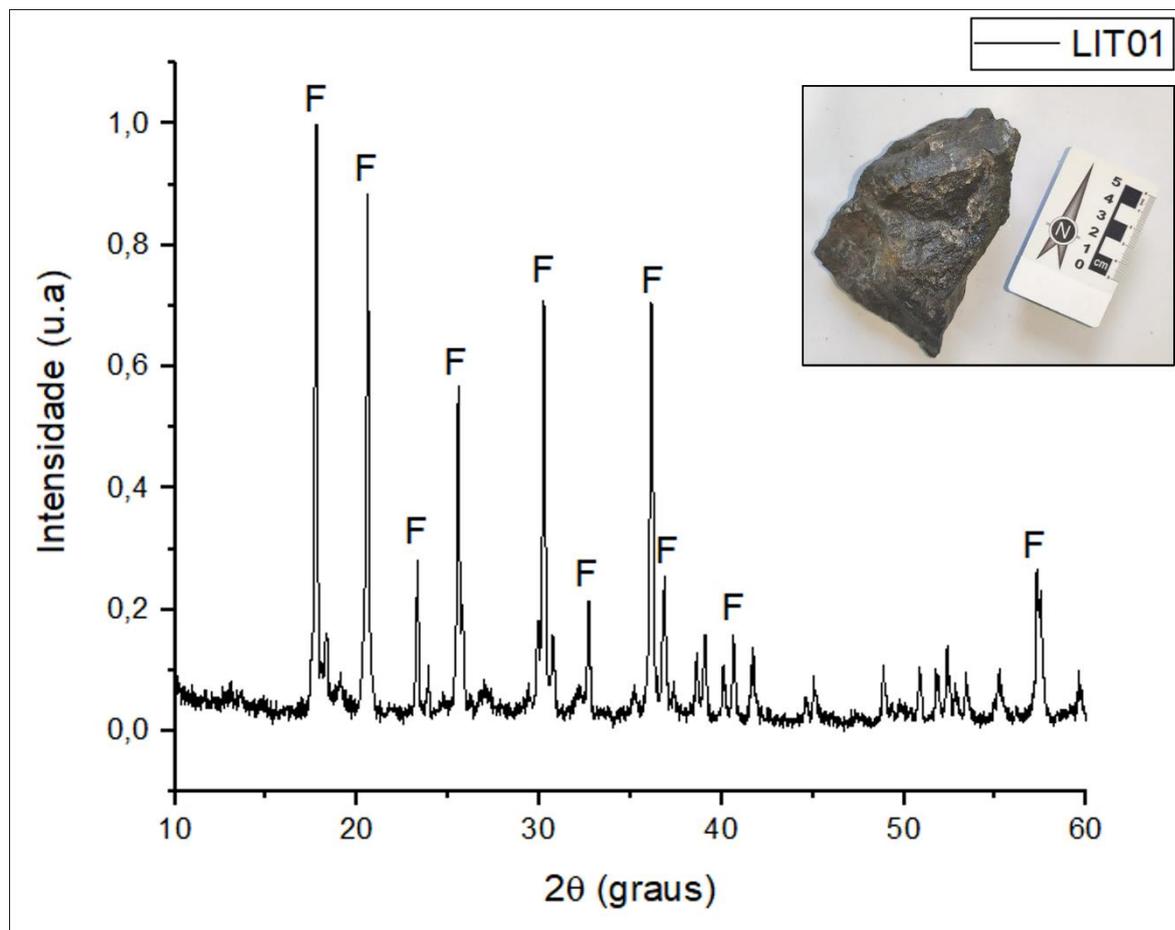
Figura 39 - Difratoograma resultante da análise feita nas amostras de amblygonita do pegmatito Serra Branca (A: Amblygonita)



Fonte: Acervo da autora (2023)

A amostra de ferrisicklerita analisada também é proveniente do pegmatito **Serra Branca**. Esse mineral foi inicialmente considerado como um representante da série isomórfica trifilita-litiofilita, no entanto, após a difratometria foi observado que se tratava da série isomórfica sicklerita-ferrisicklerita (Figura 40), produto de alteração que apresenta composição química semelhante, porém oxidada.

Figura 40 - Difratoograma resultante da análise feita nas amostras de ferrisicklerita do pegmatito Serra Branca (F: ferrisicklerita)



Fonte: Acervo da autora (2023)

5.4.2 Fluorescência de Raios X

Por meio de Fluorescência de Raios X, foram realizadas análises para determinação de elementos maiores nas amostras (elementos de concentração comumente superior a 1% em massa na composição da crosta terrestre) (Press *et al.*, 2006). As tabelas apresentadas a seguir mostram os resultados obtidos por essa técnica dos óxidos que apareceram em maior porcentagem, como os de silício, alumínio, cálcio, fósforo, ferro e manganês. Além destes, ainda foram detectados, em menor proporção, óxidos de tântalo, nióbio, sódio, vanádio, gálio, estrôncio, zinco e potássio.

Das 6 amostras de espodumênio coletadas, foram gerados dados de FRX dos pegmatitos Salgadinho, Capoeira, Quintos e Pendanga (Tabela 11). As proporções

entre SiO_2 e Al_2O_3 das amostras é compatível com a proporção encontrada nos espodumênios, reforçando a interpretação já realizada com os dados de difratometria.

O espodumênio do pegmatito Salgadinho apresentou teores de fósforo em sua composição, além de silício e alumínio. No pegmatito Capoeira, foram coletadas três amostras de colorações distintas de espodumênio. Foi possível observar que essa variação na coloração reflete na composição química das amostras, nas quais pelo menos uma delas apresenta teores mais elevados de magnésio, por exemplo. O espodumênio coletado no pegmatito Quintos apresentou uma química mais simples, com uma quantidade pouco expressiva de impurezas (1,5%). Já o espodumênio do pegmatito Pendanga, apresentou uma quantidade de impurezas maior, provavelmente em decorrência do intenso processo de caulinização da amostra.

Tabela 11 - Percentual de óxidos dos espodumênio coletados no projeto

	Salgadinho	Capoeira	Capoeira	Capoeira	Quintos	Pendanga
Óxidos	ESP01	ESP03	ESP06	ESP08	ESP01	ESP03 (caulinizado)
SiO₂	65,41	61,97	61,91	57,09	62,91	48,63
Al₂O₃	32,76	37,68	36,81	40,06	35,60	44,87
P₂O₅	0,98	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	1,63	-	3,57
K₂O	-	-	-	-	-	2,03
Outros	0,85	0,35	1,28	1,22	1,49	0,90

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

O pegmatito **Serra Branca** é um corpo pegmatítico rico em minerais fosfatados (Brito, 2003), e neste local foram coletadas amblygonitas de diversas colorações, sendo uma amblygonita verde (AMB01) e uma lilás (AMB02). A análise de Fluorescência de Raios X indicou na composição do mineral a presença de fósforo, alumínio, silício e cálcio, principalmente, além de outros óxidos caracterizados como traço (percentual < 2%). As proporções entre os óxidos principais são compatíveis com o mineral identificado. As análises de Fluorescência de Raios X realizadas geraram os seguintes percentuais de óxidos nas amostras (Tabela 12).

Tabela 12 - Percentual de óxidos das ambligonitas coletadas no pegmatito Serra Branca

Óxidos (%)	(SRB-AMB01)	(SRB-AMB02)
P ₂ O ₅	55,47	57,67
Al ₂ O ₃	35,91	37,31
SiO ₂	6,23	4,23
CaO	1,57	0,382
Outros	0,82	0,402

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Ainda no pegmatito Serra Branca, foi coletado um mineral conhecido pelos garimpeiros como arrojadita. Trata-se de um mineral secundário, produto de alteração da litiofilita (LiMnPO₄), denominado ferrisicklerita (Li (Fe³⁺, Mn²⁺) PO₄). É possível observar uma quantidade significativa de ferro e manganês na análise, e a proporção desses óxidos é compatível com o mineral identificado (Tabela 13).

Tabela 13 - Percentual de óxidos da ferrisicklerita coletada no pegmatito Serra Branca

Óxidos (%)	Ferrisicklerita (SRB-FER01)
Fe ₂ O ₃	36,70
P ₂ O ₅	35,61
MnO	21,43
SiO ₂	3,76
Al ₂ O ₃	1,57
Outros	0,93

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

A amostra de lepidolita utilizada para realizar a análise de FRX é proveniente do pegmatito Quintos, conhecido também como mina dos alemães. O resultado da análise de Fluorescência de Raios X mostrou que sua química apresenta como elementos maiores, principalmente, silício, alumínio potássio e magnésio, com cerca

de 2% de impureza. Com base no resultado dessa análise, foi possível observar que a proporção dos óxidos é compatível com a do mineral identificado (Tabela 14).

Tabela 14 - Percentual de óxidos da lepidolita coletada no pegmatito Quintos

Óxidos	Lepidolita (QAL-LEP01)
SiO ₂	49,46
Al ₂ O ₃	40,49
K ₂ O	6,24
MgO	1,62
Outros	2,19

Fonte: Elaborada pela autora (2023)

As técnicas geoquímicas de Difractometria e Fluorescência de Raios X empregadas para analisar as amostras coletadas em campo comprovaram a existência do mineral de lítio, através dos difratogramas gerados pelo método DRX, e identificaram os percentuais de óxidos presentes em cada amostra, através da FRX, reforçando a caracterização dos minerais de lítio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo encontra-se inserida numa região de relevante interesse econômico para exploração de recursos minerais estratégicos, a Província Pegmatítica da Borborema (PPB), na qual já foram identificadas diversas ocorrências de pegmatitos litiníferos. Porém, existe um desafio para o desenvolvimento de pesquisas envolvendo esses recursos nos afloramentos de pegmatitos, uma vez que a maioria desses corpos já foi explorada pelo garimpo e os principais minerais de interesse econômico, especialmente as gemas, já foram removidos nos níveis mais superficiais.

Espera-se, com a realização deste projeto, obter um cenário mais detalhado sobre o potencial econômico dos pegmatitos litiníferos da PPB na região do Seridó, entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Os estudos realizados até aqui apresentaram um cunho prospectivo, sendo utilizadas técnicas de sensoriamento remoto e geofísica, além de caracterização mineral de amostras coletadas em campo. A integração dos dados obtidos por diferentes técnicas será importante para a elaboração de guias prospectivos de lítio, que podem auxiliar na exploração desse metal em outras porções da PPB, bem como em outras províncias pegmatíticas.

As técnicas de sensoriamento remoto se demonstraram promissoras para apontar os pegmatitos litiníferos, inclusive por destacar áreas onde já foram identificadas ocorrências pela CPRM, confirmando a eficácia do método no que diz respeito à identificação prévia de regiões potenciais para ocorrência de pegmatitos, sejam eles litiníferos ou não, baseados na técnica proposta por Cardoso-Fernandes, Teodoro e Lima (2019).

A utilização da geofísica como mais um método prospectivo associado potencializa os resultados da pesquisa, uma vez que oferece informações de cunho estrutural e geológico. Os produtos geofísicos gerados fornecem informações importantes a respeito dos controles das mineralizações, que estão fortemente associados às estruturas regionais, e podem se comportar de maneiras diferentes, a depender do contexto da rocha encaixante.

Os principais fatores que influenciam a taxa de assertividade dos métodos remotos empregados são a baixa resolução espacial dos sensores utilizados, tanto no método de sensoriamento remoto como no aerogeofísico. No sensoriamento remoto,

as curvas espectrais empregadas, apesar de representarem os minerais analisados, não consideram características físicas, estruturais e geológicas da área de estudo, podendo ocasionar interpretações errôneas dos dados gerados, alterando a curva espectral de cada mineral.

O produto geofísico também tem limitações em decorrência da resolução espacial, que no caso deste estudo está restrita ao espaçamento de 100 metros da linha de voo. Neste caso, deve-se levar em consideração que os corpos pegmatíticos na PPB muitas vezes apresentam dimensões inferiores ao limite detectado pelo método. Assim, com a aplicação dessa técnica é possível identificar apenas o contexto geofísico regional no qual os pegmatitos estão inseridos, correlacionando as estruturas regionais e concentrações radiométricas às ocorrências de pegmatitos ricos em lítio.

A caracterização mineral das amostras coletadas apenas confirma a existência do mineral, no entanto não fornece informações a respeito dos teores de lítio existentes em cada amostra. Para a obtenção dessas informações, é necessário empregar técnicas analíticas mais detalhadas, como espectrometria de massas (ICP-MS), por ser um método sensível à presença de lítio na amostra, além de possibilitar uma análise multielementar.

Com a integração das técnicas previamente discutidas e que são vastamente utilizadas na prospecção mineral, foi possível estabelecer uma metodologia criteriosa no que diz respeito à identificação de áreas potenciais para ocorrência de minerais litiníferos. A partir das análises realizadas ao longo do trabalho, foi possível comprovar a potencialidade econômica para o lítio na Província Pegmatítica da Borborema, especialmente no que diz respeito ao controle estrutural na colocação dos corpos pegmatíticos, bem como seus limites, sendo possível estimar a relação entre as mineralizações e as assinaturas geofísicas e espectrais.

Os produtos obtidos neste estudo se mostraram promissores, apresentando resultados satisfatórios na identificação de possíveis alvos a serem explorados, considerando-se o seu custo/benefício nas etapas iniciais da pesquisa. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para colocar o Seridó na rota de investimentos da “Indústria Verde” mundial, contribuindo com o desenvolvimento socioeconômico e sustentável da região.

REFERÊNCIAS

AHTOLA, T.; KUUSELA, J.; KÄPYAHO, A.; KONTONIEMI, O. Overview of lithium pegmatite exploration in the Kaustinen area in 2003–2012. **Geological Survey of Finland, Report of Investigation 220**. 2015.

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, p. 1-29, 1981.

ANGELIM, L. A. A.; MEDEIROS, V. C.; NESI, J. R. **Programa Geologia do Brasil (PGB)**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala. 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN, 2006.

ARAÚJO, M. G.; ALVES DA SILVA, F. C.; JARDIM DE SÁ, E. F. Pegmatitos da Faixa Seridó: marcadores da movimentação tardia das transcorrências Brasileiras. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 40., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1998. p. 42.

ARAÚJO, M. G. S.; BRITO NEVES, B. B.; ARCHANJO, C. J. Idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do magmatismo básico Meso-Cenozoico da Província Borborema oriental, Nordeste do Brasil. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 19., 2001, Natal. **Resumos...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 2001. p. 260-261.

ARAÚJO, M. N. C.; VASCONCELOS, P. M.; SILVA, F. C. A.; JARDIM DE SA, E. F.; SA, J. M. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of gold mineralization in Brasiliano strike-slip shear zones in the Borborema Province, NE Brazil. **J. S. Am. Earth Sci.**, n. 19, p. 445–460, 2005.

ARCHANJO, C. J.; SALIM, J. Posição da Formação Seridó no contexto estratigráfico regional (RN-PB). *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 12., 1986, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986. p. 270-281.

ARROBAS, D. L. P.; HUND, K. L.; MCCORMICK, M. S.; NINGTHOUJAM, J.; DREXHAGE, J. R.. **O papel crescente dos minerais e metais para um futuro de baixo carbono**. Washington: Banco Mundial, 2017.

ASFORA, V. K. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BARBOUR, R. **Determinação de Impurezas em Cobre Eletrolítico por Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado**. 2011. Tese (Doutorado) - Instituto de Química. UFBA, Salvador, 2011.

BAUMGARTNER, R. *et al.* Columbite-Tantalite-bearing granitic pegmatites from the Seridó Belt, NE Brazil: Genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. **Canadian Mineralogist**, v. 44, p. 69-86, 2006.

BEURLLEN, H. The mineral resources of the Borborema Province in northeastern Brazil and its sedimentary cover: a review. **J. S. Am. Earth Sci.**, n. 8, p. 365–376, 1995.

BEURLLEN, H.; DA SILVA, M. R. R.; DE CASTRO, C. Fluid inclusion microthermometry in Be-Ta-(Li-Sn)-bearing pegmatites from the Borborema Province. **Chem. Geol.**, n. 173, p. 107–123, 2001.

BEURLLEN, H.; DA SILVA, M. R. R.; THOMAS, R.; SOARES, D. R.; OLIVIER, P. Na-Ta-(Ti-Sn)-oxide mineral chemistry as tracers of rare element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, northeastern Brazil. **Mineral. Deposita**, n. 43, 207–228, 2008.

BEURLLEN, H.; BARRETO, S.; MARTIN, R.; MELGAREJO, J.; SILVA, M. R. R.; SOUZA NETO, J. A. The Borborema pegmatite province, NE-Brazil revisited. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 2, n. 19, p. 62-66, 2009.

BEURLLEN, H.; THOMAS, R.; DA SILVA, M. R. R.; MÜLLER, A.; RHEDE, D.; SOARES, D. R. Perspectives for Li- and Ta-mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 110-127, 2014.

BIBIENNE, T.; MAGNAN, J. F.; RUPP, A.; LAROCHE, N. From mine to mind and mobiles: society's increasing dependence on lithium. **Elements**, v. 16, n 4, p. 265-270, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.265>

BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 529p.

BLAKELY, R. J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. Cambridge University Press, 1996.

BORJESSON, J.; ISAKSSON, M.; MATTSSON, S. X-ray fluorescence analysis in medical sciences: a review. **Acta Diabetologica**, v. 40, n. 1, p. S39-S44, 2003.

BOWELL, R. J.; LAGOS, L.; LOS HOYOS, C. R.; DECLERCQ, J. Classification and characteristics of natural lithium resources. **Elements**, v. 16, n. 4, p. 259-264, 2020.

BRADLEY, D. C.; MCCAULEY, A. D.; STILLINGS, L. L. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites. **US Geological Survey**, 2017.

BRIGGS I. C. Machine contouring using minimum curvature, **Geophysics**, n. 39, p. 39-48, 1974.

BRITO, A. R. de. **Mineralogia do pegmatito Alto Serra Branca, Pedra Lavrada-Paraíba, enfatizando os fosfatos e suas paragêneses**. 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB, 2003.

BRITO NEVES, B. B. de; PASSARELLI, C. R.; BASEI, M. A. S.; SANTOS, E. J. U-pb zircon ages of some classic granites of the Borborema province. **Short Papers**, p. 158-159. Salvador: CBPM/IRD. 2003.

CAMERON, E. N.; JAHNS, R. H.; MCNAIR, A. H.; PAGE, L. R. Internal structure of granitic pegmatites. **Economic Geology**, Monograph 2, 1949.

CARDOSO-FERNANDES, J.; TEODORO, A. C.; LIMA, A. Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation**, v. 76, p. 10-25, 2019.

CARDOSO-FERNANDES, J.; TEODORO, A. C.; LIMA, A.; PERROTTA, M.; RODA-ROBLES, E. Detecting Lithium (Li) Mineralizations from Space: Current Research and Future Perspectives. **Applied Sciences**, v. 10, p. 1.785, 2020.

CERNÝ, P. **Anatomy and classification of granitic pegmatites**. Granitic pegmatites in science and industry, [s. l.], 1982a. p. 1-39

ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. **Geoscience Canada**, n. 18, p. 49-67, 1991a.

ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis. **Geoscience Canada**, n. 18, p. 68-81, 1991b.

ČERNÝ P.; ERCIT T. S. Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. **Bulletin de Minéralogie**, v. 108, n. 3, p. 499-532, 1985.

ČERNÝ, P.; MEINTZER, R. E. **Fertile granites in the Archean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites**: crustal environment, geochemistry and petrogenetic relationships. Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits, [s. l.], 1988. p. 170-207.

ČERNÝ, P.; ERCIT, T. S. The classification of granitic pegmatites revisited. **Canadian Mineralogist**, v. 43, p. 2.005-2.026, 2005.

CHOUBEY, P. K.; KIM, M.; SRIVASTAV, R. R.; LEE, J.; LEE, J. Advance Review on the Exploitation of the Prominent Energy-Storage Element: Lithium. Part I: From Mineral and Brine Resources. **Mineral Engineering**, n. 89, p. 119-137, 2016.

CHRISTMANN, P. *et al.* Capítulo 1 - Recursos globais de Lítio e questões de sustentabilidade. In: CHAGNES, A.; ŚWIATOWSKA, J. (ed.). **Na Química do Processo de Lítio**. Elsevier: Amsterdã, Holanda, 2015. p. 1-40.

CONEGO JUNIOR, D. **Interpretação geofísica do Batólito de Catolé do Rocha PB-RN, Brasil**. 2019. 95f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife. 2019.

COOK, S. E.; CORNER, R. J.; GROVES, P. R.; GREALISH, G. J. Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. **Soil Research**, v. 34, n. 1, p. 183-194,

1996.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Sousa SB.24-X-A**. Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Recife, 2008. 312 p.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos**. [s. l.], 2010.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil - Área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2016.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais de Li da Província Pegmatítica da Borborema**. Escala 1:250 000. [s. l.], 2018.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 678 p.

DA SILVA, M. R. R.; HÖLL, R.; BEURLEN, H. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. 3-4, p. 355-364, 1995.

DANTAS, E. L. **Evolução tectono-magmática do maciço polidiapírico São Vicente/Florânia-RN**. 1992. 272 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP, 1992.

DANTAS, E. L.; SOUZA, Z. S.; WERNICK, E.; HACKSPACHER, P. C.; MARTIN, H.; XIAODONG, D.; LI, J-W. Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 120-156, 2013.

DANTAS, L. F. **Potencial econômico dos pegmatitos tipo LCT localizados a sudeste de Parelhas/RN**. 2020. 111f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

DICKSON B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187–200, 1997.

DNPM/CPRM. **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Vol. IV, parte B, capítulo 41, Província Pegmatítica da Borborema – Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte. Brasília: DNPM, 1997. p. 441-467.

DUARTE, L. C. *et al.* **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros**. Porto Alegre: UFRG, 2003.

DUTRA, C. V.; GOMES, C. B. A fluorescência de raios X na geologia. *In: GOMES, C. B. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 84-120.

FERREIRA, J. A. M.; ALBUQUERQUE, J. P. T. **Sinopse da geologia da Folha Seridó**. Recife: SUDENE, 1969. 52p. (Série Geologia Regional, 18)

GINÉ-ROSIAS, M. F. **Espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS)**. Piracicaba: CENA, Série Didática, 1999. v. 4.

GINSBURG, A. I. Specific geochemical features of the pegmatitic process. *In: International Geological Congress Session Norden Report*, 21. 1960. **Proceeds...** 1960. p. 111-121.

GOMES, C. B. **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**. São Paulo: Edgard Blücher: Pró-Minério, 1984.

GRASTY, R. L.; HOLMAN, P. B.; BLANCHARD, Y. B. **Transportable Calibration Pads for Ground and Airborne Gamma-Ray Spectrometers**: Geological Survey of Canada. Open File 90-23, 1991b.

GROSJEAN, C.; MIRANDA, P. H.; PERRIN, M.; POGGI, P. Avaliação dos recursos mundiais de Lítio e consequências de sua distribuição geográfica no desenvolvimento esperado da indústria de veículos elétricos. **Renovable and Sustainable Energy Rev.**, n. 16, p. 1.735–1.744, 2012.

GUNN, P. J. Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys. Course. **AGSO**, 1998. 150p.

HEINRICH, E. W. Zoning in pegmatite districts. **American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials**, v. 38, n. 1-2, p. 68-87, 1953.

HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; SOUZA NETO, J. A.; SALLET, R. G. Relações cronológicas entre eventos magmáticos e mineralizações na Faixa Seridó. *Simp. Geol. Nordeste*, 2019. **Resumos...** 313, 2019.

HOUK, R. S.; FASSEL, V. A.; FLESCH, G. D.; SVEC, H. J.; GRAY, A. L.; TAYLOR, C. E. Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements. **Analytical chemistry**, v. 52, n. 14, p. 2.283-2.289, 1980.

IZA, E. R. H. F.; HORBE, A. M. C.; CASTRO, C. C.; HERRERA, I. L. I. E. Integration of Geochemical and Geophysical Data to Characterize and Map Lateritic Regolith: An Example in the Brazilian Amazon. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 19, p. 3.254–3.271, 2018.

JAHNS R. H. The study of pegmatites. **Economic Geology**, n. 50th Anniversary, p. 1.025-1.130, 1955.

JAHNS R. H.; BURNHAM C. W. Experimental studies of pegmatite genesis; I, A

model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites. **Economic Geology**, v. 64, n. 8, p. 843-864, 1969.

JARDIM DE SÁ, E. F. Revisão preliminar sobre a "Faixa Dobrada do Seridó" e eventuais correlatos no Nordeste. **Revista Ciência**, Natal: UFRN, p. 77-83, 1978a.

JARDIM DE SÁ, E. F.; LEGRAND, J. M.; McREATH, I. "Estratigrafia" de rochas granitoides na região do Seridó (RN-PB) com base em critérios estruturais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 11, n. 1, p. 50-57, 1981.

JARDIM DE SÁ, E. F. Geologia da região do Seridó: reavaliação de dados. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 1984. **Resumos...** v. 11, p. 278-296, 1984.

JARDIM DE SÁ, E. F. A faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-africana. 1994. (unpublished Doctorate thesis) – Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

JARDIM DE SÁ, E. F.; SALIM, J. Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB). **Mineração e Metalurgia**, v. 80, n. 421, p. 16-28, 1980.

JARDIM DE SÁ, E. F. *et al.* Pre-Brasiliano orogenic evolution in the Seridó Belt, NE Brazil: conflicting geochronological and structural data. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 307-314, 1995.

JARDIM DE SÁ, E. F.; MATOS, R. M. D.; OLIVEIRA, D. C. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte**. Escala 1:50.000. [s. l.]: DNPM/UFRN/PETROBRAS/CRM, 1998.

JOHNSTON JR., W. D. Beryl-tantalite pegmatites of Northeastern Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 1.015-1.070, 1945.

KALINOWSKI, A.; OLIVER, S. ASTER mineral index processing manual. Remote Sensing Applications. **Geoscience Australia**, v. 37, p. 36, 2004.

KEAREY P.; BROOKS M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução: Coelho M.C.M. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 438 p.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman. 2012.

LEGRAND, J. M.; LIEGEOIS, J. P.; DEUTSCH, S. Datação U/Pb e Rb/Sr das rochas precambrianas da região de Caicó. Reavaliação da definição de um embasamento arqueano. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 14., 1991, Recife. **Resumos...** Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991. v. 12, p. 276-279.

LEGRAND, J. M.; MELO JR., M. G.; ARCHANJO, C. J.; SALIM, J.; SOUZA, L. C.; MAIA, H. N. Mineralizações da Faixa Seridó: um processo hidrotermal do fenômeno tectono-magmático brasileiro. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 15., Natal. **Atas...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p. 185-187.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p. 13-16, 2006.

Li, X. Gotze H. Comparison of some gridding methods. **Leading Edge**, n. 18, p. 898–900, 1999.

LINNEN, R. L.; VAN LICHTERVELDE, M.; ČERNÝ, P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. **Elements**, v. 8, p. 275-280, 2012.

LOUGHLIN, W. P. Principal component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, n. 9, p. 1.163-1.169, 1991.

LONDON, D. The application of experimental petrology to the genesis and crystallization of granitic pegmatites. **The Canadian Mineralogist**, v. 30, n. 3, p. 499-540, 1992.

LONDON, D. Geochemistry of alkali and alkaline earth elements in ore-forming granites, pegmatites, and rhyolites *In*: LINNEN, R. L.; SAMPSON, I. M. (ed.). **Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits**. St. Catharines: Geological Society, 2005. p. 175-199. (Short Course Notes, 17)

LONDON, D. Pegmatites: the canadian mineralogist special publication 10. **Mineralogical Association of Canada**, Quebec, Canadá, p. 347, 2008.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. Cambridge University Press, 2007.

MEDEIROS, V. C. **Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeau, domínio da Zona Transversal, NE do Brasil**. 2004. 190 f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2004.

MEDEIROS, V. C. Geologia da Província Seridó. *In*: CPRM/UnB/SEBRAE I **Seminário das Províncias Metalognéticas Brasileiras: A Província de W-Au Seridó**, 2013.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. 2007. Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.

MILLIGAN, P. R.; GUNN, P. J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 63-75, 1997.

MINDAT. **Pegmatito Capoeira 1**. Disponível em <https://www.mindat.org/loc-30433.html>. Acesso em: 25 maio 2023.

MINTY, B. R. S. A Review of Airborne Gamma-Ray Spectrometric Data-Processing

Techniques. **Report 255**. Canberra: Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, 1988.

MINTY, B. R. S.; LUYENDYK, A. P. J.; BRODIE, R. C. Calibration and Data Processing for Airborne Gamma-Ray Spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 51-62, 1997.

MOURA, J. C. **Assinatura Geoquímica de Columbita-Tantalita e Levantamento Radiométrico de Pegmatitos Radioativos da Região de Parelhas, Rio Grande do Norte, Brasil**. 2013. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

MÜLLER, A.; REIMER, W.; FRANCES, W.; WILLIAMSON, B.; MENUGE, J.; BRONNER, M.; HASSE, C.; BRAUCH, K.; POHL, C.; LIMA, A.; TEODORO, A.; CARDOSO-FERNANDES, J.; RODA-ROBLES, E.; HARROP, J.; SMITH, K.; WANKE, D.; TINTERWEISSACHER, T.; HOPFNER, M.; SCHRODER, M.; CLIFFORD, B.; MOUTELA, P.; LLORET, C.; RANZA, L.; RAUSA, A. GREENPEG-Exploration for pegmatite minerals to feed the energy transition: first steps towards the Green Stone Age. **Geological Society**, London, Special Publications, 526, 2022.

MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS HEINZ EBERT. 2022. Disponível em: <https://museuhe.com.br>. Acessado em: 10 dez. 2022.

NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; DE MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 281-299, 2015.

NASCIMENTO-FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. 1999.

Disponível em:

http://www.raiosx.ufc.br/site/wpcontent/uploads/downloads/2012/10/EDXRF_TXRF.pdf. Acesso em: 19 nov. 2022.

NETTLETON, L. L. Regionals, Residuals, and Structures. **Geophysics**, n. 19, p. 10-22, 1954.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; ALCOVER-NETO, A. **Caracterização Tecnológica de Minérios**. Capítulo 3. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2004.

NOVAK, I. D.; SOULAKELLIS, N. Identifying geomorphic features using LANDSAT-5/TM data processing techniques on Lesvos, Greece. **Geomorphology**, v. 34, n. 1-2, p. 101-109, 2000.

ORIGIN SOFTWARE. Disponível em: <https://www.originlab.com>. Acessado em: 20 nov. 2022.

PALINKAŠ, S. S.; PALINKAŠ, L.; NEUBAUER, F.; SCHOLZ, R.; BOROJEVIĆ ŠOŠTARIĆ, S.; BERMANEC, V. Formation conditions and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the gem-bearing boqueirao granitic pegmatite, Parelhas, Rio Grande do Norte, Brazil.

Minerals, v. 9, n. 4., p. 233, 2019.

PERROTTA, M. M.; SOUZA FILHO, C. R.; LEITE, C. A. S. Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. **Anais...** v. 12, n. 2005, p. 1855-1862, 2005.

POTTS, P. J. *et al.* Atomic spectrometry update. X-ray fluorescence spectrometry. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 18, n. 10, p. 1.289-1.326, 2003.

POUR, A. B.; HASHIM, M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. **Journal of Taibah University for Science**, v. 9, n. 2, p. 155–166, 2015. doi: 10.1016/j.jtusci.2014.11.008.

PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H.; MENEGAT, R.; FERNANDES, P. C. D.; FERNANDES, L. A. D.; PORCHER, C. C. **Para Entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656p.

RESENDE, R. S. **Caracterização do mineral zircão através do método de traços de fissão, espectroscopia micro-raman e mev**: geocronologia do grupo Bauru. Presidente Prudente: UNESP, 2011.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. M.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e Suas Aplicações no Mapeamento Geológico. **Terra e Didática**, v. 10. p. 29-51, 2013.

ROLFF, P. A. M. A. **Contribuição ao estudo de cassiterita no Nordeste**. Rio de Janeiro: DNPM, 1945.

ROLFF, P. A. M. A. **Minerais de pegmatitos da Borborema**. Rio de Janeiro: DNPM, 1946.

RRUFF Project. 2022. Disponível em: <https://rruff.info>. Acessado em: 10 dez. 2022.

SANTOS, E. J. *et al.* Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. *In*: SILVA, M. da G. **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. p. 343-388.

SANTOS, L. *et al.* **Valorização da cadeia produtiva do lítio**: alternativas sustentáveis para extração de lítio do espodumênio. Natal: EDUFRN, 2020.

SANTOS, T. J. S.; FETTER A. H.; NETO J. A. N. Comparisons between the northwestern Borborema Province, NE Brazil, and the southwestern Pharusian Dahomey Belt, SW Central Africa. **Geological Society**, London, Special Publications, v. 294; p. 101-120, 2008. doi:10.1144/SP294.6

SCHETSELAAR, E.; CHUNG, C. J. F.; KIM, K. E. Integration of Landsat TM, Gamma-Ray, Magnetic, and Field Data to Discriminate Lithological Units in

Vegetated Granite–Gneiss Terrain. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, p. 89–105, 2000.

SCORZA, E. P. **Província Pegmatítica da Borborema**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 1944. Bol. 112, 55p.

SEVERO, M. I. G.; BARBIER, F.; OLIVEIRA, A. H.; LOUSTALOT, M. F. G.; CARNEIRO, C. G.; SILVA, M. R. S. INAA and ICP-MS Methods for Biological Tissues Studies. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 17, n. 3, p. 110-115, 2004.

SHIVES R. B. K.; CHARNONNEAU B. W.; Ford K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization. **Geophysics**, v. 65, p. 2.001-2.011, 2000.

SILVA, S. M. P.; CRÓSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BEURLEN, H.; SILVA, A. M.; SANTOS, L. F. Espectrometria de raios gama de granitos pegmatíticos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 28, n. 4, 2010. ISSN 0102-261X.

SILVA, S. M. P.; CRÓSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BEURLEN, H.; SILVA, A. M. Identificação gamaespectrométrica de placeres rutilo-monazíticos neoproterozóicos no sul da Faixa Seridó, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p. 61-77, 2010.

SIMMONS W. B.; WEBBER K. L. Pegmatite genesis: state of the art. **European Journal of Mineralogy**, v. 20, n. 4, p. 421-438, 2008.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. p. 31-36; 317-342.

SOARES, D. R. **Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos e elbaítas gemológicas**. 2004. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2004.

SOUZA, Z. S. **Petrogénèse des metagranitoides du Complexe de Caicó, Province Borborema (Etat du Rio Grande do Norte, Brésil)**. Mém. DESS, Inst. Géol. Univ. Rennes I, 1991. 87p.

SOUZA, Z. S.; KALSBECK, F.; DENG, X. D.; FREI, R.; KOKFELT, T. F.; DANTAS, E. L.; GALINDO, A. C. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archean to Neoproterozoic. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 68, p. 68-96, 2016.

SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. D. F. Calc-alkaline magmatism at the archean-proterozoic transition: the Caicó Complex basement (NE Brasil). **Journal of Petrology**, v. 48, n. 11, p. 2.149-2.185, 2007.

STEINER, B. M. Tools and workflows for grassroots Li-Cs-Ta (LCT) pegmatite exploration. **Minerals**, v. 9. n. 8, 2019. art. n. 499.

SWAIN, C. J. A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. **Comput. Geosci.**, n. 1, p. 231–240, 1976.

SWEETAPPLE, M. **Mineralogy meets economics**: how does pegmatology interface with the mineral industry, society, and market forces. *In*: 6th International Symposium on Granitic Pegmatites, 2013. p. 139-140.

TAYLOR, H. E.; HUFF, R. A.; MONTASER, A. Novel Applications of ICP-MS. *In*: MONTASER, A. (ed.). **Inductively coupled plasma mass spectrometry**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. p. 681-807.

TELFORD, W. M. W.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Spatial Resolution**. Disponível em: Spatial - Resolutions - Sentinel-2 MSI - User Guides - Sentinel Online - Sentinel Online (esa.int). Acesso em: 02 out. 2022.

TRUEMAN, D. L.; ČERNÝ, P. Exploration for rare-metal granitic pegmatites. *In*: ČERNÝ, P. (ed.). **Granitic Pegmatites in Science and Industry**. Quebec, QC, Canada: Mineralogical Association of Canada, 1982. p. 463–493. (Short Course Handbook)

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P. C.; BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. **South American Earth Sciences.**, v. 8, p. 267-288, 1995.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; WILLIAMS, I. S.; HACKSPACHER, P. C.; FELTER, A. H.; DANTAS, E. L.; BABINSKI, M. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. **Precambrian Research**, v. 127, n. 4, p. 287- 327, 2003.

VERAS, J. D. D.; JUNIOR, D. C.; NETO, J. A. S. Avaliação do Potencial de Lítio na Província Pegmatítica da Borborema através de Estudos Mineralógicos, Geofísicos e Geoquímicos. *In*: Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, 8., 2018, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral Brasileiro, 2018.

WEBRING M. MINC: a gridding program based on minimum curvature, Open-File Rep, **U.S. Geol. Surv.**, n. 81, p. 1.224, 1981.

WISE, M. A.; MÜLLER, A.; SIMMONS, W. B. A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. **The Canadian Mineralogist**, v. 60, n. 2, p. 229-248, 2022.

ZHOU, W.; APKARIAN, R. P.; WANG, Z. L.; JOY, D. Fundamentals of scanning electron microscopy. *In*: ZHOU, Weillie; WANG, Zhong Lin (ed.). **Scanning microscopy for nanotechnonology**. New York: Springer, 2007. chapter 1, p. 1-3.

ANEXO

Tabela dos pontos com ocorrência de pegmatitos litiníferos visitados dentro da área de estudo, identificados no mapa geológico e de recursos minerais de Lítio (CPRM, 2018)

Toponímia	Município	UF	Mineral de Li	Longitude	Latitude
Altinho do Patrimônio	Pedra Lavrada	PB	FfLi	-36.4730460	-6.765980
Boqueirão	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.6359800	-6.698559
Capoeira	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.6352540	-6.684230
Giz	Equador	RN	Spd, Lpd, Amb	-36.7246810	-6.902086
Kombi I	Parelhas	RN	Spd, Amb, Ff Li	-36.5839140	-6.757659
Luizão (ou Pereirão)	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.6772150	-6.761350
Malhada Vermelha	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.6477822	-6.813722
Maracajá	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.7165330	-6.801054
Maribondo	Carnaúba dos Dantas	RN	Spd, Lpd, Amb	-36.6128250	-6.569734
Patrimônio	Pedra Lavrada	PB	Spd	-36.4689010	-6.763483
Pendanga	Nova Palmeira	PB	Spd, Lpd, FfLi	-36.5054337	-6.701709
Piauí	Carnaúba dos Dantas	RN	Spd, Amb	-36.5805230	-6.524737
Quinto de Cima	Equador	RN	Spd, FfLi	-36.7169849	-6.862033
Quintos	Parelhas	RN	Spd, Lpd	-36.6869219	-6.767886
Salgadinho	Carnaúba dos Dantas	RN	Spd, Lpd, Amb	-36.6123230	-6.583973
Serra Branca	Seridó	PB	Spd, Amb, FfLi	-36.4539974	-6.841523
Tibiri	Parelhas	RN	Spd**	-36.5224026	-6.786859

Fonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2018)