

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

PROJECTO CIENTÍFICO

Título

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA DO PEGMATITO DA MINA DE MORRUA DO DISTRITO DE ÍLE, PROVÍNCIA DE ZAMBÉZIA.

Autor:

Jorge Nércia Malope

Maputo, Abril de 2026



FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE LICENCIATURA EM GEOLOGIA APLICADA

PROJECTO CIENTÍFICO

Título

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA DO PEGMATITO DA MINA DE MORRUA DO DISTRITO DE ÍLE, PROVÍNCIA DE ZAMBÉZIA.

Autor:

Jorge Nércia Malope

Supervisor:

Prof. Doutor Daúd Liace Jamal

Maputo, Abril de 2026

DEDICATÓRIA

À minha mãe Nércia Malope,

pelo amor incondicional, pela força incansável e por nunca deixar de acreditar em mim, mesmo quando eu próprio duvidava.

A ti, que foste o meu primeiro exemplo de fé, coragem e perseverança.

E ao Apóstolo Lourenço Luís Fole,

pela orientação espiritual, pelas palavras de sabedoria e pelo apoio constante que me ajudaram a manter o foco e a esperança ao longo desta jornada.

Esta conquista é também vossa.

Com profunda gratidão e respeito.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pai todo-poderoso pelo dom de vida e por iluminar o meu caminho de tal forma que este sonho de ser licenciado se tornasse em uma realidade.

A minha família no geral e, em especial à minha mãe Nércia Jorge Malope, aos meus queridos avós Jorge Manuel Passe e Hortência Joel Maculane, aos meus tios Joel, Ricardo, Manuel, Jaime, Kliton, e tias Vânia, Anabela, Rosalina. Agradeço imensamente por terem depositado vossa confiança em mim desde sempre e por terem contribuído de forma incondicional para a construção do jovem íntegro que me considero ser.

Ao meu Supervisor: Prof. Doutor Daúd Liace Jamal pelo apoio, dedicação, prontidão, disponibilidade, experiência e conselhos transmitidos e também por ter depositado a confiança em mim.

A todos os Docentes da Faculdade de Ciências, em especial aos do Departamento de Geologia da Universidade Eduardo Mondlane: dr Jazilo Yussufo e dr Mugabe Junior e aos demais não mencionados aqui, o meu muito obrigado pelo acompanhamento e paciência na transmissão dos conhecimentos adquiridos durante o curso.

Ao meu melhor amigo Eng. Elidérico Artur, pelos conselhos a mim dados, companheirismo, simplicidade e cumplicidade e claro pelos valores que me tem transmitido, agradeço bastante.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Apostolo Lourenço Fole e a Pastora Cristiana Moçambique. Vosso apoio, sabedoria e incentivo foram fundamentais durante a elaboração desta monografia. Vossa orientação espiritual e vossas valiosas contribuições não só enriqueceram minha jornada acadêmica, mas também me fortaleceram para enfrentar os desafios deste percurso.

Aos meus amigos: dr Atélio Alfredo, keyce Vila, Diogo Nhanala, Luís Jonas, Guedes Sitora, Fernando Basílio, Luís Mondlane, Hélder Mazive, Noé Sambo, Fernando Sigauque, Kelvin Maluleque, Zefanias Cune, Clayton Manhique, Belton Manuel, Sidónia, Karen, Camila, Eliana, Flávia, Laura, Humilde e os demais aqui não mencionados, vai o meu muito obrigado.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Jorge Nércia Malope**, declaro por minha honra que este trabalho, nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico. E que, ele constitui o resultado da minha investigação pessoal desde o trabalho de gabinete até ao trabalho laboratorial. Estando indicadas no texto e na bibliografia as fontes que utilizei durante a sua realização.

Maputo, Abril de 2026

(.....)

(Jorge Nércia Malope)

RESUMO

A Província Pegmatítica de Alto Ligonha, localizada no nordeste de Moçambique, constitui uma das províncias pegmatíticas mais importantes do continente africano, reconhecida internacionalmente pelo seu elevado potencial em minerais estratégicos, tais como columbo-tantalite, espodumena, lepidolite e berilo. O campo pegmatítico estudado situa-se no distrito de Ile, posto administrativo de Mulevala, província da Zambézia. Os pegmatitos se encontram encaixados em anfibolitos do Complexo de Nampula, na extremidade sul do Cinturão de Moçambique (MB), localizado a sudeste do Cinturão Granulítico do Lúrio (Lúrio Belt). Estes pegmatitos estão associados à estrutura de Cisalhamento de Mamala, que favoreceu a sua instalação.

A caracterização petrográfica, geoquímica (XRF) e mineralógica (XRD) realizada neste estudo permitiu identificar a predominância de feldspatos (microclina e albite), quartzo, espodumena, lepidolite e tantalite como minerais essenciais nos pegmatitos da Mina de Morrua. A coexistência de espodumena e lepidolite confirma o caráter litinífero destes pegmatitos. Estas associações minerais revelam um elevado grau de fracionamento magmático, compatível com a evolução tardia de magmas graníticos ricos em sílica, enriquecidos em elementos incompatíveis (Li, Rb, Ta, Nb, ETR).

Este estudo permitiu concluir que a Mina de Morrua constitue um dos sectores mais evoluídos e de maior relevância económica da Província de Alto Ligonha. A sua importância está associada não apenas a evolução magmática significativa, mas também ao elevado potencial em minerais estratégicos, como o lítio, o tântalo, o nióbio e o rubídio, cuja procura é crescente nos mercados globais. Deste modo, estes pegmatitos assumem um papel central no quadro da exploração mineral da região, destacando-se como recursos de interesse económico e estratégico para Moçambique.

Palavras-chave: Província Pegmatítica de Alto Ligonha; Mina de Morrua; Caracterização Mineralógica; Difração de Raios X; Fluorescência de Raios X.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA i
AGRADECIMENTOS ii
DECLARAÇÃO DE HONRA iii
RESUMO iv
LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS viii
CAPÍTULO 1 1
1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Apresentação do Problema 2
1.2. Justificativa 2
1.3. OBJECTIVOS 3
1.3.1. Objectivo Geral 3
1.3.2. Objectivos Específicos 3
1.4 Metodologia 4
CAPÍTULO 2 5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5
2.1. Introdução 5
2.2. Modelos Genéticos dos pegmatitos 6
2.2.1. Modelo de fracionamento magmático 6
2.2.2. Modelos anactéticos 7
2.3. Classificação dos corpos pegmatíticos 9
2.3.1. Classificação dos pegmatitos com base na mineralogia 10
2.3.2. Zonamento em pegmatitos heterogéneos ou complexos 11
2.3.2.1. Zona de borda 12
2.3.2.2. Zona da parede 12
2.3.2.3. Zona intermédia 12
2.3.2.4. Núcleo 12
2.3.2.5. Unidades de substituição 12
2.3.2.6. Preenchimento de fraturas 12

CAPÍTULO 3 14
3. **LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO** 14
3.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO 14
3.1.1. Localização 14
3..2. Clima, Relevo e Solos 14
CAPÍTULO 4 16
4. **ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO** 16
4.1. Geologia Regional 16
4.2. Cinturão de Moçambique 16
4.3. Geologia do pegmatito do alto-ligonha 18
4.3.1. Província de Alto Ligonha (norte de Moçambique) 18
4.5. Distribuição dos pegmatitos da província pegmatítica de Alto Ligonha 18
4.6. Geologia local 21
4.7. Grupo de Molocué 22
4.7.1. Gnaisses Máficos e Ultramáficos (P2Nmam e P2NMug) 22
4.7.2. Quartzitos (P2NMsg) 23
4.7.3. Metacarbonatos e Rochas Calco-silicáticas (P2NM) 23
4.7.4. Metapsamíticos, Metapelíticos e Gnaisses Metavulcânicos (P2NMa) 23
4.8. O Pegmatito de Morrua 24
4.9. Zonamento mineralógico de Morrua 24
4.10. Classificação do Pegmatito da Mina de Morrua 25
CAPÍTULO 5 28
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 28
5.1. Petrografia 28
5.2. Preparação das Lâminas Delegadas 28
5.2.1. Fluxograma do Processo de Preparação das Lâminas Delgadas 29
5.3. Características litológica do pegmatito de Morrua 30
5.4. Pegmatito HM-517 30
5.5. Pegmatito HM-01 31
5.6. Pegmatito HM-02 32
5.7. Pegmatito HM-518 33
5.8. Anfibolito HM-519 35

5.9. Anfibolito HM-04 37
5.10. Anfibolito HM-03 39
CAPÍTULO 6 41
6. Geoquímica de Rocha total e Mineral 41
6.1. Análise por XRF 41
6.2. Elementos maiores das amostras de pegmatitos e anfibolitos 42
6.3. Elementos menores e traços das amostras de pegmatitos e anfibolitos 43
6.4. Classificações químicas 44
6.5. Caracterização mineralógica 46
6.7. Pegmatito HM-518 47
6.8. Pegmatito HM-517 48
6.9. Anfibolito HM-04 49
6.10. Pegmatito HM-517 e HM-518 49
CAPÍTULO 7 52
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 52
CAPÍTULO 8 56
8. Conclusões e Recomendações 56
8.1. Conclusões 56
8.2. Recomendações 57
9. Referências Bibliográficas 58
ANEXOS 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução química de grupo pegmatítico rico em Lítio (Extraído de Cerny 1991). 7
Figura 2: Representação esquemática do zonamento de um campo pegmatítico do tipo LCT. Fonte Černý (1991). 10
Figura 3: Imagens esquemáticas representativas de pegmatitos segundo sua estrutura interna e mineralogia. 11
Figura 4: Estrutura interna de pegmatitos zonados em seção l horizontal (Černý, 1991)... 13
Figure 5: Mapa de Localização Geográfica..... 15
Figura 6: Mapa do Gondwana nos finais de Neo-proterozóico. 17
Figura 7: Mapa geológico com zonas pegmatíticas A-D. Fonte: Cronwrigth (2005)..... 20
Figura 8: Mapa geológico de Nordeste de Moçambique (Marcey et al, 2010)..... 22
Figura 9: Mapa geológico, ilustrando as principais litologias da área de estudo 22
Figura 10: Microscópio Óptico do laboratório de microscopia..... 28
Figura 11: Fotografia do pegmatito HM-517 31
Figura 13: Fotografia do pegmatito HM-02. 33
Figura 14: Fotografia do pegmatito HM-518 35
Figura 15: Anfibolito HM-519.. 37
Figura 16: Anfibolito HM-04.. 38
Figura 17: Anfibolito HM-03 40
Figura 18: diagrama Zr/4–2Nb–Y de Meschede (1986) 44
Figura 19: O diagrama multielementar normalizado ao Manto Primitivo (Sun & McDonough, 1989)..... 45
Figura 20: Caracterização mineralógica do Pegmatito HM-518..... 47
Figura 21: Caracterização mineralógica do Pegmatito HM-517..... 48
Figura 22: Caracterização mineralógica do anfibolito HM-04. 49
Figura 23: Difratograma de raios-X do pegmatito HM-517 e HM-518..... 50

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

FRX - Fluorescência de raio-X

PDF- (International Center for Diffraction Data)

UEM - Universidade Eduardo Mondlane

DRX - Difracção por raio-X

INAMI – Instituto Nacional de Minas

MAE – Ministério da Administração Estatal

GTK- Serviços Geológicos da Finlândia

MA – Milhões de Anos

MB – Mozambique Belt

EAO- Orogenia Este Africana

LCT- Lítio, césio e tântalo.

NYF- Nióbio, ítrio e fluor.

PNM- Pegmatitos do Norte de Moçambique

mm – milímetros

ppm - partes por milhão

Km2 – Quilómetros quadrados

MAE- Ministerio de Administração Estatal

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

As mineralizações em pegmatitos são abundantes no Norte de Moçambique e a sua prospecção e exploração remonta, desde o tempo de ocupação colonial. A Província Pegmatítica do Alto Ligonha destaca-se como uma das regiões geológicas mais importantes globalmente. Reconhecida pelos seus depósitos de gemas e espécimes minerais únicos, é também uma fonte primária de uma vasta gama de minerais de elementos raros (Dias & Wilson, 2000).

Esta província engloba quase todos os pegmatitos conhecidos em Moçambique, concentrando a sua maior expressão económica no Campo Pegmatítico do Alto Ligonha, um cinturão de 170 km orientado NE-SW, que se estende de Mocubela, a sul, até à localidade do Alto Ligonha, a norte. Entre os locais mais proeminentes destacam-se as jazidas de Morrua, Marropino, Muiane e Nahipa, onde ocorrem minerais estratégicos como tantalite (Ta), nióbio (Nb), berilo, espodumena, lepidolite, polucite, além de diversas gemas preciosas como turmalinas e águas-marinhas.

Especificamente, a Mina de Morrua, situada no distrito de Ilé e cobrindo uma área de 0,8 km² próximo ao Rio Melela, representa um ponto fulcral de interesse dentro desta província. A mina é acessada por estradas que ligam Alto Molócuè, Gilé e Mulevale (fig 5). A heterogeneidade litológica marca este pegmatito, cujas dimensões totais são difíceis de delimitar devido à significativa cobertura por solos residuais (Afonso et al., 1998).

A Mina de Morrua é um exemplo proeminente de um pegmatito hospedado em anfibolitos, fundamental para a mineração em grande escala de tântalo (Ta) e outros minerais preciosos. Embora a Província do Alto Ligonha seja reconhecida por vários tipos de pegmatitos (Lachealt, 2004), o estudo focado na Mina de Morrua permitirá aprofundar a compreensão sobre as características mineralógicas de um dos seus depósitos mais significativos.

1.1. Apresentação do Problema

A Mina de Morrua, um dos pilares da produção de tântalo e nióbio na Província Pegmatítica do Alto Ligonha, em Moçambique, embora historicamente relevante, padece de uma compreensão mineralógica sistemática e abrangente que é crucial para optimizar a sua exploração. Os estudos existentes são frequentemente focados em aspetos mais amplos da província pegmatítica do Alto-ligonha, deixando uma lacuna significativa no conhecimento detalhado do próprio depósito de Morrua.

O principal desafio reside na falta de uma caracterização mineralógica sistemática que mapeie a variabilidade composicional e espacial dos minerais valiosos, particularmente os de tântalo e lítio, dentro do corpo pegmatítico. Embora se reconheça a sua heterogeneidade litológica, conforme observado por Afonso et al (1998), a extensão dessa variabilidade e as suas implicações para o beneficiamento permanecem pouco claras. A dificuldade em delimitar as dimensões completas do pegmatito devido à cobertura superficial por solos residuais, mencionada também por Afonso et al. (1998), agrava este problema, impedindo a criação de modelos geológicos precisos que informem as decisões de lavra.

1.2. Justificativa

No âmbito científico e económico, este estudo contribuirá significativamente para o conhecimento da petrologia e metalogenia de pegmatitos graníticos, especialmente no contexto da Província do Alto Ligonha. A Mina de Morrua, com a sua reconhecida heterogeneidade litológica, oferece uma oportunidade única para investigar a complexidade dos processos de cristalização e fracionamento magmático em sistemas pegmatíticos. Por fim, a melhor compreensão da mineralogia da Mina de Morrua é vital para a sustentabilidade das operações mineiras. Um conhecimento mais preciso dos minerais presentes permite o desenvolvimento de práticas de exploração mais eficazes e ambientalmente responsáveis, minimizando o desperdício e maximizando a recuperação dos recursos.

Apesar da exploração histórica (desde o período colonial), a carência de modelos geológicos robustos e a cobertura por solos residuais limitam o entendimento da sua génese e potencial económico integral. Assim, torna-se imperativo realizar uma caracterização mineralógica, que permita não só compreender a génese e evolução do pegmatito de Morrua, mas também fornecer bases sólidas para a sua exploração racional e sustentável, contribuindo para o desenvolvimento económico local e para o avanço do conhecimento científico sobre os pegmatitos da província de Alto Ligonha. Além disso, a crescente procura global por elementos estratégicos como o tântalo, o lítio e o césio confere relevância adicional à investigação desta jazida, numa altura em que a transição energética e a indústria tecnológica exigem novas fontes sustentáveis destes recursos, sendo por isso um tema de grande relevância para a geologia e mineração em Moçambique.

1.3. OBJECTIVOS

1.3.1. Objectivo Geral

- Caracterizar geoquimicamente e mineralogicamente o pegmatito da Mina de Morrua.

1.3.2. Objectivos Específicos

Para alcançar o objectivo geral, foram estabelecidos os seguintes objectivos específicos

- Caracterizar texturalmente os principais minerais do pegmatito da Mina de Morrua, por meio de análises petrográficas.
- Realizar análises mineralógicas por meio de técnicas como difração de raios-X (DRX), para identificar os principais minerais presentes nos pegmatitos da Mina de Morrua.
- Determinar a composição química do pegmatito, utilizando a espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

1.4 Metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados métodos de gabinete e laboratoriais. O trabalho de gabinete consistiu na recolha e análise de dados bibliográficos, incluindo relatórios técnicos e estudos geológicos da área.

As amostras utilizadas no estudo (4 amostras de pegmatito e 3 de anfibolito) foram previamente recolhidas e submetidas a diversas análises laboratoriais. Todas as amostras passaram por análises petrográficas no Laboratório de Microscopia do departamento de Geologia (UEM), com recurso à microscopia de luz transmitida com o objetivo de caracterizar a mineralogia, textura e estrutura das rochas.

As sete (7) amostras foram analisadas por fluorescência de raios X (FR-X) no Laboratório de preparação de amostras no Departamento de Geologia (UEM), com o objetivo de determinar a composição química total das rochas. Adiccionalmente, foram realizadas análises de difração de raios X (DR-X) no laboratório de geologia do Instituto Nacional de Minas (INAMI) em três (3) amostras especificas: uma de anfibolito (HM-04) e duas amostras de pegmatito (HM-517 e HM-518), com o intuito de identificar as fases minerais cristalinas presentes. Os dados de DR-X foram interpretados no software highScore Plus.

Mais tarde, foram realizadas análises de difração de raios X (DR-X) no Laboratório de Geologia da UEM, de duas amostras de pegmatitos (HM-517 e HM-518), e os resultados foram interpretados no software SmartLab Sudio. Os resultados das análises de fluorescência de raios X foram tratados no software GCDkit, utilizado para o tratamento de dados geoquímicos e elaboração de diagramas interpretativos.

Por fim, a síntese e discussão dos resultados foram realizadas em gabinete, integrando os dados petrográficos e analíticos para suportar a interpretação mineralógica do pegmatito de Morrua.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Este capítulo, faz uma abordagem sobre a terminologia e os sistemas de classificação dos pegmatitos, que ajudarão a compreender os capítulos seguintes deste Projecto Científico, que se concentra no estudo do pegmatito de Morrua.

Pegmatitos são rochas ígneas que foram classificadas de diversas formas ao longo dos anos, considerando-se teorias sobre formação e evolução de pegmatitos. As primeiras definições abrangem essencialmente critérios texturais, desconsiderando-se características relevantes tais como o zonamento, as mudanças texturais e a evolução química dos pegmatitos. Assim, o pegmatito seria uma rocha intrusiva, holocristalina, de granulometria muito grosseira (Fersman, 1931; Landes, 1933; Jahns, 1955).

Definições mais recentes, descrevem os pegmatitos como sendo rochas ígneas, maioritariamente de composição granítica, distinguidas de outras rochas ígneas pelos cristais de granulometria extremamente grosseira, mas também de tamanho variável, ou ainda por uma abundância de cristais com hábitos esqueletais, gráficos ou com forte crescimento direcional (London, 2008). A textura gráfica é única aos pegmatitos, e a partir dela foi designado o próprio termo pegmatito (London e Kontak, 2012)

Os pegmatitos são conhecidos pela presença de excelentes minerais-gema e, por outro lado, por há muito serem 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 raros na crusta terrestre, como Li, Sn, Ta, Nb, Be, Cs, Rb, Sc, Th, U e Elementos Terras Raras (ETR) (London, 2008)

A maioria dos pegmatitos são corpos pequenos, com dimensões métricas e estrutura interna complexa, que formam segregações dentro de grandes massas de rocha granítica, ocorrendo também como diques, soleiras ou lentes nas rochas hospedeiras, sejam elas graníticas e metamórficas (London e Kontak, 2012).

2.2. Modelos Genéticos dos pegmatitos

Vários modelos genéticos e evolutivos descritos na literatura buscam compreender a formação/gênese de corpos pegmatíticos (Jahns, 1982; Jahns e Burnham 1969; Cerný 1982; London 1986; e Simmons e Webber 2008). Estes autores consideram que a gênese dos pegmatitos é proveniente de fusões silicatadas, porém há uma discordância em relação à origem dessas fusões, se são originadas a partir da anatexia de protólitos (rocha encaixante) ou se são derivadas de um fracionamento magmático.

2.2.1. Modelo de fracionamento magmático

Entre diversos modelos genéticos que explicam a géneses dos pegmatitos, o modelo do fracionamento magmático é um dos modelos amplamente aceite para a formação desses corpos. E este modelo propõe que os corpos pegmatíticos representam fusões residuais derivadas da evolução e cristalização de magmas graníticos, com a concentração progressiva de elementos incompatíveis, voláteis e raros (London, 2008).

Em estudos pioneiros sobre a génese de pegmatitos (Jahns, 1955; Burnham, 1969), consideram que magmas silicáticos coexistentes com vapor de água seriam o material inicial a partir do qual os pegmatitos são 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, contendo o B, F, P e Li.

London (2008) propôs que corpos menos diferenciados se localizam mais próximos ao granito fonte, enquanto aqueles com maior concentração de elementos raros estão distribuídos a uma distância maior, conforme ilustrado na Fig 1. Essa distância está relacionada com a estabilidade termal da composição do magma, ou seja, fusões com menores temperaturas e baixa viscosidade, que resultam da maior concentração em elementos voláteis à medida que o magma é fracionado, migram para mais longe.

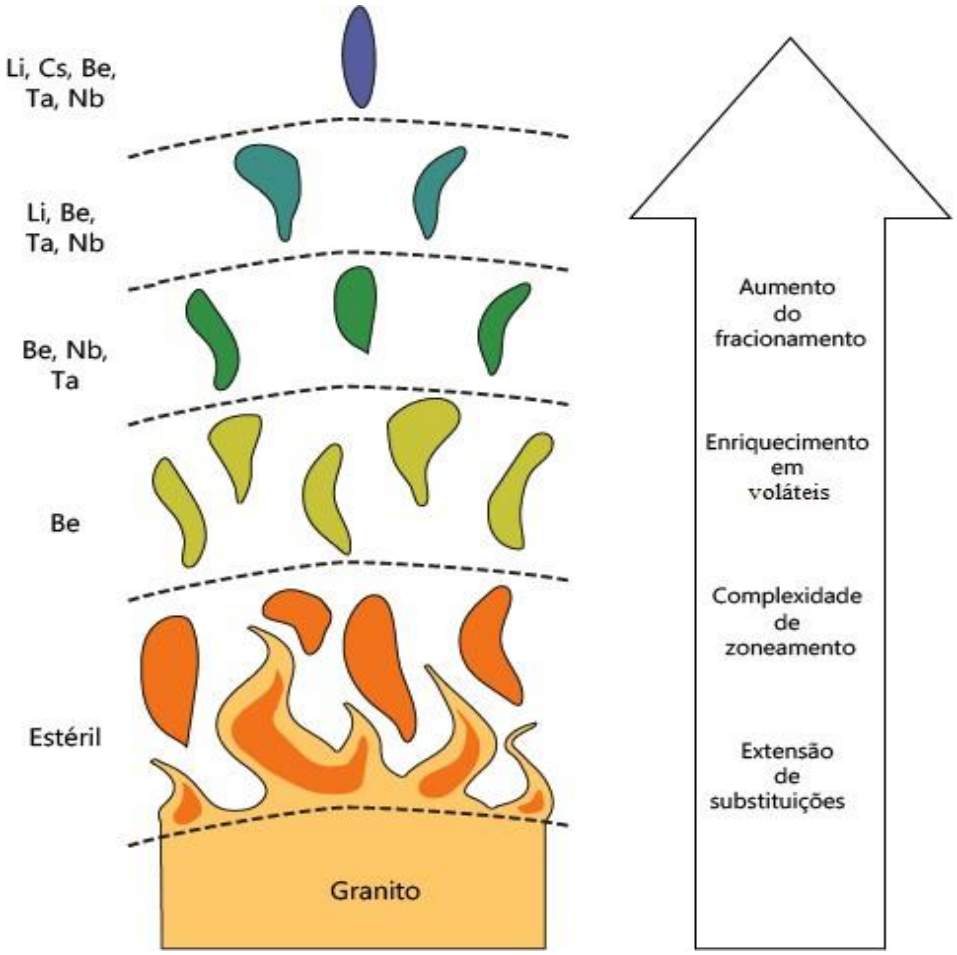


Figura 1: Evolução química ao longo de um grupo pegmatítico rico em Lítio com a distância do granito (Extraído de Cerny 1991).

.

2.2.2. Modelos anactéticos

Os pegmatitos são geralmente considerados como produtos da cristalização fraccionada de um magma de composição granítica (London 2008). No entanto, também tem sido sugerido que um magma pegmatítico com composição semelhante àquela resultante de cristalização fraccionada prolongada pode formar-se directamente por anatexia ou seja, por fusão parcial de rochas com a composição química apropriada. (Bebout et al., 2007; Coveney, 2000; Thomas et al., 2005, 2006).

Simmons et al. (1996) propuseram que, em ambientes orogénicos, magmas resultantes de fusão parcial de baixo grau, gerados na periferia de intrusões graníticas, poderiam evoluir directamente para magmas pegmatíticos. Nestes contextos, rochas metassedimentares contendo sequências evaporíticas podem constituir importantes fontes de elementos voláteis como o boro e o lítio, bem como de outros elementos incompatíveis com a estrutura cristalina dos minerais comuns das rochas ígneas.

O argumento que sustenta a teoria anatéctica, baseia-se no facto de: em ambientes tectónicos colisionais, uma sequência litológica que pode incluir unidades vulcanoclásticas rica em componentes voláteis e elementos incompatíveis, pode fornecer os precursores necessários para a geração de magmas graníticos. Estes magmas podem, por sua vez, evoluir por cristalização fraccionada até um estágio pegmatítico. No entanto, os mesmos elementos voláteis e incompatíveis podem também ser directamente incorporados no magma originando um pegmatito sem que seja necessário o desenvolvimento prévio de um plutão granítico.

Segundo Simmons et al. (2016) as texturas pegmatíticas mais distintivas, como intercrescimentos gráficos, hábitos esqueléticos ou cristalização unidirecional, requerem um elevado grau de sobressaturação, o que só é atingível através da migração da fusão para níveis superiores e mais frios da crusta. Esta migração é inviável para pequenos volumes de fusão gerados na anatexia.

O modelo de fracionamento magmático é o mais consistente para explicar a formação de pegmatitos altamente diferenciados, pois justifica tanto o enriquecimento em elementos incompatíveis como a sua zonalidade interna. Já o modelo anatéctico, apesar de explicar a fusão parcial da crosta, mostra-se insuficiente para interpretar a elevada especialização mineralógica destes corpos. Assim, o fracionamento magmático revela-se mais adequado para compreender a evolução petrológica e a relevância económica dos pegmatitos.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS PEGMATÍTICOS

Os pegmatitos têm sido objecto de inúmeras tentativas de classificação conforme descrito na literatura. De acordo com Černý e Ercit (2005), princípios gerais que ainda hoje se aplicam como a estrutura interna, relações paragenéticas, composição química, aspetos petrogenéticos, natureza do meio original e características geoquímicas, entre outros, resultaram de simples tentativas baseadas em observações de campo. Na sua maioria estas tipologias iniciais pecavam por ignorarem diferenças nos ambientes geológicos de implantação dos corpos pegmatíticos.

A classificação abordada por Černý e Ercit (2005) segue duas vias conceptuais e tem como base trabalhos de Ginsburg et al. (1979) e Černý (1990, 1991). A primeira via trata da localização geológica, levando à divisão de pegmatitos graníticos em duas classes (abissal e miarolítica). Muitas destas classes são subdivididas em subclasses com características geoquímicas fundamentalmente diferentes.

A segunda via conceptual é petrogenética, desenvolvida para pegmatitos derivados da diferenciação ígnea de plutões parentais. Autores como Černý e Ercit (2005) consideram três famílias:

- Família LCT, peraluminosa, marcada pelo incremento e deposição mineral de Li, Cs e Ta (além de Rb, Be, Sn, B, P e F), derivada principalmente de granitos do tipo S e muito mais raramente de granitos do tipo I, de acordo com a Fig 2.
- Família NYF, com concentração progressiva de Nb, Y e F (além de Be, TR, Sc, Ti, Zr, Th e U), fracionada de granitos subaluminosos a metaluminosos do tipo A e I que podem ser gerados por uma variedade de processos envolvendo contribuições da crusta profunda ou manto;
- Família NYF + LCT, de diversas origens, como por exemplo, a contaminação de plutões de NYF pela digestão de rochas supracrustais de petrogénese incerta.

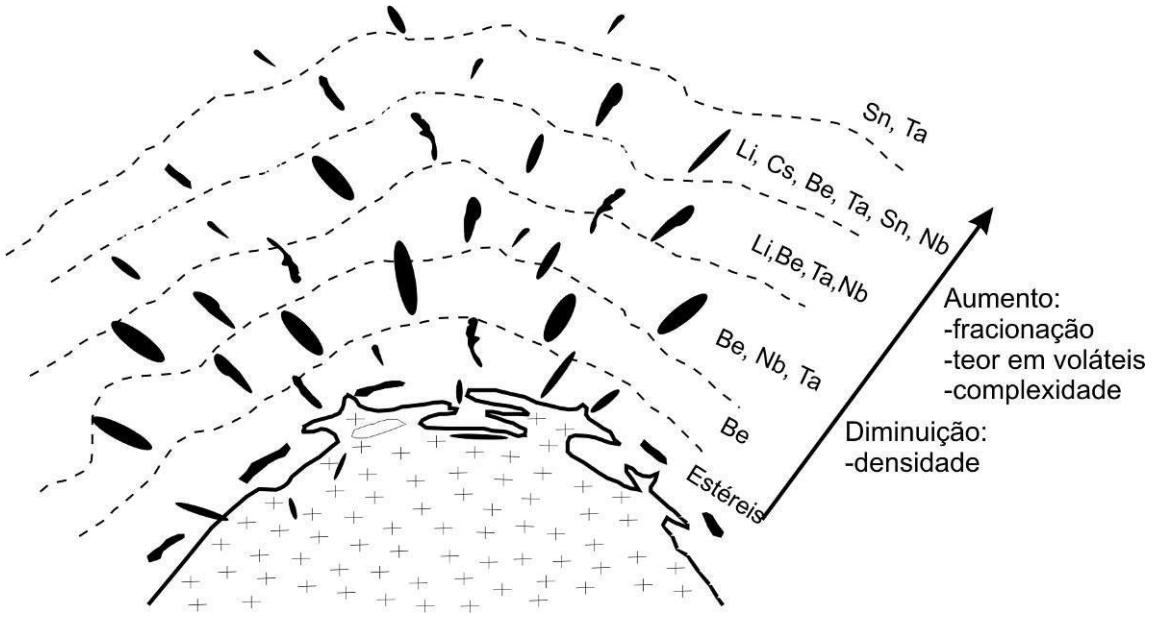


Figura 2: Representação esquemática do zonamento de um campo pegmatítico do tipo LCT. Fonte Černý (1991).

2.3.1. Classificação dos pegmatitos com base na mineralogia

Cameron et al. (1949) classificou os pegmatitos em simples ou homogéneos e complexos ou heterogéneos com base na mineralogia e zonamento. Os pegmatitos denominados de simples ou homogêneos (Fig 3A), não são zonados, com uma espessura que não ultrapassa de 1 metro e não apresentam corpos de substituição tardios. A mineralogia essencial é composta por feldspato potássico, quartzo e moscovite e, os minerais acessórios são biotite, turmalina. E este tipo de pegmatito apresenta uma textura uniforme desde a zona marginal até o núcleo.

Por sua vez, os pegmatitos complexos (Fig 3B) também chamados de heterogêneos, apresentam uma complexidade mineralógica e estrutural, assim como uma elevada quantidade de corpos de substituição. Estes são capazes de atingir uma espessura de até 25 metros e comprimento de centenas de metros, com forma tabular ou lenticular. Caracterizam-se por apresentar uma estrutura zonada, associação mineralógica bem definida, podendo em alguns casos, mostrar quatro tipos de zonas nomeadamente a zona de borda, zona da parede, zona intermédia e núcleo. São constituídos por quartzo, feldspatos, micas, lepidolite,

espodumena, turmalina, topázio, cassiterite, berilo, tantalite, columbite, zircão, clorite e uraninite.

Alguns autores, (Roldf, 1945 ; Lima, 2002) ainda classificam os pegmatitos em mistos (Fig 3C), os mistos que são intermédios entre homogéneo e heterogéneo e apresentam bolsadas de quartzo ao invés de núcleos individualizados, semelhante à zona dos heterogéneos. Em torno destas bolsadas de quartzo a granulometria dos minerais aumenta bastante, predominar cristais de feldspato potássico.

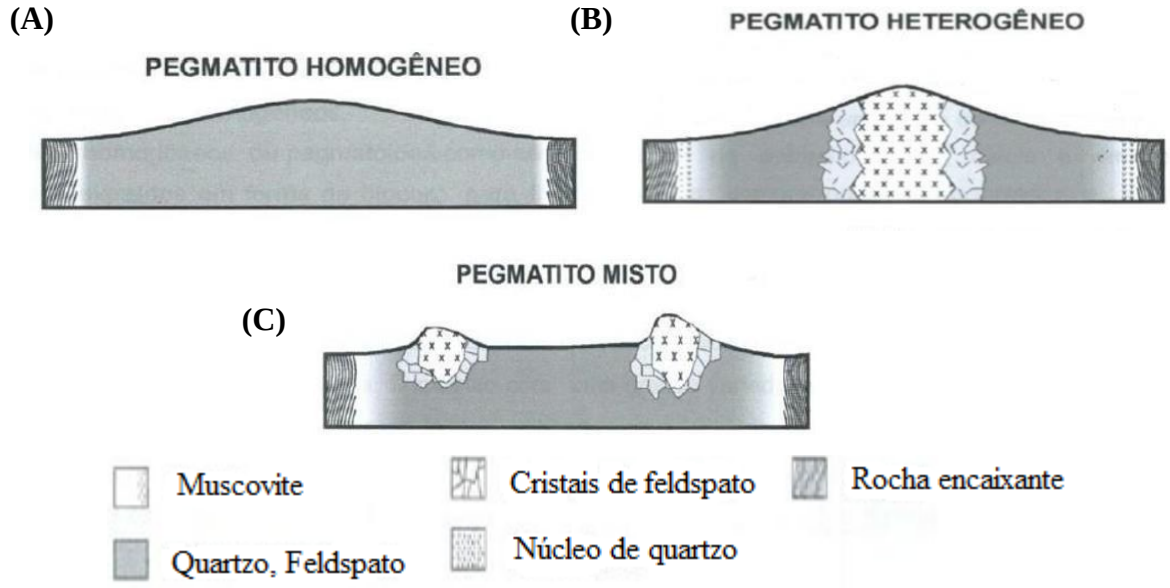


Figura 3: Imagens esquemáticas representativas de pegmatitos segundo sua estrutura interna e mineralogia; (a) pegmatito homogêneo ou simples; (b) pegmatito heterogêneo ou complexo; e (c) pegmatito misto. (Cameron et al. 1949; Rolf, 2002).

2.3.2. Zonamento em pegmatitos heterogéneos ou complexos

Cameron et al. (1949) estabeleceram as bases para caracterização da estrutura zonal dos pegmatitos, de fora para dentro, sendo este o único modelo amplamente utilizado até hoje, Quatro zonas principais, descritas a seguir podem ser reconhecidas na caracterização interna de pegmatitos zonados (Figura 4), sendo que a ocorrência destas em um corpo pode ser variável. De acordo com estes autores os componentes essenciais de um pegmatito zonado são:

2.3.2.1. Zona de borda

Exibe grão fino e textura hipidiomórfica granular de constituição granítica residual, podendo servir como base de nucleação de cristais de turmalina, moscovite, biotite, berilo ou feldspato potássico com dimensões centimétricas (London, 2008).

2.3.2.2. Zona da parede

Corresponde a uma camada mais espessa e apresenta geralmente cristais de grão mais grosseiro que a zona de borda. As zonas de borda e da parede dos pegmatitos comuns possuem o maior número de fases minerais, tais como a turmalina, berilo, mica e feldspato potássico (London, 2008).

2.3.2.3. Zona intermédia

Nesta zona constata-se o aumento do tamanho dos cristais que exibem granulometria grosseira a muito grosseira. Dominam as fases monominerálicas ou associações minerais de massas de microclina pertítica, plagióclase, quartzo, espodumena, petalite ou lepidolite (Cameron et al., 1949; London, 2008).

2.3.2.4. Núcleo

A unidade mais interna de um corpo pegmatítico, seja com uma massa única ou com múltiplas repetições da mesma mineralogia na mesma posição estrutural ou sequencial, é considerada o núcleo. Na sua composição mineralógica predomina o quartzo (London, 2008).

2.3.2.5. Unidades de substituição

Correspondem a unidades de origem secundária, por alteração ou sobreposição dos materiais pegmatíticos pré-existentes e de origem primária. São mais frequentes no núcleo e zonas intermédias, embora a sua ocorrência tenha também sido identificada em outras unidades primárias (Cameron et al., 1949; London, 2008).

2.3.2.6. Preenchimento de fraturas

Unidades originadas em regime frágil, posterior à consolidação do corpo pegmatítico com preenchimento maioritariamente composto por quartzo, mas também por outros minerais, podendo expressar-se em outras zonas na periferia do núcleo (Cameron et al., 1949; London, 2008).

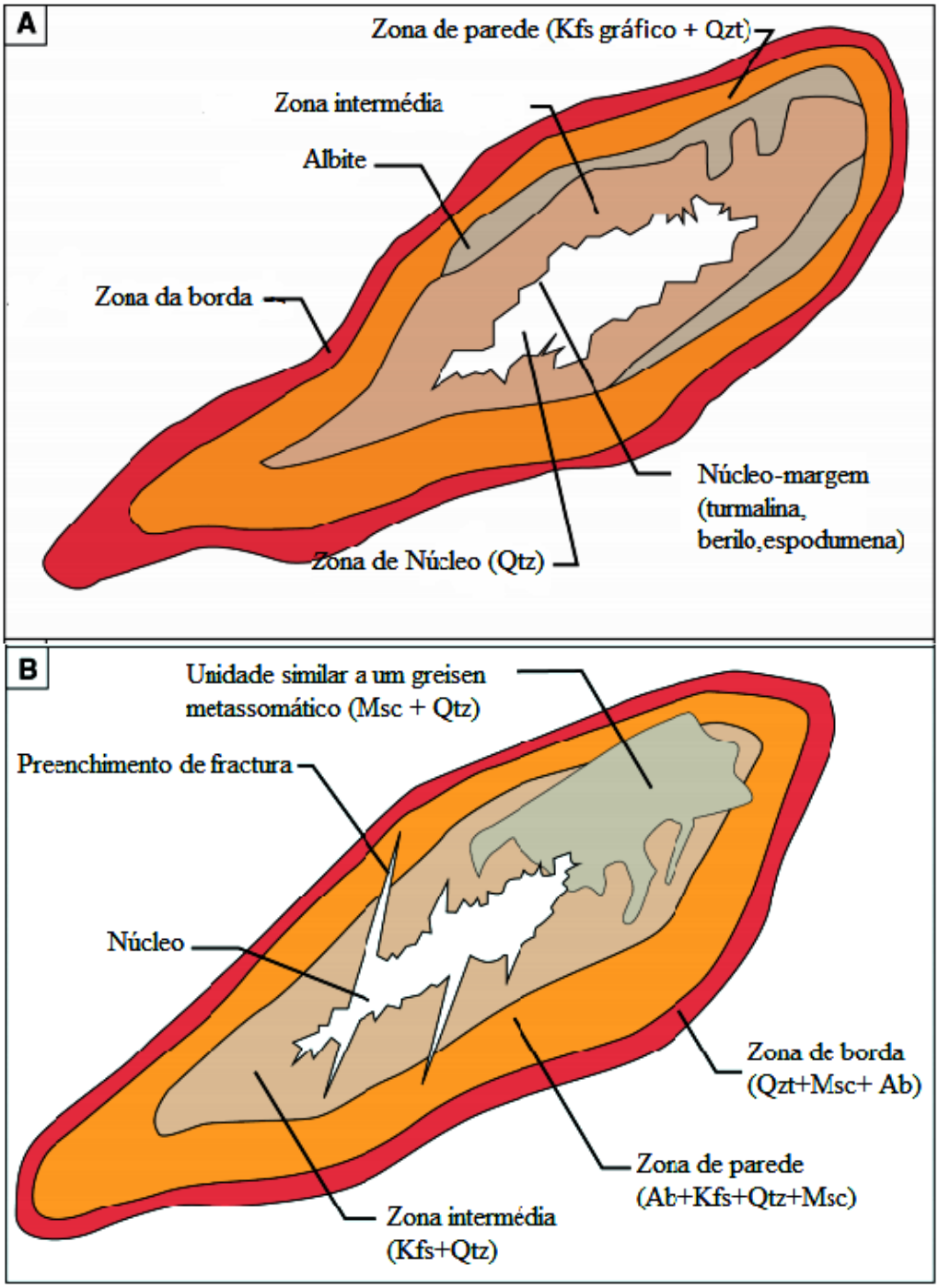


Figura 4: Estrutura interna de pegmatitos zonados em seção ⊦ horizontal, (A) na qual é possível observar o padrão concêntrico das zonas bem como a distribuição mineralógica e textural comumente observada nesses corpos e (B) unidades atípicas como preenchimentos de fraturas e unidade de substituição (Černý, 1991).

CAPÍTULO 3

3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo apresenta uma síntese dos principais aspetos geográficos do distrito de Íle e da área específica de estudo. Serão abordados a localização geográfica, o clima, o relevo e os solos relevantes para a compreensão do contexto do trabalho..

3.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Localização

A Mina de Morrua localiza-se no posto administrativo de Mulevala, no distrito de Ile, situado a norte da Província da Zambézia, centro de Moçambique. O acesso à Mina é feito por estradas de terra batida, que partem das localidades de Alto Molócuè e Gilé Fig 5.

3..2. Clima, Relevo e Solos

Em termos de condições climáticas, o distrito de Íle é influenciado pelo clima de tipo chuvoso de savana, onde as precipitações médias anuais são acima dos 800 mm, chegando na maioria dos casos a 1.200 ou mesmo 1.400 mm, concentrando-se no período compreendido entre Novembro de um ano e finais de Março do seguinte, podendo localmente estender-se até maio (Ministério da Administração Estatal, 2005).

O Distrito de Íle possui uma bacia hidrográfica rica, formada por quatro rios principais de regime permanente (Namuna, Nipiode, Mutuazi, Muliquela) e seus afluentes, sendo o rio Namanda o principal. Tem uma altitude média, compreendendo planaltos baixos, médios e sub-planaltos que abrangem altitudes que variam de 200 a 1000 metros acima do nível médio do mar. O relevo apresenta declives que variam de suavemente ondulados a fortemente dissecados (MAE, 2005).

O distrito de Íle é dominado por solos residuais derivados, na maioria, de rochas metamórficas e eruptivas do solo pré-cambriano, em particular, do grupo de Molócuè. Os solos são localmente pouco profundos, castanho-avermelhados, sendo ainda ligeiramente lixiviados, excessivamente drenados ou moderadamente bem drenados e, por vezes, localmente mal drenados (MAE, 2005).

Mapa de Localização geográfica

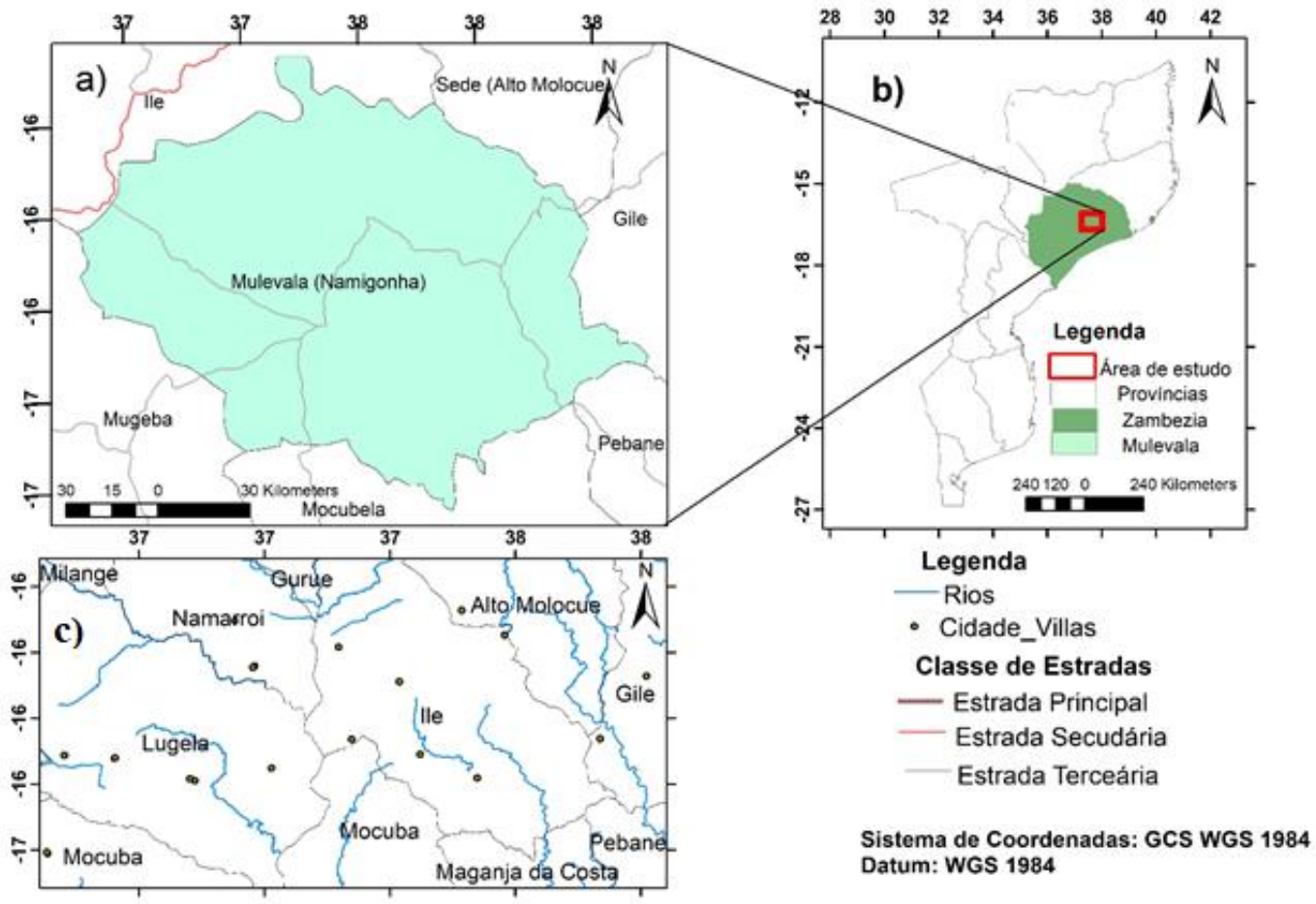


Figure 5: Mapa de Localização geográfica: a) Localização do Posto administrativo de Mulevala e suas vias de acesso;. b) Localização da área de estudo em relação a Moçambique. c) Principais rios do distrito de Íle.

CAPÍTULO 4

4. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo aborda o enquadramento geológico da área de estudo, detalhando tanto a geologia regional quanto a geologia local. São descritos as principais unidades geológicas que caracterizam a região, bem como a classificação dos pegmatitos de Alto Ligonha.

4.1. Geologia Regional

A área de estudo enquadra-se no Cinturão de Moçambique, o qual é parte do Orógeno do Leste Africano (EAO, Engvik, 2007). O EAO é um evento tectónico do Proterozóico Superior (Ca 900 - 590 Ma) que uniu micro-continentes e arcos insulares, formando o Escudo Árabe -Núbio (ANS). Foi uma fase crucial da formação de cadeias montanhosas que consolidou a parte oriental do supercontinente Gondwana, estendendo-se do leste africano até a Antártida. O EAO é caracterizado por uma arquitectura Geológica diferente em sua divisão estratigráfica, o que demonstra a colisão de duas massas continentais com características individuais. A parte norte do Orógeno é caracterizado por uma crosta juvenil Neoproterozóica, de carácter oceânico, formado por quatro estágios de acreção. Stern et al. (2010 a) mostra que apenas 5% dos zircões datados individualmente das rochas ígneas ANS são mais velhos do que 880 Ma. Stern et al. (2010 a) interpreta que esses xenocristais de zircão residiam no manto e foram arrastados quando esse manto derreteu para formar a crosta ANS juvenil. O sul do EAO é caracterizado por terrenos de alto grau de metamorfismo (fácies anfibolítica a granulítica). Os protólitos dessas rochas têm idades arqueanas a meso-proterozóicas e são intrudidas por plutonitos neoproterozóicos e preservam poucas evidências de material juvenil. Datações pelo método U – Pb (zircão) de rochas granulíticas, associadas a um intenso dobramento isoclinal forneceram a idade de 580 – 550 Ma. O dobramento foi seguido por intrusões de rochas gabroícas e granitóides e por um colapso extensional a 530 – 500 Ma (Jacobs e Thomas, 2004).

4.2. Cinturão de Moçambique

O Cinturão **de** Moçambique (MB) compreende principalmente a crosta pré-neoproterozóica com uma assinatura tectono-térmica neoproterozóica - precoce do

Cambriano (rochas infra-crustais incluindo granulitos) (Kroner e Stern., 2005; Fritz et al.,2013; viola et al., 2008).

O (MB) é uma estrutura orogénica com direcção de aproximadamente N-S, exposta no flanco oriental do Cratão da Tanzânia, que se estende para Sul a partir do Norte do Quénia, Uganda e Etiópia até Moçambique, onde ocupa o flanco oriental do Cratão do Zimbabwe. Este Cinturão (MB) formou-se durante a Orogenia Pan-Africana à aproximadamente 500Ma e produziu cinturões móveis como resultado da amalgamação de domínios continentais (Kroner e Stern, 2005; Fritz et al.,2013).

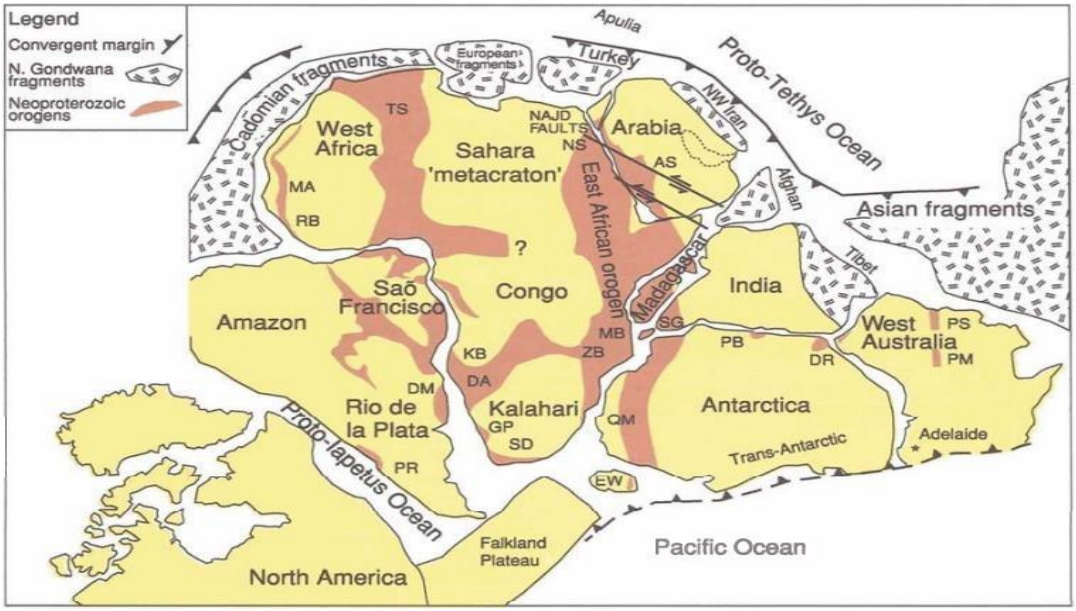


Figura 6: Mapa do Gondwana nos finais de Neo-proterozóico, mostrando o arranjo geral dos Cinturões Pan Africanos, MB- Mozambique Belt; MZ- Zambeze Belt. Fonte: (Kroner e Stern., 2005).

O Cinturão de Moçambique é dividido em duas partes (Marcey et al., 2010; Fritz et al.,2013):

- A Norte, os complexos Marrupa, Xixano, Montepuez, Unango e Ocua são formados por leucognaisses migmatíticos; gnaisses micáceos, paragnaisses, mármore, micaxistos e gnaisses biotíticos; ortognaisses; gnaisses graníticos e gnaisses dioríticos.
- A Sul, compreende o complexo de Nampula, que é dominado por migmatitos e ortognaisses que hospedam os pegmatitos de metais raros;

As duas unidades são separadas pelo Cinturão de Lúrio. Os principais desenvolvimentos estruturais e metamórficos do Sul do Cinturão de Moçambique foram interpretados como terem ocorrido durante o Neoproterozóico.

O Complexo Nampula foi retrabalhado na orogenia colisional Pan-Africana, em condições metamórficas de fácies anfibolito, datadas entre 550 e 500 Ma a partir de bordas de zircão. Essa orogênese provocou a instalação de nappes e a deposição de sequências sedimentares restritas seguidas de deformação, metamorfismo e magmatismo granítico volumoso por volta de 510 Ma (Macey et al., 2010).

4.3. GEOLOGIA DO PEGMATITO DO ALTO-LIGONHA

4.3.1. Província de Alto Ligonha (norte de Moçambique)

A Província Pegmatítica de Alto Ligonha (PPAL) é uma importante província de pegmatitos, que produz gemas, minerais industriais e metais raros (REE, Be, Nb–Ta, Li, U–Th). Um total de 12 campos de pegmatitos, com 46 grupos de pegmatitos e mais de 100 ocorrências individuais de pegmatitos são conhecidas em Moçambique (Cronwright, 2005); estas correlacionam-se com granitos do tipo A, subaluminosos a peraluminosos, equigranulares, de idade Pan-Africana, pós-orogénicos e não deformados.

Os pegmatitos de Alto Ligonha estão concentrados principalmente no Complexo de Nampula, localizada no extremo sul do MB (Cronwright, 2005). Para além de vários tipos de pegmatitos estéreis em relação aos CGM (minerais do grupo de columbite-tantalite), três grupos de pegmatitos com elementos raros e importância económica estão associados a granitos Pan-Africanos (Lächelt, 2004).

4.5. Distribuição dos pegmatitos da província pegmatítica de Alto Ligonha

Os pegmatitos da Província Pegmatítica do Alto Ligonha distribuem-se por quatro zonas principais Lächelt (2004), que coincidem com as principais características estruturais da região, com excepção do cinturão Errego-Ribaué (Zona C, Fig 9). Estas zonas estão ainda subdivididas em vários campos pegmatíticos. Cada campo compreende um conjunto de grupos de pegmatitos, classificados de acordo com os tipos dominantes.

Zona	**Localização / Campos Pegmatíticos**	**Tipos de Pegmatitos**	**Minerais de Interesse**
A – Mocubela–Alto Ligonha	Cinturão de Cavalgamento de Namama. Inclui Mocubela (VI), Melela (VII), Alto Molocué (VIII) e a metade ocidental de Alto Ligonha (IX).	Sodalítico e potássico	Berilo, columbo-tantalite, espodumena, lepidolite, amblygonite, petalite, polucite
B – Mocuba–Mugeba e Munhiba	Em torno das margens da Klippe de Mugeba. Inclui Mugeba (V) e Mocuba (IV).	Potássicos	Berilo gemológico (água-marinha), columbo-tantalite, turmalina, minerais de terras raras
C – Cinturão Errego–Ribaué	Cinturão Errego–Ribaué	Potássicos	Xenotima, euxenite, allanite, minerais de terras raras, columbo-tantalite
D – Nampossa–Miricue e Namarripo–Namivo	Nampossa–Miricue e Namarripo–Namivo	Potássicos (predominantes) e sodalíticos (secundários)	Berilo, columbo-tantalite, minerais de terras raras

Tabela 1: Distribuição dos pegmatitos da província pegmatítica de Alto Ligonha

Legenda

Campos Pegmatíticos

Zonas pegmatíticas

Grupos pegmatíticos

Sodalítico

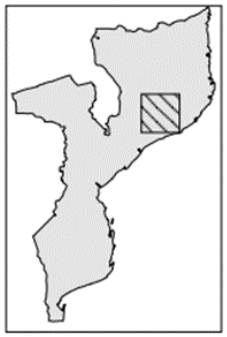
Potássico

Zonas pegmatíticas

A – Mocubela-Alto Ligonha
B - Mocuba-Mugeba e
C - Errego-Ribaue
D1 - Nampossa-Miricue
D2 - Namarripo-Namivo

Campos pegmatíticos

I – Ribaué II-Nauela III -
IV - Mocuba V - Mugeba
VII – Melela VIII –Alto
IX - IX - Alto Ligonha X –
XI - Naburi XII - Gilé



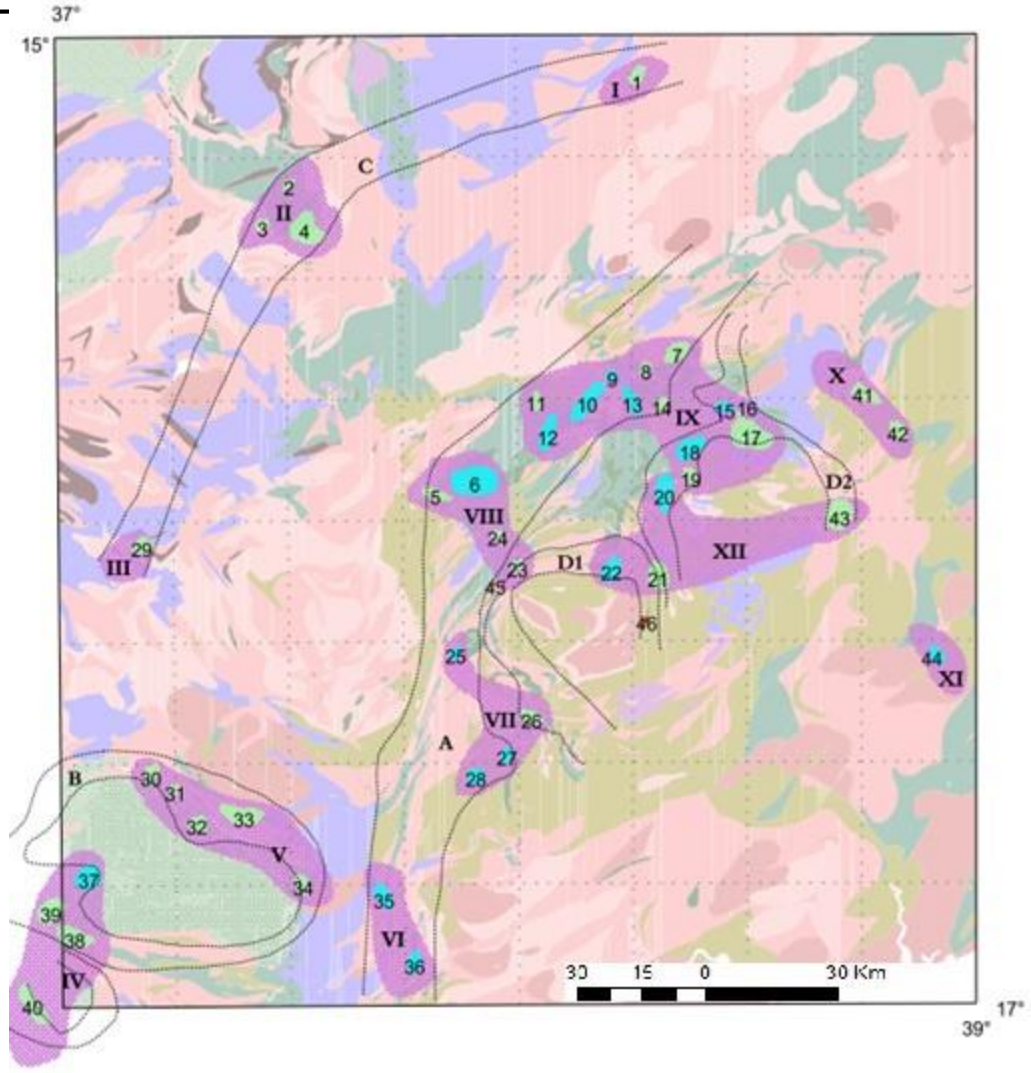


Figura 7: Mapa geológico com zonas pegmatíticas A-D. Fonte: Cronwrigth (2005)

Grupos pegmatíticos

1 - Boa Esperança
2 - Camua
3 -Guilherme
4 - Muetia
5 - Mutala
6 - Namacotche
7 - Naquisuppa B
8 - Tarupe
9 - Maridge
10 - Muhano
11 - Nuaparra
12 - Murropoce
13 - Muiane
14 - Ingela
15 - Piteia
16 - Nahia
17 - Mirrucue
18 - Merrapane
19 - Macula
20 - Nahora
21 - Nampoca
22 - Namivo
23 - Mecossa
24 - Namarella
25 - Morrua
26 - Namarripo
27 - Melela
28 - Marropino
29 - Ile
30 - Mugema
31 - Bere
32 - Minhote
33 - Maria
34 - Nigule
35 - Ginamo
36 - Ilodo
37 - Maolona
38 - Igaro
39 – Munhamade
40 - Munhiba
41 - Macotaia
42 – Mtomoti
43- Famalição
44- Naiume

4.6. Geologia local

O pegmatito de Morrua está encaixado no Grupo de Mólocuè que faz parte do Complexo de Nampula (Fig 8). O Complexo de Nampula compreende cinco (5) unidades principais de acordo com a litologia e idade (Fig 8). (i) a Suite de Mocuba (cerca de 1125 Ma), é composta por rochas meta-vulcânicas e plutónicas; (ii) o Gnaisse de Rapale (cerca de 1095 Ma), é formado por ortognaisses intrusivos; (iii) o Grupo de Molócuè (cerca de 1090 Ma), integra paragnaisses supracrustais e rochas metavulcânicas; (iv) a Suite de Culicui (cerca de 1070 Ma), é caracterizada por ortognaisses graníticos intrusivos, (v) e por fim o Gnaisses de Mamala (cerca de 1090Ma) leucocrático, constituido de quartzo-feldspático e localmente contém silimanite (Marcey et al. 2010; Fritz et al.,2013).

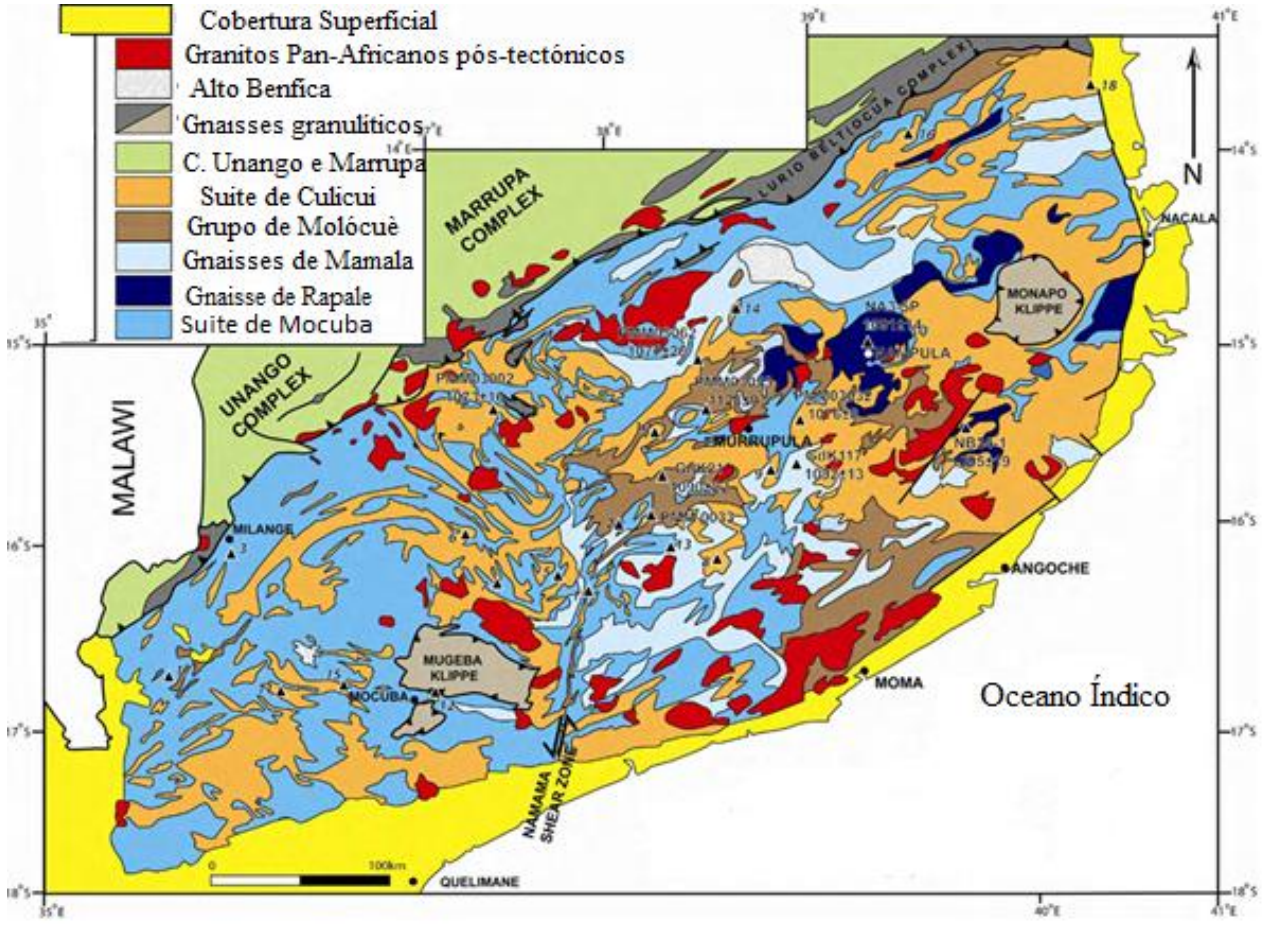


Figura 8: Mapa geológico de Nordeste de Moçambique, , mostrando de forma resumida, as principais unidades que compõem o Complexo de Nampula. A área sul do cinturão do Lúrio corresponde ao Complexo de Nampula. Fonte: (Marcey et al, 2010).

4.7. Grupo de Molocué

Estudos da Aquater nas décadas de 1970 e 1980 subdividiram o Grupo de Molócuè em várias formações, que, segundo os códigos litoestratigráficos modernos para rochas de médio a alto grau metamórfico (Folhas 1537 a 1540 e 1637 a 1639–40), passaram a ser classificadas como unidades litodémicas. A redução de escala e o carácter de reconhecimento da investigação também levou ao agrupamento de algumas formações antigas (Notícia Explicativa, 2006).

O Grupo de Molócuè apresenta uma grande diversidade litológica, incluindo rochas metavulcânicas félsicas e máficas, rochas metamórficas ultramáficas, gnaisses pelíticos e psamíticos, quartzitos, metacarbonatos e calcossilicatos, descritas a seguir (Notícia Explicativa, 2006):

4.7.1. Gnaisses Máficos e Ultramáficos (P2Nmam e P2NMug)

Comuns em todos os cinturões supracrustais, mas especialmente ao longo da zona de cisalhamento de Namama. Dominados por anfibolitos, incluem metagabros, gnaisses anfíbola-epidoto-piroxena-granada, de talcoxistos e xistos clorite, (Fig 9).

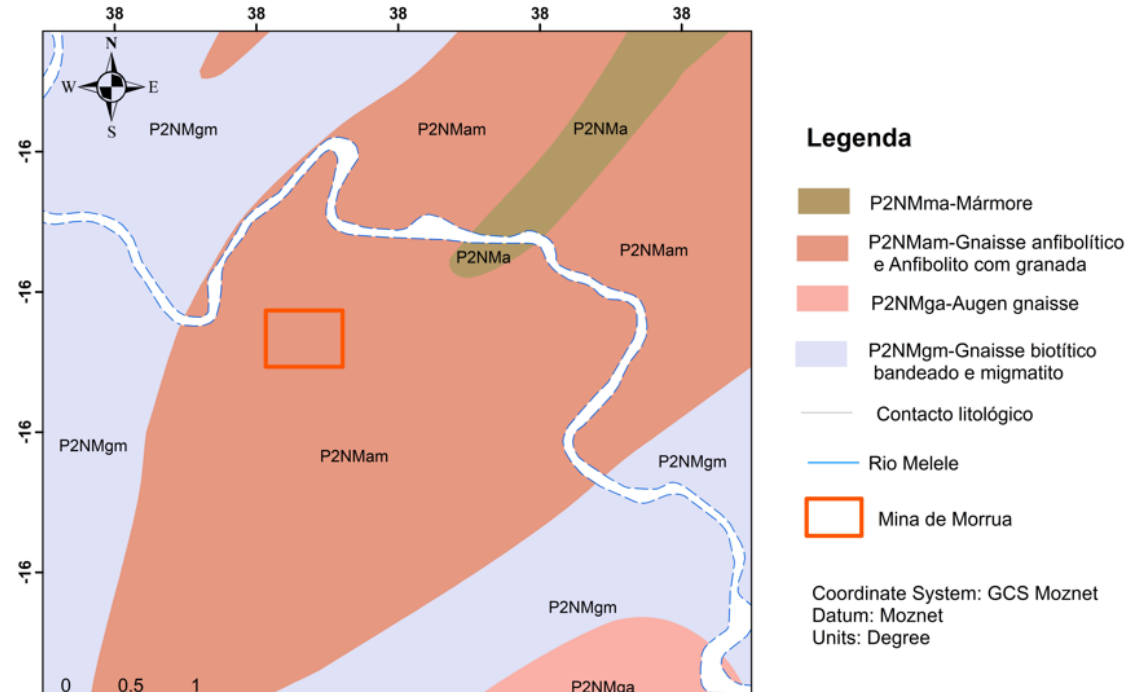


Figura 9: Mapa geológico, ilustrando as principais litologias da área de estudo

Os anfibolitos ocorrem em afloramentos pequenos e descontínuos, associados a gnaisses quartzo-feldspáticos e granulitos máficos.

É nesta litologia **P2Nmam e P2NMug** que se encontra hospedado o pegmatito da Mina de Morrua, onde veios pegmatíticos de quartzo podem apresentar-se paralelos ao bandamento, ambos deformados por múltiplos eventos tectónicos.

4.7.2. Quartzitos (P2NMsg)

Níveis de quartzito e quartzito ferruginoso formam camadas delgadas e descontínuas, raramente cartografáveis à escala de 1:250 000. As texturas variam de grão fino a grosso, e o mineral dominante é o quartzo (até 90 %), com granada, magnetite, moscovite e pequenas quantidades de anfíbola e feldspato.

4.7.3. Metacarbonatos e Rochas Calco-silicáticas (P2NM)

Calcários, dolomitos e margas metamorfizados são muito raros, aparecendo apenas como camadas esporádicas. Em Uape, observou-se gnaisse calco-silicático fortemente bandado, alternando bandas ricas em hornblenda-epidoto e bandas quartzo-feldspáticas (1–5 mm).

4.7.4. Metapsamíticos, Metapelíticos e Gnaisses Metavulcânicos (P2NMa)

Dominados por biotite gnaisses, que gradualmente passam a xistos de moscovite-biotite (metapsamitos e metapelitos) e gnaisses leucocráticos (metariolitos). A variação do grau metamórfico na Zona de Cisalhamento de Namama vai da fácies anfibolito até à fácies eclogito (granada–hornblenda–cianite–clinopiroxena). O biotite gnaisse apresenta granulação muito fina a média, foliação gnáissica a xistosa e lentes de quartzo hialinos lenticular.

4.8. O PEGMATITO DE MORRUA

O campo de pegmatitos de Melela, localizado em Morrua, constitui um dos mais importantes depósitos pegmatíticos de Moçambique. Entre 1957 e 1979, foram extraídas aproximadamente 1300 toneladas de concentrado de tantalite, além de 1900 toneladas de microlite, berilo e bismutite (Cronwright, 2005). A prospeção identificou seis pegmatitos com espessuras superiores a 3 metros, passíveis de seguimento ao longo de mais de 1 km de afloramento. Os recursos são estimados em 7,8 milhões de toneladas, com um teor médio de 463 g/t de Ta_2O_5 (Lachealt, 2004).

A mina de Morrua foi o maior produtor de minerais de nióbio-tântalo (Nb-Ta) em Moçambique durante 22 anos (1957–1979), tendo produzido cerca de 1900 toneladas de concentrado, das quais 1300 toneladas correspondiam a Ta_2O_5, conforme referenciado por Crownright (2005) em (Hunting, 1985). Também foi explorado a espodumena e variedades gemológicas de berilo. Actualmente, o depósito possui reservas significativas remanescentes de Ta-Nb e Li, tanto no corpo pegmatítico como nas escombreiras.

A Mina de Morrua é composta por múltiplos corpos pegmatíticos, com até 1000 m de comprimento e 600 m de largura, sendo explorados até uma profundidade de 100 m. Estes pegmatíticos estão hospedados em xistos anfibólicos e anfibolitos da Formação de Morrua (Lächelt, 2004), apresentando orientação NNE-NE e mergulhos suaves de 15 a 20°. Os pegmatitos, alojados em anfibolito, são atualmente alvo de mineração em larga escala para extração de tântalo e minerais de gema.

4.9. Zonamento mineralógico de Morrua

Segundo Lächelt (2004) a estrutura interna dos pegmatitos de Morrua é particularmente bem definida, exibindo zonas minerais distintas:

O núcleo de quartzo: Esta zona central está claramente desenvolvida, funcionando como o coração do corpo pegmatítico.

A zona de Lítio–Sódio: é rica em minerais de interesse económico. Seus principais componentes são a lepidolite (um mineral de lítio), a cleavelandite (uma variedade de albita), e a manganotantalite, que é uma fonte de tântalo.

Outros minerais importantes encontrados nesta zona incluem berilo verde, microlite amarela, polucite e cookeíte. Há também turmalina de grandes dimensões, minerais de bismuto (bismuto nativo e bismutite) e outros minerais como fluorapatite, ambligonite, rutilo, monazite e minerais de argila.

A zona marginal: Esta camada externa consiste principalmente em feldspato gráfico, muscovite e granada.

4.10. Classificação do Pegmatito da Mina de Morrua

Segundo Savino (1980) citado por Lächelt (2004) e Huting (1985), classificaram a Mina de Morrua, distinguindo cinco tipos específicos de pegmatitos:

- Pegmatito de microclina: Um tipo constituído por um e único mineral.
- Pegmatito de albite–microclina com 5–10% de espodumena: Este tipo introduz um potencial significativo de lítio devido ao seu teor de espodumena.
- Pegmatito de microclina–albite (cleavelandite) com 5% de lepidolite, espodumena e raramente polucite: Isto sugere uma composição mais evoluída, incorporando minerais de lítio e césio ocasionais.
- Pegmatito de espodumena–cleavelandite com polucite: Este tipo destaca a presença de mineralização de lítio, tântalo e césio, indicando um sistema altamente fracionado.
- Pegmatito de albite não totalmente desenvolvido com cleavelandite, ocasionalmente acompanhado por espodumena e lepidolite: Estes são frequentemente encontrados em veios pegmatíticos mais finos, tipicamente com menos de 2 metros de espessura, sugerindo que representam uma fase de cristalização menos extensa ou talvez mais inicial.

Os pegmatitos do tipo espodumena–cleavelandite com polucite, são os mais mineralizados em relação ao tântalo e ao lítio e representam os mais fracionados da Mina. Os pegmatitos do tipo microclina, sem fase sodalítica, são os menos fracionados da Mina, com os teores mais baixos de tântalo e nióbio.

4.11. Classificação de pegmatitos do Alto Ligonha

Os pegmatitos desta região são classificados de acordo com a sua composição e estrutura interna, que também fornece uma indicação do grau de fracionamento e do potencial económico do pegmatito. São reconhecidos dois tipos de pegmatitos com base na sua estrutura interna, ou seja, pegmatitos homogéneos com uma mineralogia simples, pertencentes ao grupo de corpos em forma de veios e lentes, e aqueles com uma estrutura interna complexa, mas variavelmente desenvolvida Lächelt (2004).

4.11.1. Classificação segundo a composição mineral

Marques (1989, citado por Lächelt, 2005) menciona a divisão dos jazigos pegmatíticos nesta região Norte de Moçambique, em 4 tipos segundo a composição mineral:

- Pegmatitos sódicos (também designados "sodalíticos" devido à ocorrência de plagioclase e minerais de lítio nestas rochas), que são geralmente bem zonados e contêm berilo, minerais do grupo da columbite (CGM), microlite, turmalina, lepidolite, espodumena, amblygonite e uma variedade de minerais acessórios. Estes pegmatitos constituem o grupo mais importante e ocorrem principalmente em xistos anfibólicos, anfibolitos e xistos micáceos. São aos tipos complexos espodumena e lepidolite–albite–espodumena da família LCT de Černý (1991);
- Pegmatitos potássicos, com berilo e minerais do grupo da columbite (CGM), pequenas quantidades de euxenite, monazite, ilmenite e bismutite; a ocorrência destes pegmatitos não está restrita a litologias específicas de encaixe;
- Pegmatitos potássicos com minerais metamictos de U, Th e elementos terras raras (REE). Estas rochas são equivalentes ao tipo de terras raras e mostram atributos de ambas as famílias LCT e NYF (nióbio-ítrio-flúor).
- Pegmatitos heterogéneos com amazonite e com turmalina na região de Monapo.

Os pegmatitos sodalíticos são os mais fracionados e economicamente mais importantes da região com concentrações importantes de columbo-tantalite, berilo e lítio e incluem de ocorrência de grandes pegmatitos tais como Muiane, Naipa, Morrua e Marropino. Enquanto os pegmatitos potássicos, menos fracionados, são pouco mineralizados com respeito a estes elementos (columbo-tantalite, berilo e lítio), mas são potenciais fontes de minerais de terras raras, feldspato, mica, berilo e caulino, a este grupo pertencem Nuaparra, Mugeba, Igaro (Cronwright, 2005; Macuácua, 2010).

4.11.2. Classificação segundo a morfologia

Do ponto de vista morfológico, os pegmatitos desta região podem ser divididos em três tipos, segundo Lachealt (2005):

- Corpos de forma lenticular, os quais alcançam na superfície áreas até de 1 km^2 (Munhamo, Morrua), têm na maioria dos casos inclinação de 20° e a possança até de 50 m, sendo todos discordantes;
- Diques com grandes inclinações de 40-80°, 100-1200 m de comprimento, com a possança de 5-60 m. Na maioria dos casos são discordantes. Como exemplo podem servir os jazigos de Moneia, Murropoce, Merrapane, Nauro.
- Corpos de tipo complexo, os quais são a combinação de ambos os tipos precedentes. A maioria dos jazigos até agora explorados pertencem a este tipo (Muiane, Naipa, Marige, Nuaparra, Merrapane, Namora, Insule, Namacotche, etc).

CAPÍTULO 5

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. Petrografia

Este capítulo descreve as rochas de estudo com base em observações macro e microscópicas. As amostras foram colhidas na Mina de tantalite de Morrua, para o estudo petrográfico o candidato participou da preparação de sete (7) lâminas delgadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia (UEM).

O estudo petrográfico foi feito com uso do microscópio de luz polarizada, as microfotografias foram tiradas com o Microscópio óptico (Fig 10) o qual esta acoplado o software denominado Olympus Stream. O estudo detalhado das rochas é feito utilizando lâminas delgadas, que fornecem informações cruciais sobre suas características, como minerais principais e secundários.

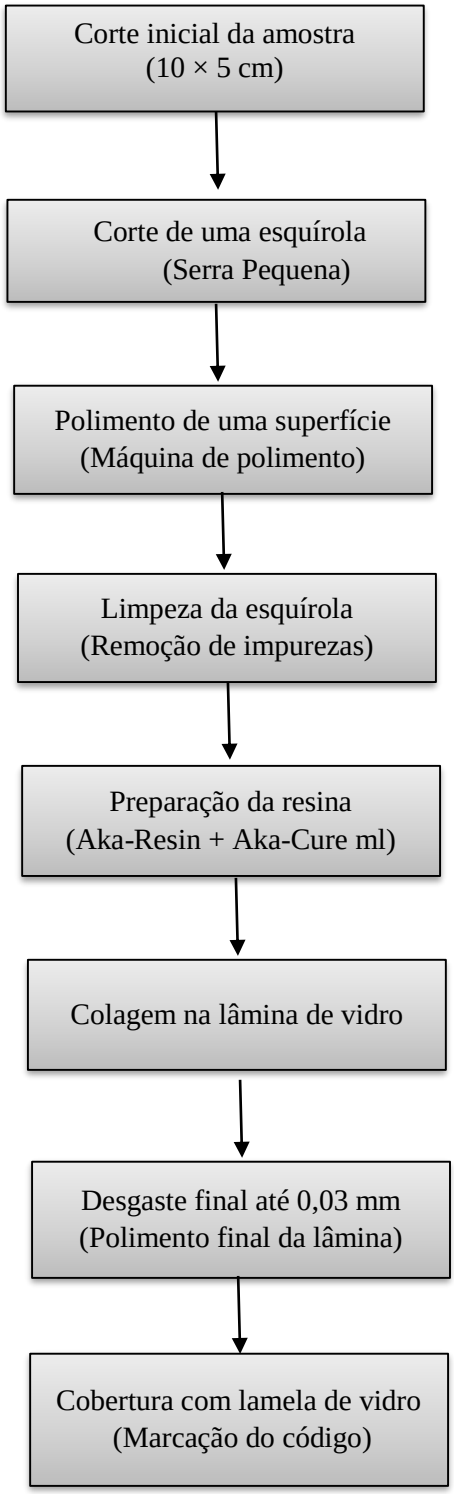


Figura 10: Microscópio Óptico do laboratório de microscopia

5.2. Preparação das Lâminas Delegadas

O processo de preparação das lâminas delgadas ou petrográficas consistiu em uma série de etapas sistemáticas executadas de modo manual auxiliadas pontualmente pelos equipamentos. Abaixo segue-se resumidamente as principais etapas levadas acabo para a preparação das lâminas delgadas.

5.2.1. Fluxograma do Processo de Preparação das Lâminas Delgadas



5.3. Características litológica do pegmatito de Morrua

Neste estudo foram analisadas sete amostras das quais quatro (4) foram classificadas como pegmatitos (HM-01, HM-02, HM-517 e HM-518) e três como anfibolitos (HM-03, HM-04 e HM-519).

As rochas encaixantes deste depósito pertencem ao Grupo de Molócué. São litologias metamórficas variadas, incluindo anfibolito, gnaisse de biotite–hornblenda–plagioclase, xistos cloríticos e actinolíticos subordinados, e pontualmente quartzito, Lächelt (2004). Esta associação mineralógica indica que o pegmatito se instalou num terreno metamórfico de médio a alto grau, compatível com condições da fácies anfibolito a fácies xisto verde.

A partir das análises de amostras de mão, o pegmatito da mina de Morrua revela características morfológicas e texturais distintivas. Predominantemente tabular, este pegmatito apresenta cristais com uma granulometria grosseira a muito grosseira, variando entre 5 a 10 cm de comprimento, típico de texturas pegmatíticas.

A sua associação mineralógica é dominada por silicatos, com a presença marcante de espodumena, lepidolite, feldspato (microclina e plagioclase) e quartzo. A ocorrência de minerais de lítio, nomeadamente a lepidolite (mica de cor lilás) e a espodumena, é um indicador crucial da natureza LCT (lítio-césio-tântalo) deste pegmatito, conferindo-lhe um interesse económico particular. A seguir, detalha-se esta descrição com observações macroscópicas e microscópicas.

5.4. Pegmatito HM-517

Este pegmatito em amostra de mão (Fig. 11A) é constituído por espodumena (Spd), lepidolite (Lpd), feldspato potássico (Kfs) e quartzo (Qz) com um tamanho que varia de 2,5-5 cm de comprimento, a coloração alaranjada é derivda da meteorização do feldspato e lepidolite.

Em análise microscópica as microfotografias C e D (Fig 11), mostram cristais de espodumena prismáticos, bem definidos, com tamanho que variam de 2 a 6 mm, indicando cristalização lenta. A plagioclase aparece em cristais subédrico, com tamanho médio entre 1 a 3 mm, orientados e frequentemente intercrescidos com a espodumena.

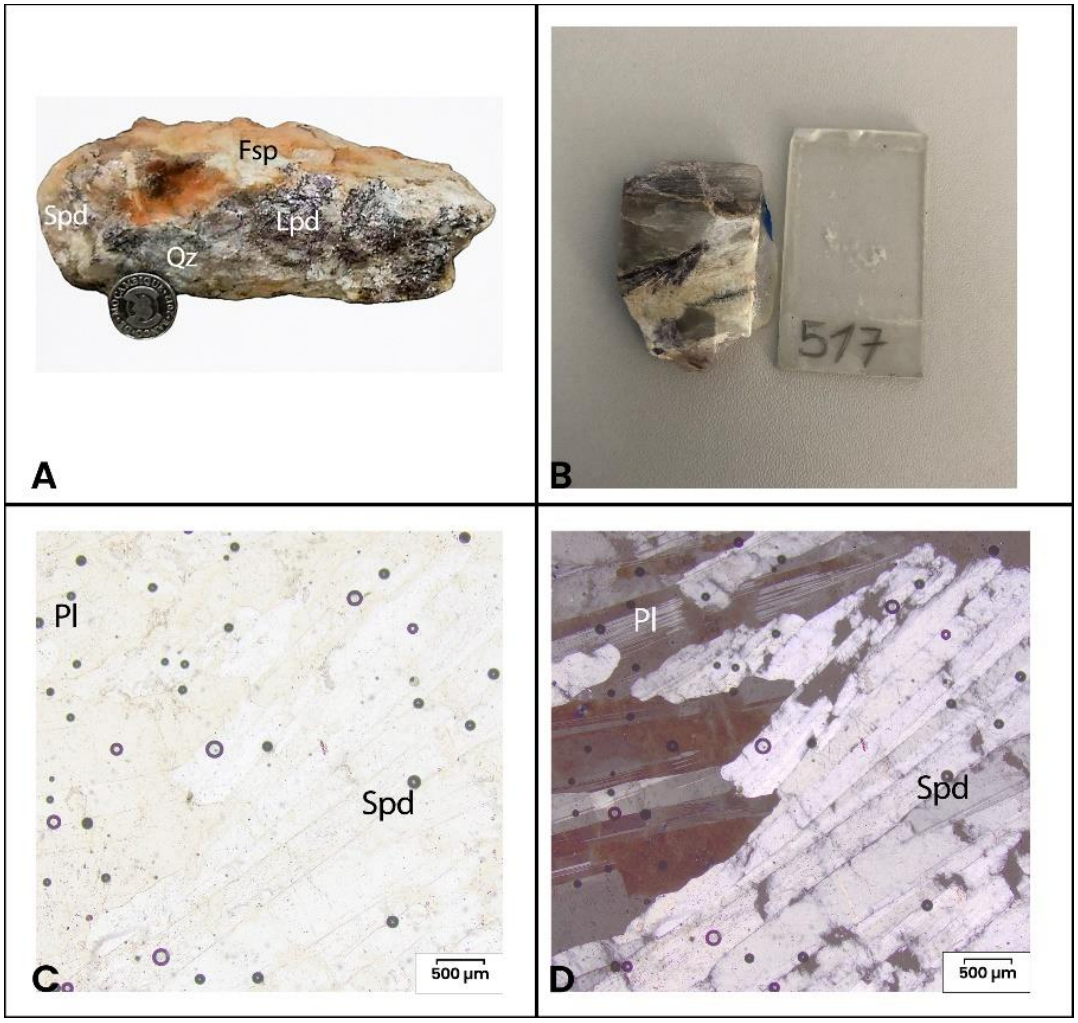


Figura 11: Fotografia do pegmatito HM-517-A)- amostra de mão. B) - Esquírola e lâmina delgada. C) - Espodumena (Spd) a nicois paralelos (NP). D) - A mesma microfotografia mostrando cristais alongados e prismáticos de espodumena com tons claros, plagioclase observada sobre um ângulo de extinção a nicóis cruzados (NC). Microclina-Mcl; Espodumena-Spd; Quartzo-Qz; Feldspato-Fsp, lepidolite-Lpd.

5.5. Pegmatito HM-01

Com base nas observações de amostra de mão (Fig. 12A) constata-se que, este pegmatito é constituído essencialmente por feldspato potássico, a coloração alaranjada indica uma meteorização do mesmo.

Em análise microscópica as microfotografias C e D (Fig. 12) revelam uma textura dominada por plagioclase de cor acastanhada a cinza, com hábito tabular ou prismático, que ocorre em formas

preferencialmente euédrica. Há ainda uma plagioclase tardia de relevo alto. Este pegmatito HM-01 é classificado como pegmatito do tipo Albite, o que é coerente com a classificação de pegmatitos proposta por Hutting (1985).

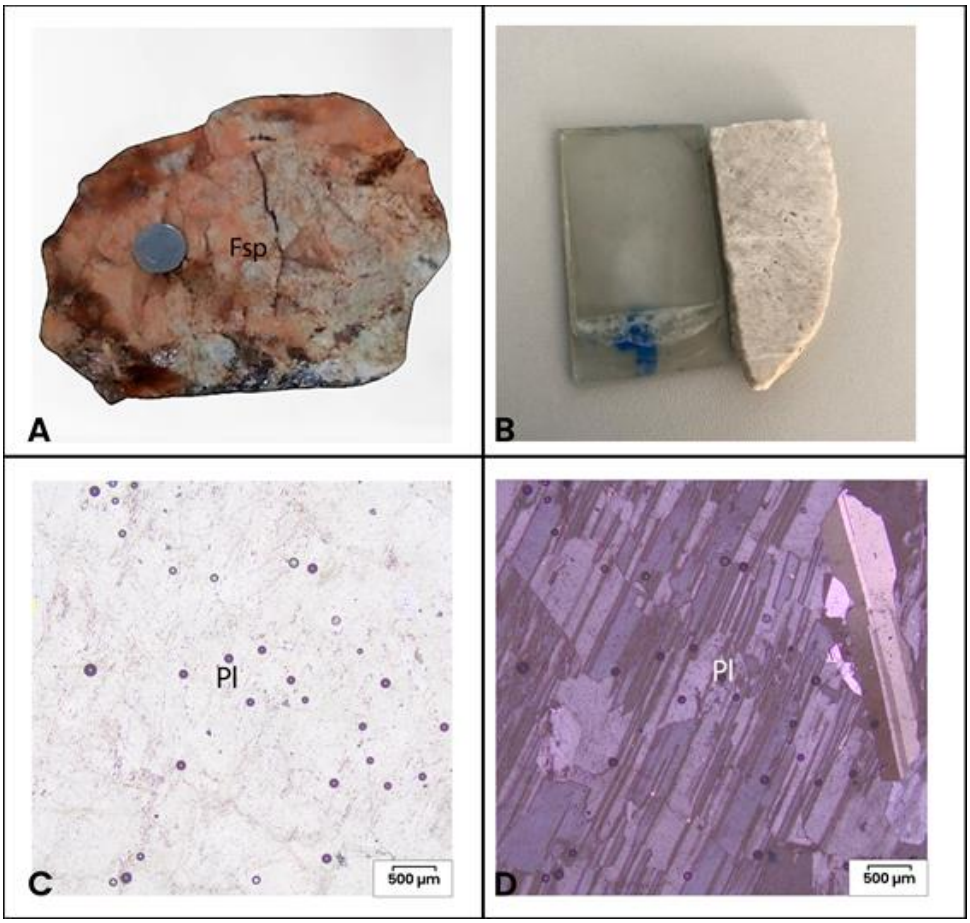


Figura 12: Fotografia do pegmatito HM-01. A) - Amostra de mão. B) - Esquírola e lâmina delgada. C) - Plagioclase a nicóis paralelos (NP). D) - A mesma microfotografia de plagioclase a nicóis cruzados (NC), Pl-Plagioclase e Fsp-feldspato.

5.6. Pegmatito HM-02

Com base nas observações de amostra de mão (Fig 13A) constata-se que, este pegmatito é constituído por feldspato (microclina) como mineral dominante. A presença de manchas escuras e zonas esbranquiçadas alteradas sugere que o feldspato sofreu alteração hidrotermal ou meteórica.

Em análise microscópica C e D (Fig 13 C e D) a microclina ocorre em cristais xenomórficos, em forma tabular e encontra-se preenchendo toda a lâmina. Apresenta maclas tipo " tartan " típicas do feldspato potássico. A sua presença dominante indica cristalização tardia em ambiente rico em potássio, numa zona menos diferenciada do pegmatito. Este pegmatito é classificado como pegmatito do tipo microclina, o que corrobora Hutting (1985).

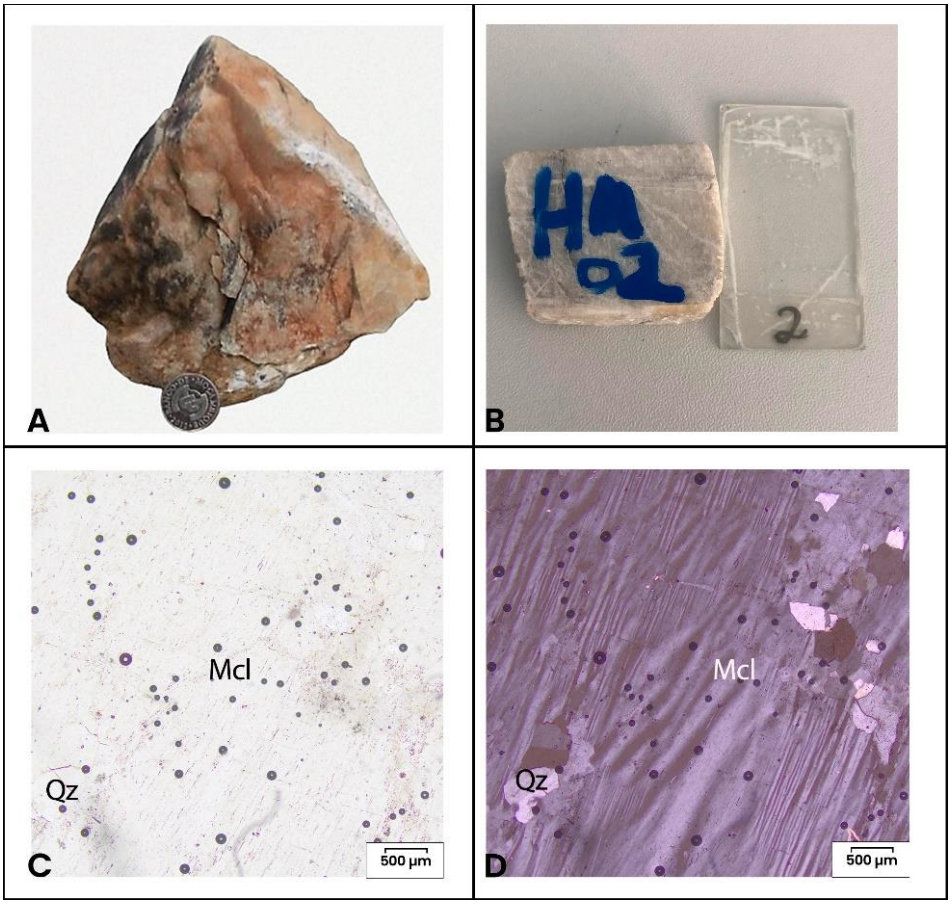


Figura 13: Fotografia do pegmatito HM-02-A) - Amostra de mão. B) - Esquírola e lâmina delgada; C) - Microfotografia da microclina a nicóis paralelos (NP); D) - A mesma microfotografia a nicóis cruzados (NC), Mcl-microclina e Qz-quartzo.

5.7. Pegmatito HM-518

Com base nas observações da amostra de mão (Fig 14A) constatou-se que, este pegmatito é constituído por lepidolite (Lpd) com cores violetas, espodumena (Spd), quartzo (Qz) e feldspato (Kfs), esses minerais se encontram bem desenvolvidos e preservados, com uma granulometria que varia de média a grosseira (2-5cm).

A análise microscópica (figura 14) também revelou que este pegmatito é dominado por microclina, lepidolite, plagioclase e espodumena. Complementarmente, a análise por difração de raios-X (DRX) ofereceram uma quantificação precisa de sua mineralogia: os minerais principais são albite (65,1%) e quartzo (27,9%), enquanto microclina (3,6%), muscovite (3,2%), tantalite (0,1%) e vermiculite (0,1%) são identificados como minerais secundários.

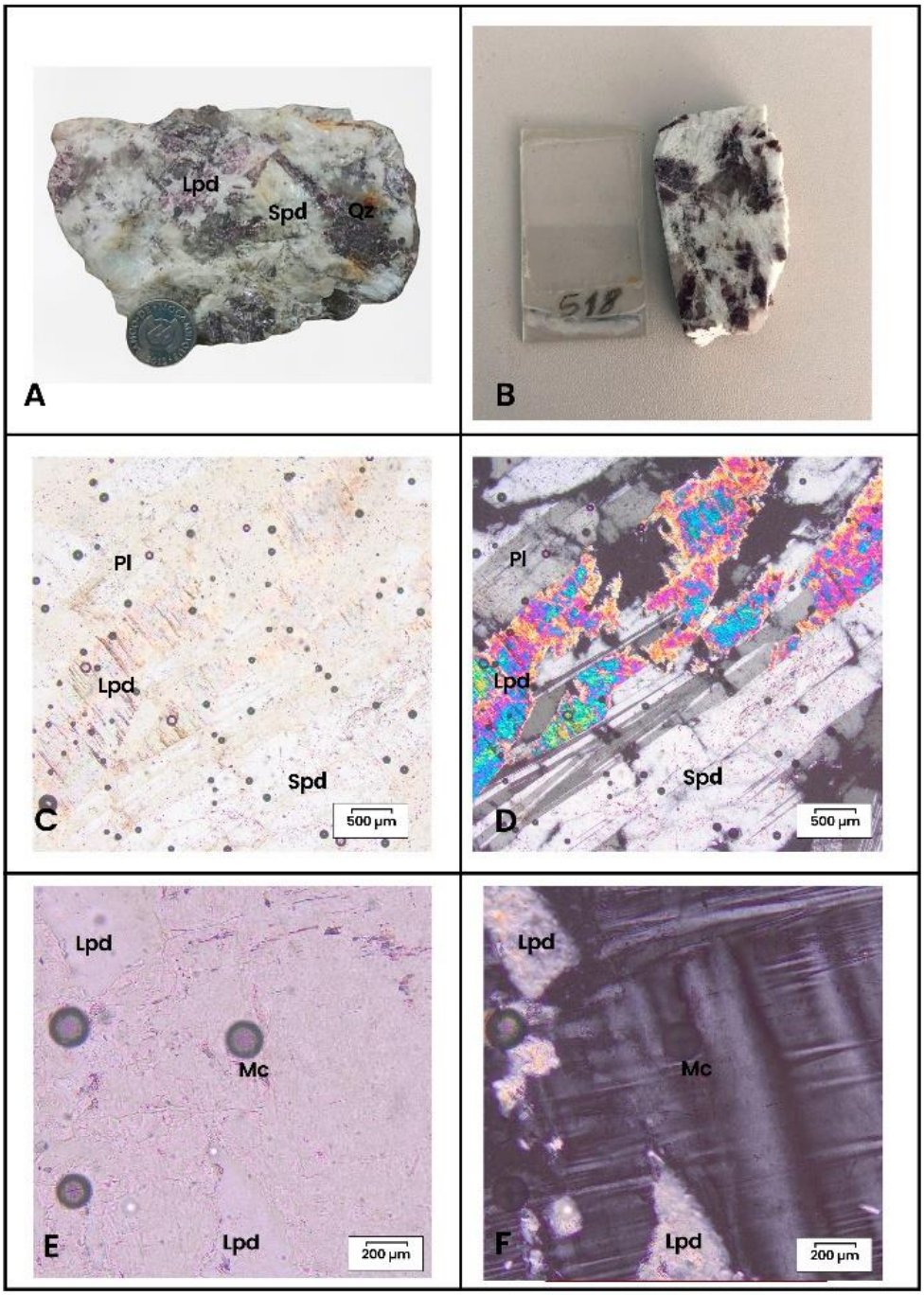


Figura 14: Fotografia do pegmatito HM-518-A- Amostra de mão destacando-se a lepidolite espodumena, quartzo (Qz). B- Esquírola e lâmina delgada. C- microfotografia a nicóis paralelos (NP) mostrando lepidolite (Lpd), espodumena (Spd) e plagioclase (Pl). D- a mesma imagem a nicóis cruzados (NC). F- Microfotografia de detalhe de microclina (Mc) com macla do tipo tartan e lepidolite com uma extinção mosqueada.

5.8. Anfibolito HM-519

Em amostra de mão este anfibolito (Fig 15-A) apresenta uma coloração verde escura, a coloração alaranjada sugere oxidação dos minerais ferro-magnesianos. Esta amostra não apresenta foliação. A análise petrografica (Fig 15 C e D) revelou que este anfibolito é composto principalmente por actinolite, plagioclase, como acessórios ocorre epídoto, zoisite, esfena ou titanite, biotite, e exibe uma textura predominantemente nematoblástica.

A actinolite é dominante neste anfibolito, apresenta-se como cristais prismáticos alongados. Este mineral constitui cerca de 60-70% da composição modal deste anfibolito, sendo responsável pela textura preferencialmente nematoblástica. A plagioclase ocorre frequentemente alterada para epídoto como cristais subédricos a anédricos, intercrescidos com a actinolite. A maioria dos minerais acessórios ocorrem em forma de pequenas inclusões na actinolite.

O epídoto ocorre como cristais anédricos pequenos a médios, frequentemente associados às zonas de alteração da plagioclase. A esfena (Fig 15C) apresenta-se como grãos subédricos de alta birrefringência. A zoisite ocorre como cristais incolores a levemente azulados, associada ao epídoto em zonas de alteração. A biotite (Fig 15D) apresenta-se como cristais tabulares com pleocroísmo marrom a verde-marrom característico.

A partir da descrição petrográfica, foi possível estimar a composição modal deste anfibolito, é composto por 60-70% de actinolite, 15-10% de plagioclase, 5% de epídoto, 3% de esfena, 1% de zoisite e 1% da biotite.

A principal associação mineral consiste de: Actinolite + Plagioclase + Epídoto. A associação mineral descrita permite atribuir condições de metamorfismo regional de baixo grau, na fácies xisto verde, ao anfibolito estudado, e este por sua vez classifica-se como anfibolito actinolítico.

Este anfibolito (Fig 15) exibe evidências claras de alteração hidrotermal, a nível mineralógico (epídoto, zoisite) e (alterações da biotite e da actinolite). Trata-se, muito provavelmente, de uma alteração retrógrada induzida por fluidos hidrotermais, que afectou uma rocha inicialmente formada sob condições metamórficas de baixo a médio grau.

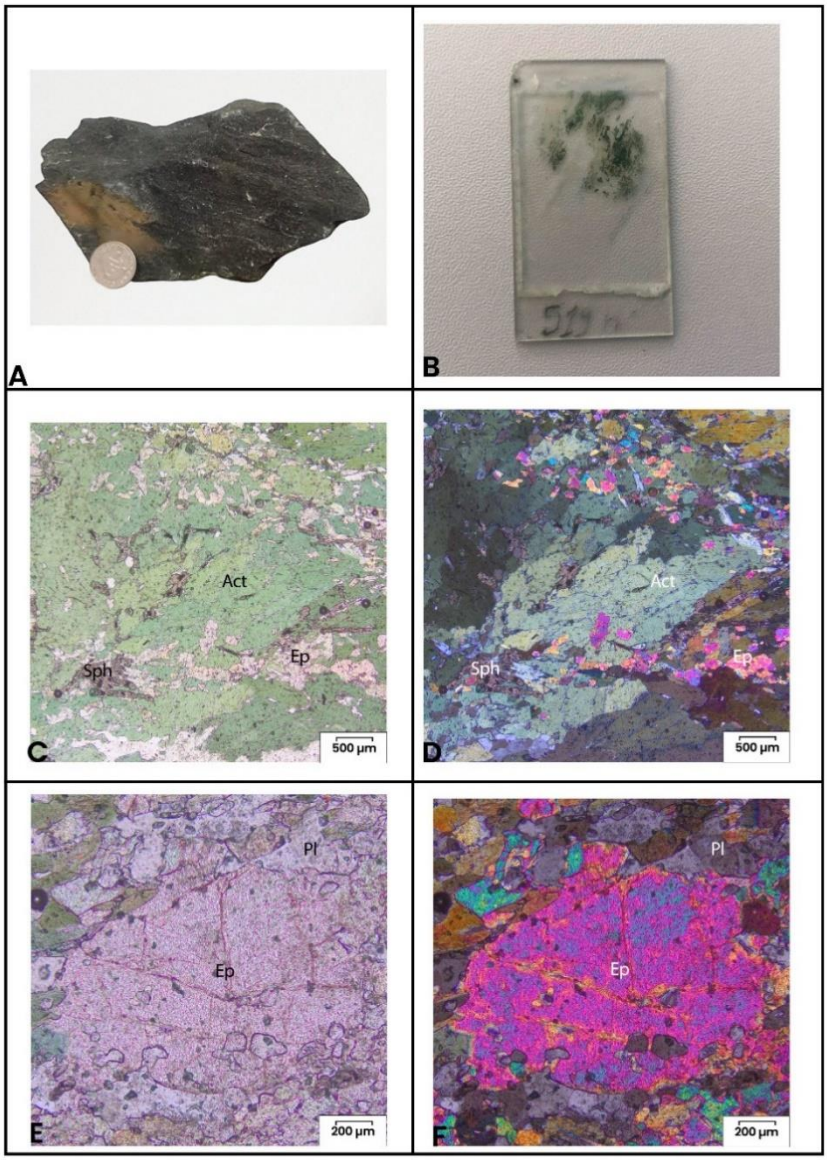


Figura 15: A) - Amostra de mão do anfibolito HM-519. B) - Lâmina delgada. C) - Aspecto geral do anfibolito evidenciando a textura lepidoblástica. D) - A mesma microfotografia a nicóis cruzados (NC). E- Microfotografia a nicóis paralelos (NP), F- Plagioclase alterado alterado por processo de saussuritização. Act-actinolite; Ep-epidoto; Sph-esfena (titanite); Pl-Plagioclase.

5.9. Anfibolito HM-04

Em amostra de mão este anfibolito HM-04 (Fig 16A) apresenta coloração verde-escura, e tem textura ligeiramente foliada. Possui manchas alaranjadas dispersas, sugerindo processos de alteração ou oxidação de minerais máficos (óxidos de magnésio). O aspecto geral é compacto com partes claras que estão dispersas por toda a rocha sugerindo zonas enriquecidas por minerais ricos em sílica.

A análise microscópica (Fig 16 C e D) revelou que este anfibolito exibe textura granoblástica e é composto principalmente por hornblenda e plagioclase tem como minerais acessórios o quartzo, epídoto, esfena, e calcite.

A hornblenda e plagioclase são os mais abundantes neste anfibolito. A hornblenda ocorre em cristais de forma anédrica e encontra-se frequentemente orientada indicando foliação. A plagioclase aparece na forma de cristais subédricos, em algumas partes da lâmina tende a alterar-se para o epídoto.

O epídoto ocorre em cristais anédricos, frequentemente associados a zonas de alteração de plagioclase, o quartzo apresenta-se em grãos subédricos e intersticiais, a esfena (titanite) apresenta formas anédricas e em algumas partes da lâmina tende a alterar-se para formar os minerais opacos.

Com base nos resultados obtidos a partir da difração dos raios-X (XR-D) este anfibolito tem as seguintes composições modais: Hbl 66.3%, An 25.8%, Qtz 7.1% e Magnesite 0.8%.

Figura 16: A) - Amostra de mão do anfibolito HM-519. B) - Lâmina delgada. C) - Aspecto geral do anfibolito evidenciando a textura lepidoblástica. D) - A mesma microfotografia a nicóis cruzados (NC). E- Microfotografia a nicóis paralels (NP), F- Plagioclase alterado alterado por processo de saussuritização. Act-actinolite; Ep-epidoto; Sph-esfena (titanite); Pl-Plagioclase.

Com base no estudo petrográfico a associação de equilíbrio típica para o anfibolito estudado pode ser descrita da seguinte: hornblenda + plagioclase + epídoto + quartzo. De acordo com as composições modais esta rocha é classificada como anfibolito hornblêndico formado sob condições de metamorfismo de médio grau (fácies anfibolito).

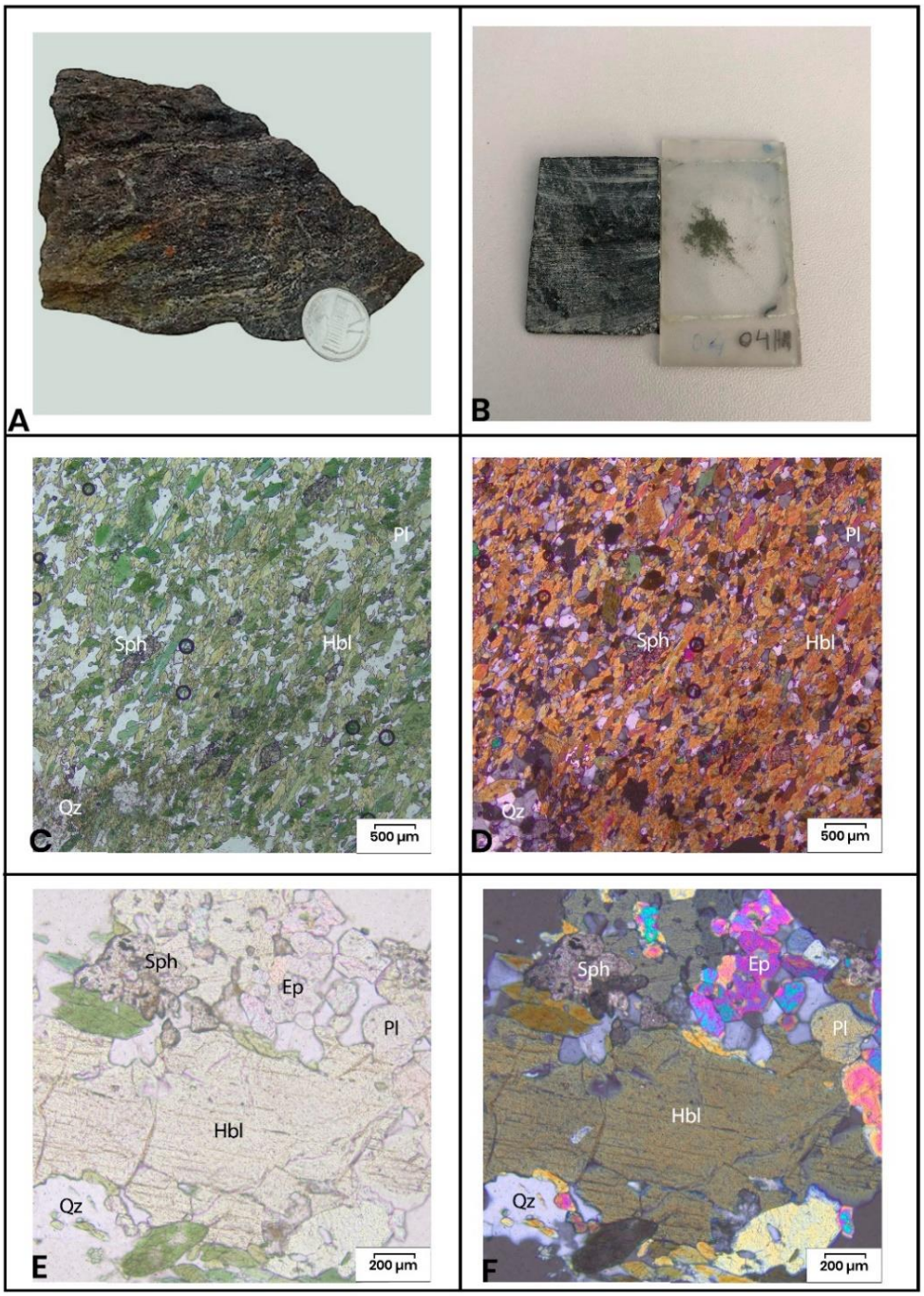


Figura 17: A- Amostra de mão do anfibolito HM-04. B- Lâmina delgada e esquírola. C- aspecto geral do anfibolito a nicóis paralelos (NP). D- A mesma microfotografia a nicóis cruzados (NC). E- microfotografia a nicóis paralelos (NP), F- A mesma imagem a nicóis cruzados (NC). Ep-epidoto; Sph-esfena (titanite); Pl-Plagioclase. Hbl-hornblenda e Qz-Quartzo.

5.10. Anfibolito HM-03

Em amostra de mão este anfibolito apresenta coloração verde-escura (Fig 17A), encontra-se superficialmente meteorizada, possui manchas alaranjadas dispersas, sugerindo processos de alteração ou oxidação de minerais máficos (óxidos de magnésio ou ilmenite)

A análise microscópica (Fig 17C e D) revelou que este anfibolito exibe textura predominantemente granoblástica, sendo constituído principalmente por hornblenda e plagioclase e tem como minerais acessórios esfena (titanite), epídoto, quartzo e minerais opacos.

A hornblenda constitui o principal mineral da matriz, formando agregados alongados que se dispõem segundo uma foliação metamórfica bem marcada (Fig 17 C e E). Representa cerca de 50 a 60% da composição modal da rocha, ocorrendo sob a forma de cristais subédricos a euédricos. A plagioclase, por sua vez, distribui-se de forma irregular entre os cristais de hornblenda, apresentando-se sob formas subédricas a xenomórficas e correspondendo a cerca de 20 a 25% da rocha. Por vezes, os cristais de plagioclase mostram sinais de substituição por epídoto, indicando processos de alteração posteriores à cristalização principal.

A esfena ocorre exclusivamente sob forma xenomórfica, presente como inclusões nos cristais de hornblenda, com uma proporção modal inferior a 2%. Minerais opacos, provavelmente magnetite ou ilmenite, distribuem-se de forma dispersa por toda a lâmina, apresentando-se em formas anédricas e representando menos de 5% do volume total da rocha. O quartzo, com abundância estimada entre 5 a 10%, ocorre sob a forma de cristais anédricos, ocupando os espaços intersticiais entre os minerais principais. O epídoto forma agregados anédricos, frequentemente associados a zonas de alteração da plagioclase, e corresponde a cerca de 3 a 5% da composição modal.

A associação de equilíbrio característica deste anfibolito é composta por hornblenda + plagioclase + quartzo + epídoto. A paragénese identificada, aliada às evidências texturais, indica que se trata de um anfibolito hornblêndico formado sob condições típicas de metamorfismo de médio grau, enquadrando-se na fácies dos anfibolitos. Esta interpretação está em consonância com Marcey et al (2010).

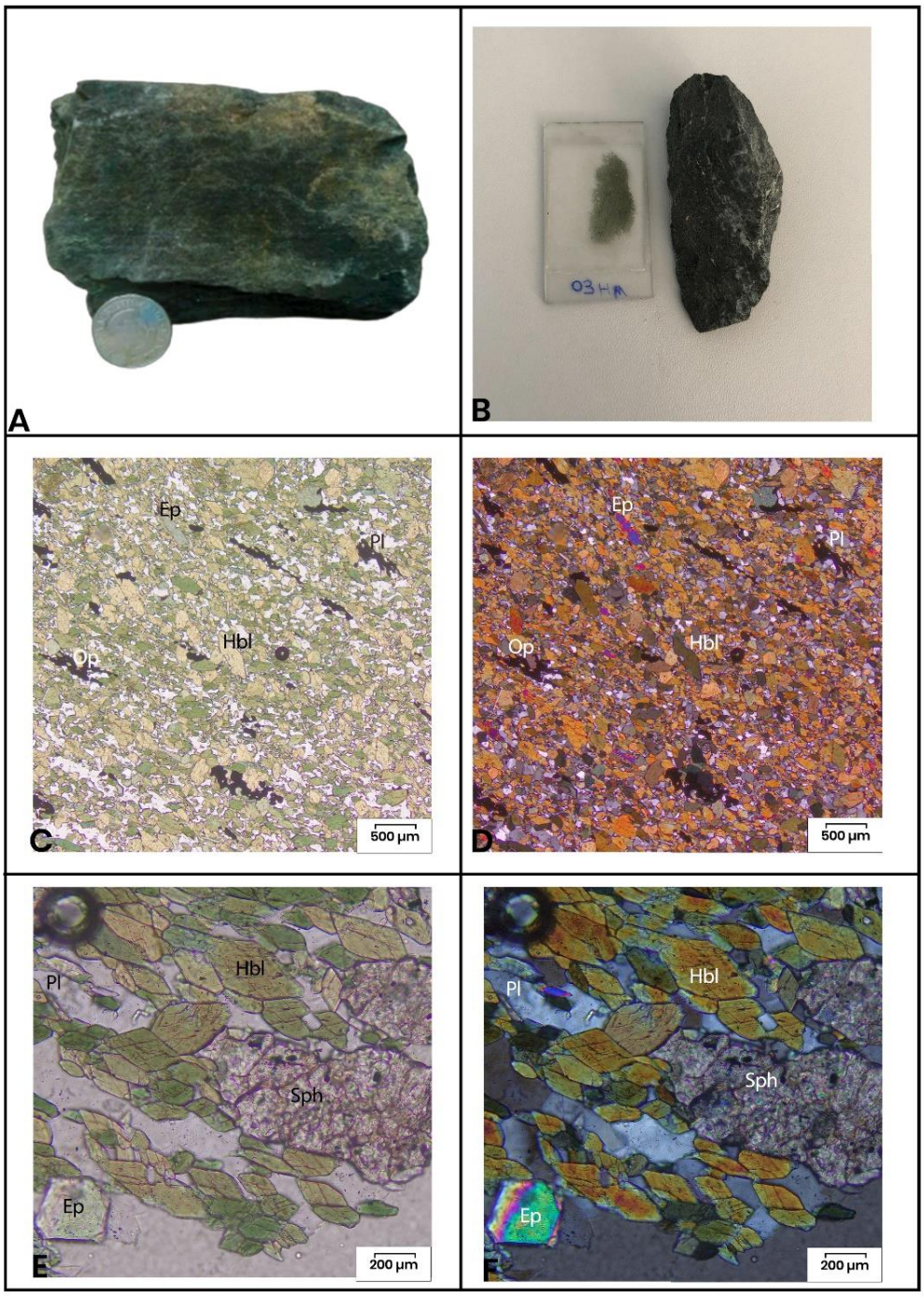


Figura 18: A- Amostra de mão do anfibolito HM-03. B- Lâmina delgada e esquírola. C- aspecto geral do anfibolito evidenciando a textura granoblástica a nicóis paralelos (NP). D- A mesma microfotografia a nicóis cruzados (NC). E- Microfotografia a nicóis paralelos (NP), F- Cristais de hornblenda exibindo uma foliação. Hbl-hornblenda; Ep-epidoto; Sph-esfena (titanite); Pl-Plagioclase; Op-minerais opacos.

CAPÍTULO 6

6. Geoquímica de Rocha total e Mineral

O estudo geoquímico foi realizado com o objectivo de complementar a caracterização das rochas da Mina de Morrua, recorrendo a duas técnicas analíticas. A Fluorescência de Raios X (XRF) foi aplicada a sete amostras (quatro pegmatitos e três anfibolitos) no laboratório de geologia da UEM, para determinar os elementos maiores. A Difracção de Raios X (XRD) foi realizada em três amostras (duas de pegmatitos e uma de anfibolito) no laboratório do INAMI (Instituto nacional de minas), e no laboratório de geologia da UEM (duas amostras de pegmatito) permitindo assim identificação precisa dos minerais presentes.

6.1. Análise por XRF

A análise elementar foi realizada com um espectrómetro portátil de Fluorescência de Raios X da marca Olympus Vanta. As amostras, previamente pulverizadas e homogeneizadas, foram moídas manualmente em almofariz de ágata até obtenção de uma granulometria fina $\leq 10\ \mu m$. A análise foi realizada directamente sobre o pó, acondicionado em suportes plásticos próprios. Usou-se a acetona para a limpeza dos recipientes e porta-amostras, garantindo a remoção de impurezas e gorduras que pudessem interferir na leitura. A calibração foi assegurada através de padrões internos do equipamento e materiais de referência certificados.

Materiais e reagentes necessários

- XRF (Olympus Vanta) - análise elementar;
- Almofariz de ágata ou moinho de bolas: para pulverizar a amostra;
- Espátulas de aço inox: para manuseio das amostras;
- Peneiras p500 (malha fina): para garantir a uniformidade do pó;
- Álcool ou acetona: remoção de impurezas e gorduras;
- Luva e pincel: para limpeza e manipulação do porta-amostra;
- Ar comprimido ou escova de limpeza: para remover resíduos do porta-amostras;
- Máscaras FFP (Filtering Facepiece): para proteção contra poeiras finas;

.

A Fluorescência de Raios X (XRF) baseia-se na excitação dos átomos de uma amostra por radiação de raios X. Quando essa radiação remove elétrons das camadas internas dos átomos, o retorno ao

estado estável resulta na emissão de raios X secundários (fluorescentes), com energias características de cada elemento químico. O equipamento detecta essas energias específicas, permitindo identificar e quantificar os elementos presentes na amostra.

Assim, a técnica de XRF permitiu determinar os teores de óxidos maiores e de elementos traço nas amostras analisadas. Estes resultados foram fundamentais para a interpretação da génese, evolução e classificação das rochas, nomeadamente os pegmatitos e os anfibolitos. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos por esta técnica.

6.2. Elementos maiores das amostras de pegmatitos e anfibolitos

Os resultados iniciais da análise dos elementos maiores nas amostras fornecem uma compreensão fundamental da sua composição química.

Tabela 2: Composição química média em elementos maiores, em % peso, das amostras de Morrua. Fluorescência de Raios X (LG-UEM).

	Pegmatitos				**Anfibolitos**		
(%)	**HM518**	**HM517**	**HM02**	**HM01**	**HM03**	**HM04**	**HM519**
MgO	ND	ND	ND	ND	4.24	5.61	5.62
Al2O3	29.01	33.12	32.22	26.02	21.32	20.04	18.66
SiO2	69.45	66.34	67.08	71.89	36.89	38.00	38.30
P2O5	ND	0.63	0.20	ND	0.36	0.39	0.36
CaO	0.15	0.42	0.79	0.50	8.11	8.38	8.09
TiO2	ND	ND	0.10	0.12	1.92	1.94	1.00
MnO	0.17	0.18	0.04	0.14	0.12	0.13	0.27
Fe2O3	0.5	0.6	0.65	1.03	26.95	25.16	27.07
Total	99.28	99.29	99.02	99.70	99.91	99.65	99.37

(ND) significa o elemento não foi identificado.

Alguns óxidos maiores de Na2O e K2O, bem como outos óxido não foram identificados com a técnica de XR-F devido a limitações do equipamento usado.

6.3. Elementos menores e traços das amostras de pegmatitos e anfibolitos

Tabela 3: Composição química média em elementos menores e em traço, em ppm, das amostras de anfibolitos e pegmatitos. Fluorescência de Raios X, (LG-UEM).

	Pegmatitos				**Anfibolitos**		
PPM	HM518	HM517	HM02	HM01	HM03	HM04	HM519
Co	ND	ND	ND	ND	318	319	320
Ni	83	74	124	214	162	192	108
Cu	265	363	363	231	155	177	59
Zn	44	74	ND	64	117	103	124
As	ND	10	30	13	ND	ND	ND
Rb	2525	5268	13386	9391	9	11	15
Sr	13	19	43	30	159	159	174
Y	5	6	3	2	29	33	26
Zr	8	29	ND	ND	128	130	105
Nb	21	14	19	25	11	ND	9
Mo	11	13	28	30	ND	ND	ND
Ba	84	88	ND	76	121	119	ND
La	166	178	112	121	ND	ND	ND
Ce	187	ND	246	ND	ND	219	ND
Pr	265	271	282	263	332	ND	ND
Nd	349	295	ND	470	795	418	ND
W	121	169	ND	28	ND	ND	ND
Hg	31	24	63	46	ND	ND	ND
Pb	9	5	20	18	13	10	ND
Th	58	36	73	31	49	47	60
U	16	12	15	13	9	ND	11

(ND) significa o elemento não foi identificado.

6.4. Classificações químicas

Em termos geoquímicos, os anfibolitos, apresentam teores em SiO2 variando entre 36% a 38.30% sendo incluídos nas rochas básicas, e os pegmatitos apresentam 64.34% a 71.89% de sílica o que permite inclui-los no grupo das rochas ácidas, sobressaturadas em sílica, com quartzo modal.

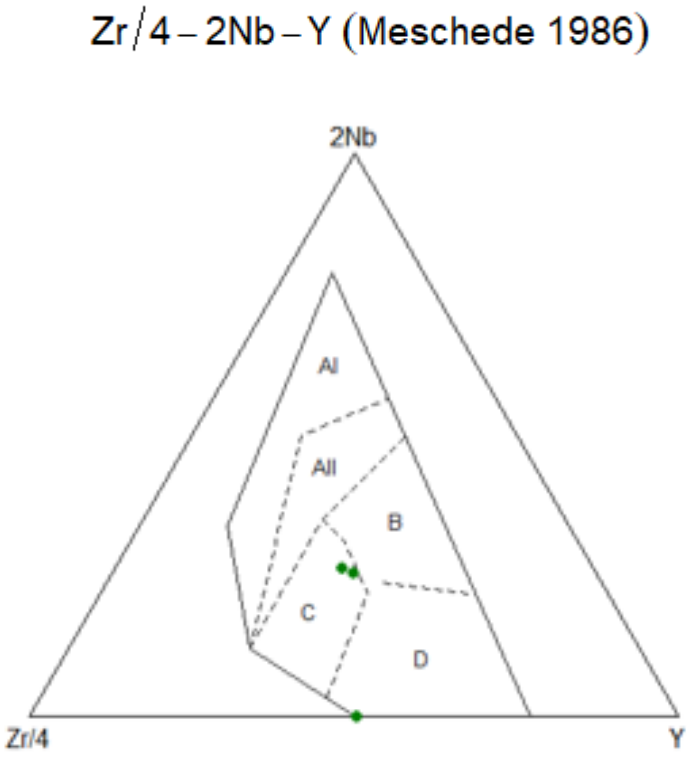


Figura 19: diagrama Zr/4–2Nb–Y de Meschede (1986); A1/A2 → basaltos intraplaca (OIB/tioléticos de intraplaca); B → E-MORB (MORB enriquecido) / transicional; C → N-MORB (MORB empobrecido); D → basaltos de arco vulcânico

No diagrama Zr/4–2Nb–Y de Meschede (1986), as amostras de anfibolito projectam-se maioritariamente nos campos C–B, compatíveis com basaltos de afinidade MORB (N-MORB a E-MORB transicional). A proximidade de uma amostra à fronteira C–D sugere possível influência ambiente back-arc, embora não dominante. Assim, os protólitos destes anfibolitos são interpretados como basaltos toleíticos formados em bacia de back-arc, posteriormente metamorfizados, o que é consistente com a evolução tectónica do grupo de Molocué descrita por Macey et al. (2010).

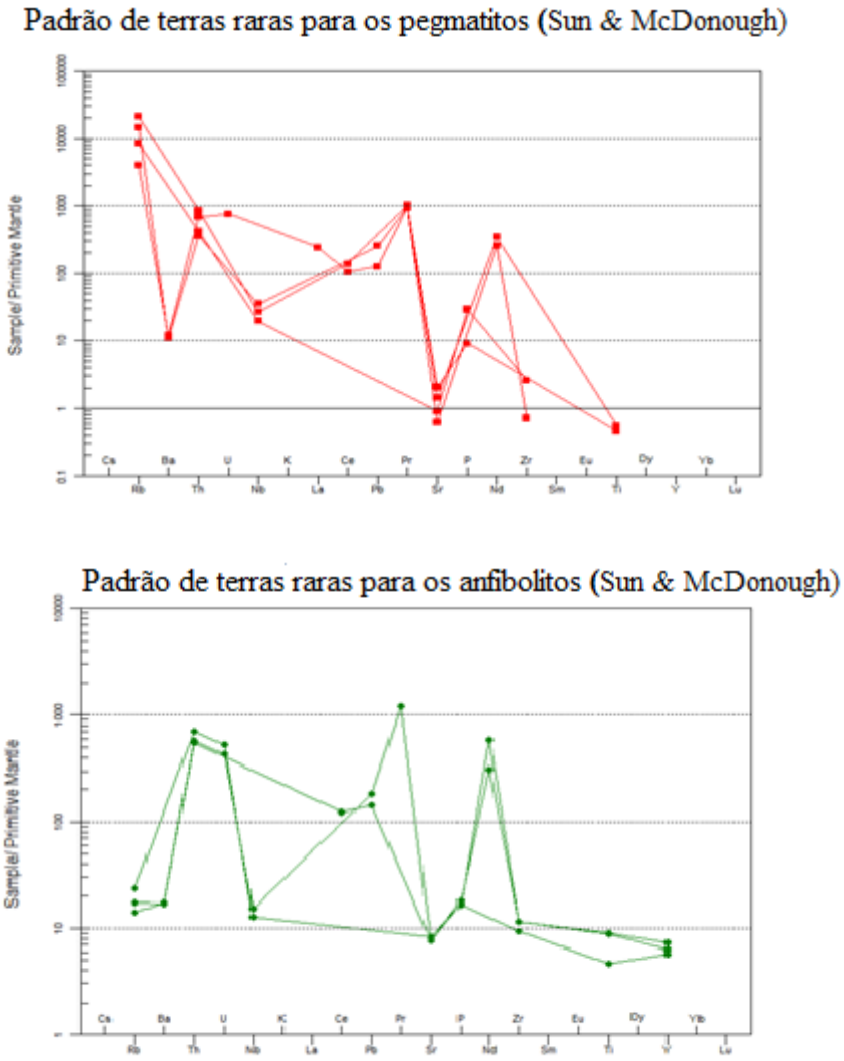


Figura 20: O diagrama multielementar normalizado ao Manto Primitivo (Sun & McDonough, 1989), permite comparar anomalias (positivas e negativas) geoquímicos dos pegmatitos (representados por retangulos vermlhos) e dos anfibolitos (representados por circulos verdes).

O diagrama multielementar mostra anomalias distintas entre os anfibolitos e os pegmatitos. Os anfibolitos apresentam anomalias irregulares, com enriquecimento em elementos como Ba, U e LREEs, sugerindo influência de processos metamórficos ou metassomáticos. Já os pegmatitos exibem anomalias mais regulares, com forte enriquecimento em elementos incompatíveis como Rb, Nb e Th, e marcada depleção em Sr e Ti, característico de magmas muito evoluídos. Estas anomalias (positivas e negativas) confirmam a origem metamórfica dos anfibolitos e a génese magmática tardia dos pegmatitos.

6.5. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Neste subcapítulo, faz-se a interpretação dos difractogramas para caracterização mineralógica de duas amostras de pegmatitos (HM-517 e HM-518) e uma amostra de anfibolito (HM-04) mediante a aplicação de método de difracção dos raios-X à fracção $\leq$10 µm, com objetivo de perceber a sua mineralogia. A difração foi executada em dois laboratórios, a saber Laboratório de Geologia do INAMI e no Laboratório de Geologia da UEM, mediante a aplicação do difractómetro da marca PANalytical Empyrean e Rigaku, respectivamente. A busca ou identificação mineralógica foi realizada no programa Xpowder e SmartLab Studio II com base na técnica da análise visual da posição dos pícos dos minerais no difractograma, e a interpretação qualitativa foi realizada por comparação com padrões existentes na base de dados PDF2 (International Center for Diffraction Data, ICDD) utilizando software específico.

A difração dos raios-x é uma técnica de ensaio consiste em incidir um feixe de raios-X (de comprimento de onda conhecido), sobre uma camada fina de pó, que gira no centro do goniómetro. Como consequência o feixe se difracta e reflecte com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difractograma. A identificação dos minerais nos difractogramas baseia-se na localização dos picos, e as determinações quantitativas baseiam-se nas áreas e alturas dos mesmos picos.

6.6. Materiais e reagentes necessários

- XR-D (PANalytical Empyrean) - caracterização mineralógica
- Almofariz de ágata ou moinho de bolas: para pulverizar a amostra;
- Espátulas de aço inox: para manuseio das amostras;
- Peneiras p500 (malha fina): para garantir a uniformidade do pó;
- Álcool ou acetona: remoção de impurezas e gorduras;
- Ar comprimido ou escova de limpeza: para remover resíduos do porta-amostras e do difratómetro.

Na secção seguinte, passa-se a se descrever o resultado da caracterização mineralógica e respectiva interpretação das paragenêses minerais encontradas.

6.7. Pegmatito HM-518

A análise por difracção neste pegmatito permitiu a identificação de minerais principais como quartzo e albite e alguns minerais secundários tais como microclina, muscovite, vermiculite e tantalite. Este pegmatito apresenta-se altamente albitizado e rico em quartzo, com uma proporção subordinada de feldspato potássico e indícios de alteração hidrotermal (vermiculite, muscovite) . A paragenése observada é consistente com o tipo de pegmatitos com um potencial económico associado a minerais de tântalo. A presença de vermiculite e muscovite sugerem processos de alteração hidrotermal tardios.

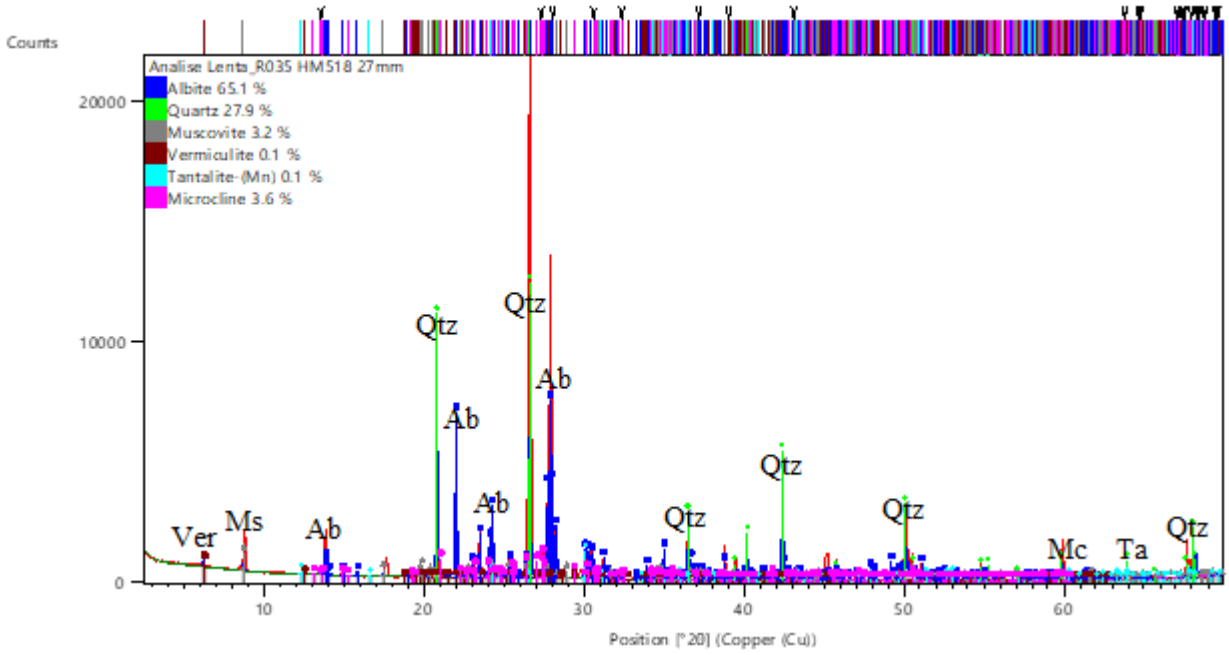


Figura 21: Caracterização mineralógica do Pegmatito HM-518, apresentando os minerais constituintes: Quartzo-Qtz, Albite-Ab, Muscovite-Ms, Vermiculite-Ver, Tantalite-Ta e Microclina-Mc.

6.8. Pegmatito HM-517

A análise por difracção de raios-X (DRX) da amostra HM-517 revela uma mineralogia relativamente simples, dominada por albite (70,1%), quartzo (17,2%) e muscovite (12,7%). A presença marcante de albite indica que este pegmatito sofreu um processo de albitização intenso, típico das fases mais tardias da cristalização pegmatítica.

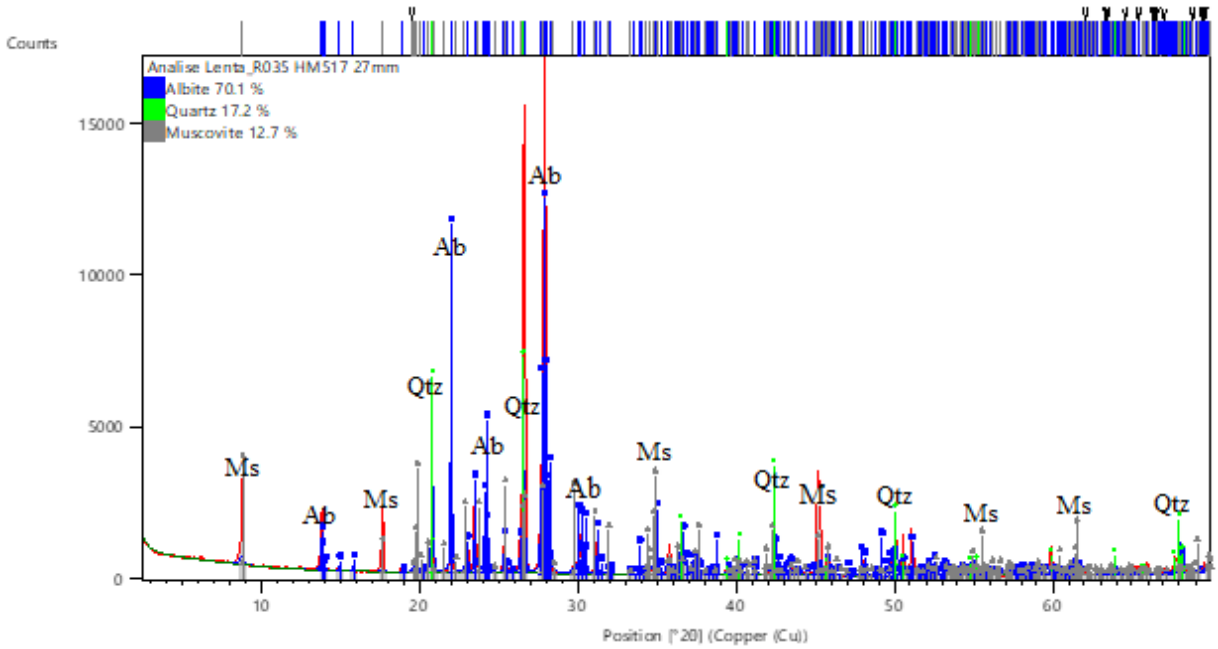


Figura 22: Caracterização mineralógica do Pegmatito HM-517, apresentando os minerais constituintes: Quartzo-Qtz, Albite-Ab e Muscovite-Ms.

6.9. Anfibolito HM-04

A análise DRX revelou que a amostra é predominantemente constituída por hornblenda (66,3%), acompanhada por anortite (25,4%) e quartzo (7,1%), com presença residual de magnesite (0,4%).

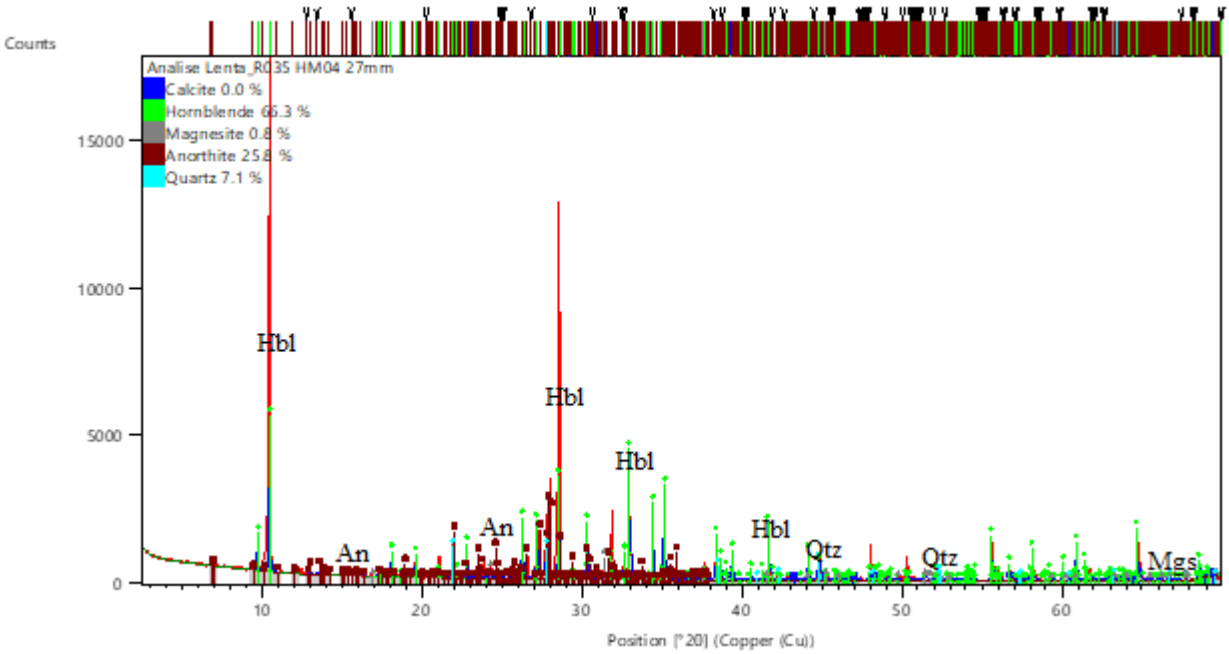


Figura 23: Caracterização mineralógica do anfibolito HM-04, , apresentando os minerais constituintes: hornblende, anorthite, quartzo e magnesite.

6.10. Pegmatito HM-517 e HM-518

No pegmatito HM-517(Fig 23), o difractograma evidencia a predominância de albite (Ab), identificada pelos picos de maior intensidade, acompanhada por quartzo (Qtz) e lepidolite (Lpd). A presença significativa de lepidolite, representada por vários picos bem definidos juntamente com a espodumena e tantalite confirma o carácter litinífero e tantalífero deste pegmatito e reforça o seu potencial económico. Por outro lado, o pegmatito HM-518 (Fig 23) apresenta um padrão semelhante, com albite e quartzo novamente como fases dominantes, mas com menor expressão de lepidolite. Este contraste sugere uma variação espacial da concentração de minerais portadores de lítio, possivelmente relacionada com a zonalidade interna do pegmatito. Identificou-se ainda a presença de espodumena e a tantalite.

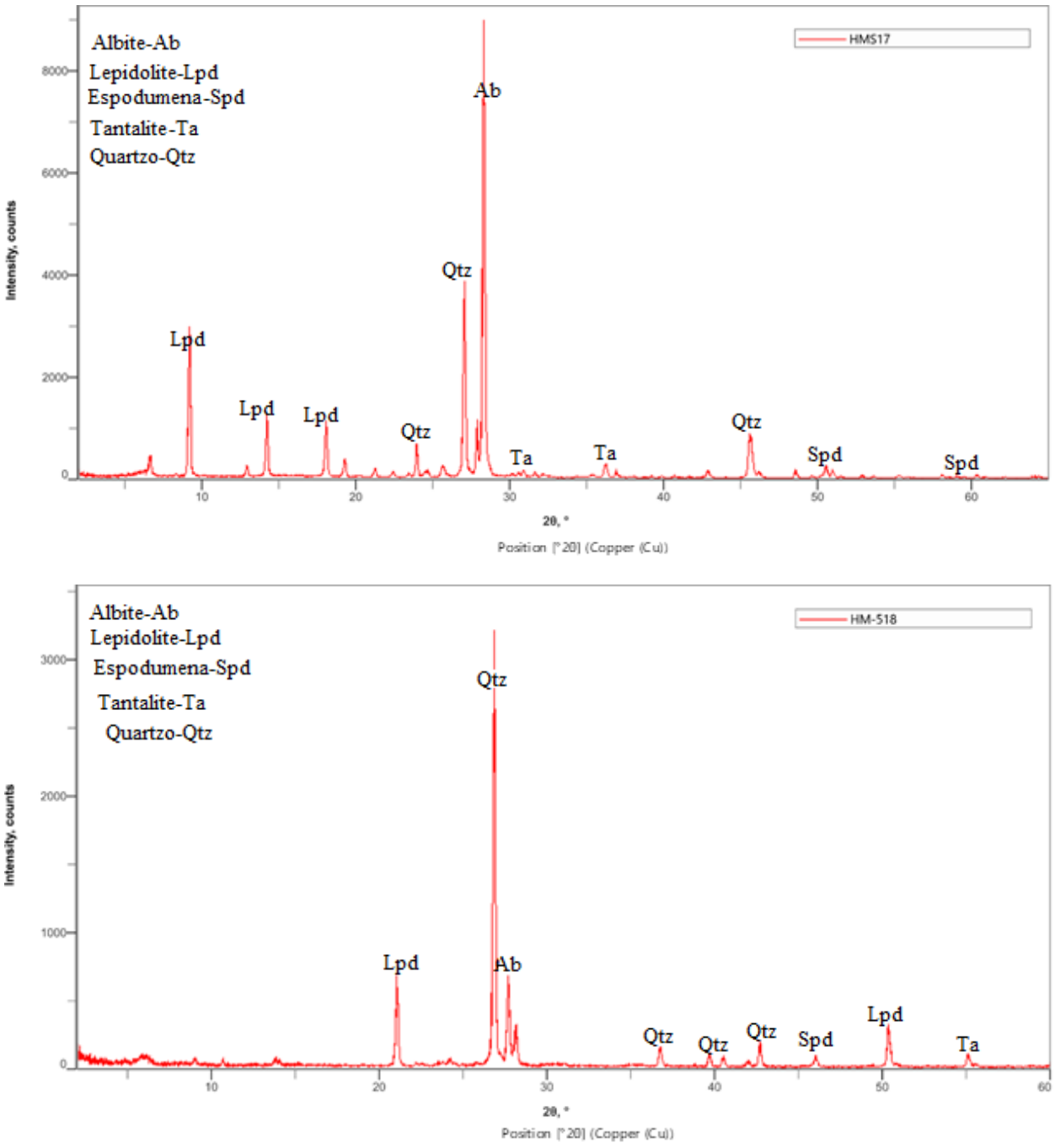


Figura 24: Difratograma de raios-X do pegmatito HM-517 e HM-518, evidenciando albite (Ab), quartzo (Qtz), lepidolite (Lpd) como fases cristalinas dominantes, e Tantalite (Ta) e Espodumena (Spd) como fases cristalinas secundárias.

Tabela 5.3: Resumo Petrográfico e Mineralógico das amostras

Amostra	**HM-01**	**HM-02**	**HM-517**	**HM-518**	**HM-519**	**HM-04**	**HM-03**
Tipo de rocha	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Anfibolito	Anfibolito	Anfibolito
Minerais principais	Plagioclase	Microclina	Albite espodumena, lepidolite, , quartzo e muscovite	Albite espodumena, lepidolite, plagioclase, quartzo e	Actinolite e plagioclase	Hornblenda e plagioclase	Hornblenda e plagioclase
Minerais acessórios	Quartzo	Quartzo	Plagioclase Tantalite microclina	Tantalite, vermiculite muscovite microclina	Epídoto, esfena, zoisite, biotite	Calcite, esfena, epídoto, magnesite, quartzo.	Minerais opacos, esfena, epídoto, quartzo.

Durante as análises macroscópica e microscópica realizadas em amostras de pegmatitos e anfibolitos, foram identificados minerais característicos de cada litologia, nomeadamente espodumena e lepidolite nos pegmatitos, bem como esfena, epídoto e calcite nos anfibolitos. No entanto, na análise por difração de raios-X (XRD), realizada no laboratório de Geologia do INAMI, estes minerais não foram identificados, pois a técnica de XRD não é a mais indicada para o estudo de pegmatitos, uma vez que estas rochas apresentam textura extremamente grosseira, o que compromete a homogeneidade da amostra pulverizada. A difração de raios-X é particularmente adequada para amostras monominerálicas, e apresenta limitações significativas quando aplicada à análise de rocha total, devido a problemas de representatividade mineralógica. Acresce ainda que, devido ao reduzido financiamento disponível para o projecto, optou-se por realizar análises de amostras totais em vez de proceder à separação e análise individual de minerais específicos, o que teria aumentado a fiabilidade dos resultados.

CAPÍTULO 7

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das amostras de pegmatito e anfibolito foram analisados por meio de diferentes técnicas, incluindo análises petrográficas (microscopia óptica), análises geoquímicas por fluorescência de raios X (XRF), destinadas à quantificação dos óxidos maiores, e difração de raios X (XRD), aplicada para a validação das paragéneses minerais presentes nas amostras. O principal objetivo deste estudo consistiu em identificar e caracterizar os minerais no pegmatito Mina de Morrua, de forma a permitir a sua classificação no contexto da Província Pegmatítica de Alto Ligonha.

O pegmatito da Mina de Morrua é classificado como um pegmatito sodalítico altamente fracionado e de significativa relevância económica na região (Alto Ligonha), devido às concentrações expressivas de columbo-tantalite, berilo e minerais de lítio (Cronwright, 2005; Macuácua, 2010). Este pegmatito esta encaixado nos anfibolitos máficos do Grupo de Mólocuè e apresenta valores de sílica entre 65,34% e 71,89%, o que permite incluí-lo no grupo das rochas ácidas, sobressaturadas em sílica, com quartzo modal.

As amostras de pegmatito HM01 e HM02 são constituídas essencialmente por microclina e plagioclase respectivamente, e estes pegmatitos correspondem aos pegmatitos menos fracionados desta Mina. Em contraste, os pegmatitos representados pelas amostras HM517 e HM518 correspondem aos tipos mais fracionados e economicamente mais relevantes, nos quais predominam lepidolite, espodumena, albite e microclina. Nestes pegmatitos ocorre também a tantalite. A predominância desses minerais permite classificá-los segundo Hunting (1985) em pegmatitos do tipo microclina (HM01), e do tipo microclina–albite, lepidolite, espodumena e raramente polucite para as amostras HM517 e HM518.

Os pegmatitos do tipo microclina–albite são interpretados como produtos tardios, altamente fracionados e enriquecidos em elementos incompatíveis (Li, Rb, Ta, Nb, ETR), resultantes de fusão parcial e/ou assimilação de magmas graníticos (Cronwright, 2005; Lächelt, 2004). A associação mineralógica observada, confirma o caráter litinífero e a elevada importância económica destes corpos. A presença conjunta de minerais litiníferos

(espodumena e lepidolite) e tantalíferos (tantalite) insere estes pegmatitos no grupo mais fracionado da Província de Alto Ligonha.

Em termos geoquímicos, os anfibolitos da Mina de Morrua apresentam teores em SiO_2 variando entre 36% e 38,30%, sendo incluídos nas rochas máficas. São constituídos principalmente por hornblenda, actinolite, plagioclase, epídoto, biotite, esfena, zoisite e quartzo e estes anfibolitos exibem uma variação de fácies metamórficas, desde a fácies xisto-verde até à fácies anfibolito, corroborando Marcey et al (2010), A plagioclase ocorre frequentemente alterada nas amostras HM519 e HM04, tendendo a originar cristais de epídoto resultantes de processos de substituição. Na amostra HM04, observa-se ainda que a esfena tende a alterar-se para formar minerais opacos, refletindo condições de oxidação tardias. Já na amostra HM03, os cristais de plagioclase exibem sinais de substituição parcial por epídoto, indicando processos de alteração posteriores à cristalização principal.

As análises por XRF desempenharam um papel fundamental na caracterização geoquímica dos pegmatitos, permitindo a determinação quantitativa dos elementos químicos presentes nas amostras. Os pegmatitos mostram teores elevados de SiO_2 (superiores a 65%), associados a baixos valores de MgO, elevado conteúdo em Al_2O_3 e razões A/CNK superiores a 1, o que evidencia um carácter peraluminoso, típico de magmas evoluídos ricos em voláteis. Em contraste, os anfibolitos apresentam teores relativamente baixos de SiO_2 (entre 36 e 38%), acompanhados por valores elevados de MgO e baixos teores de Al_2O_3, Anexo 1 e 2.

Os diagramas multivariados de SiO_2 versus elementos traço (Anexo 2) mostram que os anfibolitos são ricos em elementos compatíveis como Ni, Sr, Zr, Ba e Y, refletindo a cristalização de minerais máficos e plagioclase cálcica. Por outro lado, os pegmatitos revelam baixos teores destes elementos, mas enriquecimento em Rb, típico de líquidos residuais diferenciados. A razão Rb/Sr elevada nos pegmatitos reforça a ideia de fracionamento avançado. A depleção em Y, Ce e La pode estar relacionada com a precipitação precoce de minerais acessórios como monazite, xenotima e allanite.

as anomalias positivas desses elementos (Th,U,Ce,Pr,Nd,REE) em anfibolitos (Fig 19) podem indicar: Tório e Urânio; contaminação crustal ou processos de alteração; Cério, Promécio, Neodímio (REEs): assinatura de fluidos metamórficos e magmáticos; Fósforo: presença de apatita.

A análise por XRD realizada no INAMI (Fig 20 e 21) identificou albite e quartzo como os minerais dominantes, muscovite, vermiculite e tantalite como minerais secundários nas amostras HM517 e HM518. Por outro lado, o Laboratório de Geologia da UEM detectou albite, quartzo, tantalite, espodumena e lepidolite, como minerais secundários nas mesmas amostras (Fig 23).

Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que tanto a lepidolite quanto a muscovite pertencem ao mesmo grupo mineral, o grupo das micas, apresentando estrutura cristalina e características químicas semelhantes. No entanto, as análises realizadas pelo Departamento de Geologia da UEM demonstraram-se particularmente precisas, pois validaram a presença de lepidolite e espodumena, previamente sugerida pelas análises petrográficas, confirmando assim a presença de uma mica rica em lítio. A identificação de tantalite, ainda que secundária, é de extrema importância do ponto de vista económico, pois confirma a presença de minerais portadores de tântalo, um elemento crítico com vasta aplicação tecnológica.

No diagrama Zr/4–2Nb–Y de Meschede (1986) (Fig 18), as amostras de anfibolito projetam-se maioritariamente nos campos C–B, correspondentes a basaltos de afinidade MORB (N-MORB a E-MORB transicional). A proximidade de uma amostra à fronteira C–D sugere possível contribuição de um ambiente back-arc. Assim, os protólitos destes anfibolitos podem ser interpretados como basaltos toleíticos gerados em bacias de retro-arco, posteriormente sujeitos a metamorfismo regional. Esta interpretação corrobora com a evolução tectónica proposta para o Grupo de Molócuè (Macey et al., 2010).

Por outro lado, o diagrama FeO^T–MgO–Al_2O_3 de Pearce et al. (1977) posiciona estas mesmas amostras no campo continental/orogénico, o que reforça a hipótese de que, estes basaltos foram gerados e evoluíram num contexto de arco continental associado a um regime de subducção. Esta interpretação é ainda reforçada pelas observações petrográficas, que

revelam mineralogia metamórfica típica (hornblenda, plagioclase, epídoto), consistente com condições da fácies anfibolítica e com a evolução em regime colisional.

CAPÍTULO 8

8. Conclusões e Recomendações

8.1. Conclusões

O objetivo principal deste estudo era de fazer uma caracterização mineralógica e geoquímica do pegmatito da Mina de Morrua, assim são tiradas as seguintes conclusões:

- As análises petrográficas demonstraram a presença de lepidolite, espodumena, albite, microclina e columbo-tantalite, confirmando o caráter litinífero e tantalífero. Do ponto de vista geoquímico, os pegmatitos revelaram teores elevados de SiO_2 (>65%), altos valores de Al_2O_3 e razões A/CNK > 1, caracterizando-os como magmas peraluminosos evoluídos e ricos em voláteis.
- Os anfibolitos apresentam baixos teores de sílica (36–38%), altos conteúdos de MgO e abundância de minerais máficos (hornblenda, actinolite, biotite), enquadrando-se em rochas máficas representativas do Grupo de Molócuè.
- O pegmatito da Mina de Morrua corresponde a um pegmatito sodalítico altamente fracionado, com forte relevância económica no contexto da Província Pegmatítica de Alto Ligonha.
- O pegmatito (HM01) classifica-se como pegmatito do tipo microclina, e os pegmatitos (HM517 e HM518) classificam-se como do tipo de microclina–albite, lepidolite, espodumena e raramente polucite.
- A combinação dos dois diagramas permite concluir que os anfibolitos da Mina de Morrua derivam de protólitos basálticos de afinidade MORB/back-arc, mas que foram posteriormente integrados e retrabalhados num cenário de arco continental orogénico.

Assim, conclui-se que o pegmatito da Mina de Morrua representa um exemplo significativo de pegmatito litinifero e tantalifero com elevado potencial económico na Província de Alto Ligonha, apresentando rubídio (Rb), estrôncio (Sr), nióbio(Nb), urânio (U), elementos de terras raras (REE), etc.

8.2. Recomendações

Face aos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a continuidade de investigações orientadas para uma caracterização mais aprofundada dos pegmatitos da Mina de Morrua e da Província Pegmatítica de Alto Ligonha.

- Em primeiro lugar, sugere-se a realização de campanhas de amostragem sistemática em diferentes porções (borda, parede, núcleo). Isso permitirá compreender melhor a distribuição espacial de minerais estratégicos, como espodumena, lepidolite e columbo-tantalite.
- Em primeiro lugar, sugere-se a realização de análises isotópicas (U-Pb, Hf, Sr-Nd) em minerais datáveis, como zircão e monazite, de forma a estabelecer com maior rigor a cronologia dos eventos magmáticos e metamórficos registados na região. Este tipo de informação é fundamental para correlacionar os pegmatitos de Morrua com outros pegmatitos da província e com a evolução geotectónica do Bloco de Nampula.
- E por fim, recomenda-se o desenvolvimento de estudos mineralógicos de detalhe através de técnicas como de Microscópio Eletrónico de Varredura (SEM), que permitam identificar fases minerais minoritárias e inclusões fluídas, essenciais para compreender os processos de cristalização, fracionamento e alteração hidrotermal destes pegmatitos.

9. Referências Bibliográficas

Afonso, R., Marques, J., e Ferreira, M. (1998) A Evolução Geológica de Moçambique. Instituto de Investigação Científica de Lisboa e Direcção Nacional de Geologia – Maputo. Edição do Ministério de Ciência e Tecnologia e Instituto de Investigação Científica Tropical. 95p.

Barros, R., e Vicente, M., (1963) Estudo dos campos pegmatíticos da. Zambézia. Campanha de 1963. Inter. Rep., ING, pg. 1-133 I., 134- 290 II., 291-439 III., Maputo.

Bebout, G.E., Bebout, A.E., Graham, C.M., 2007. Cycling of B, Li, and LILE (K, Cs, Rb, Ba, Sr) into subduction zones: SIMS evidence from micas in high-P/T metasedimentary rocks. Chem. Geol. 239, 284–304.

Burnham, C.W., Nekvasil, H., 1986. Equilibrium properties of granite pegmatite magmas. Am. Mineral. 71, 239–263.

Cameron, E.N., Jahns, R.H., Mcnair, A.H., Page, E.L.R., 1949. Internal Structure Of Granitic Pegmatites. Economic Geology., Monograph 2: 115p

Černy, P., 1992. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research. Appl. Geochem. 7, 393–416.

Cerny, P., 1991b. Rare-element granite pegmatites: Part I. Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geosci. Can. 18, 49–67.

Černý, P., Ercit, S., 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. Can. Mineral. 43, 2005–2026.

Coveney, R.M., Jr., 2000. Metalliferous shales and the role of organic matter with ex amples from China, Poland, and the United States. In: Giordano, T.H., Kettler, R.M., Wood, S.A. (Eds.), Ore Genesis and Exploration: The Roles of Organic Matter. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 9, pp. 251–280.

Cronwright, M.S., (2005b) A review of the rare-element pegmatite's of the Alto Ligonha Pegmatite Province, northern Mozambique. 168 pp.

CGS (2006) - Notícia Explicativa / Map Explanation. Folhas/sheets Alto Molócuè (1537), Murrupula (1538), Nampula (1539), Mogincual (1540), Errego (1637), Gilé (1638) and Angoche (1639 –40). DNG.33-41-302-303

Dias, P., Gomes, C., Guimarães, F., and Marques, J. (2006) Estilos contrastantes da mineralização bismutífera–equilíbrio e evolução na Província Pegmatítica da Zambézia, Moçambique. Actas do VII Congresso Nacional de Geologia, 1161–1164.

Ercit, T.S., 2005. REE-enriched granitic pegmatites. In: Linnen, R.L., Sampson, I.M. (Eds.), Rare-element Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada Short Course Notes, 17, pp. 175–199.

Fersman, A.E. (1931)- Les Pegmatites, leur importance scientifique et praticque. Belgica, Universidade de Louvain, 3 v.

GTK Consortium (2006a)., Notícia Explicativa da Carta Geológica 1:250.000. DNG Volume 4, Maputo.

GTK Consortium (2006b). Notícia Explicativa da Carta Geológica 1:250.000. DNG Volume 1, Maputo.

Ginsburg, A.I., e Rodionov, G.G., (1979): On the depth of formation of granitic pegmatites. Geol. Rudn. Mestorozhd., 45-54.

H. Fritz., M. Abdelsalamb., K.A. Alic., B. Bingend., A.S. Collinse., A.R. Fowlerf., W. Ghebreabg., C.A. Hauzenbergera., P.R. Johnsonh., T.M. Kuskyi., P. Macey., G. Viola., (2013). Review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution Journal of African Earth Sciences 86 65-106.

Hunting Geology and Geophysics, 1985. Rare Metal and rare earth deposits in Mozambique – Mineral Development Study, Internal report Instituto Nacional de Geologica, Republica Popular de Moçambique, J615 Rel, 222pp.

Kroner, A., Stern, R. J., (2005). Pan-African Orogeny. Elsevier Ltd.

Jahns, R.H. (1955) The study of pegmatites. Economic Geology, 50th Anniversary Volume, 1025- 1130.

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

Lachelt, S., (2 0 0 4); Geology and Mineral Resource of Mozambique; Direcção Nacional de Geologia, República de Moçambique, 515p.

MAE (2005). Perfil do Distrito de Ile, Província de Zambézia. 2ª ed. Ministério da Administração Estatal.

Macuácua, A. F. (2010)- Interpretação dos dados aeroradiométricos das Províncias de Zambézia e Nampula; Direção Nacional de Geologia de Moçambique.

Marques, J.M., 1989. O Campo pegmatítico do Alto Ligonha: Estado actual e sua importância a curto prazo. M.Sc., unpubl. Dissertation, Lisbon University, Portugal, 291pp.

London, D., 2008. Pegmatites. The Canadian Mineralogist, Special Publication 10, 347 p.

London, D., Kontak, D. J., 2012. Granitic pegmatites: scientific wonders and economic bonanzas. Elements, 8, 257 261.

Landes, K.K., 1933. Origin and classification of pegmatites. Am. Mineral. 18, 33–56.

Pearce, J. A. e Cann, J. R., (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters 19, 290–300

Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 25 (4), 956-983.

Pedro, A. M. A., 1986. The Alto Ligonha Pegmatites (Mineral Exploration Guidelines). M.Sc., unpubl. Dissertation, Imperial College of Science and Technology, London, 190pp.

Simmons, W., e Webber K., 2008. Pegmatite genesis: state of the art. European Journal of Mineralogy, 20, 421-438.

Simmons, W. B., Pezzotta, F., Beurlen, H., 2012. Granitic Pegmatites as Sources of Colored Gemstones. DOI: 10.2013/gselement.8.4.281.421–438.

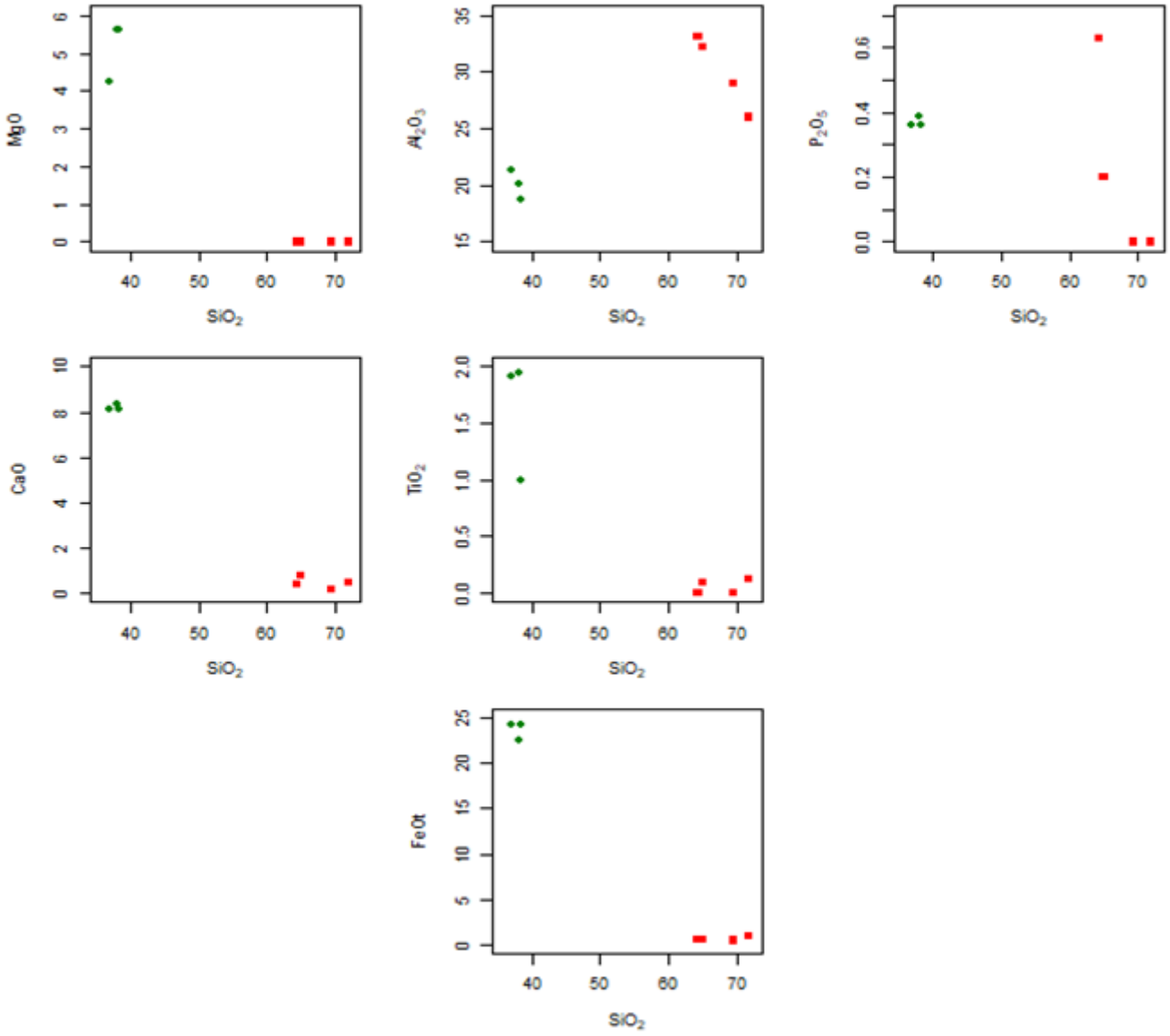
Savine, V.V., 1980. Relatório sobre os resultados dos trabalhos de pesquisa e prospecção no Jazigo dos pegmatitos dos metais raros de Morrua em 1979–1980. ING, Maputo.

Simmons, W., Falster, A., Webber, K., Roda-Robles, E., Boudreaux, A.P., Grassi, L.R., Freeman, G., 2016. Bulk composition of the Mt. Mica pegmatite, Maine, USA: im plications for the origin of an LCT type pegmatite by anatexis. Can. Mineral. 54, 1053–1070.

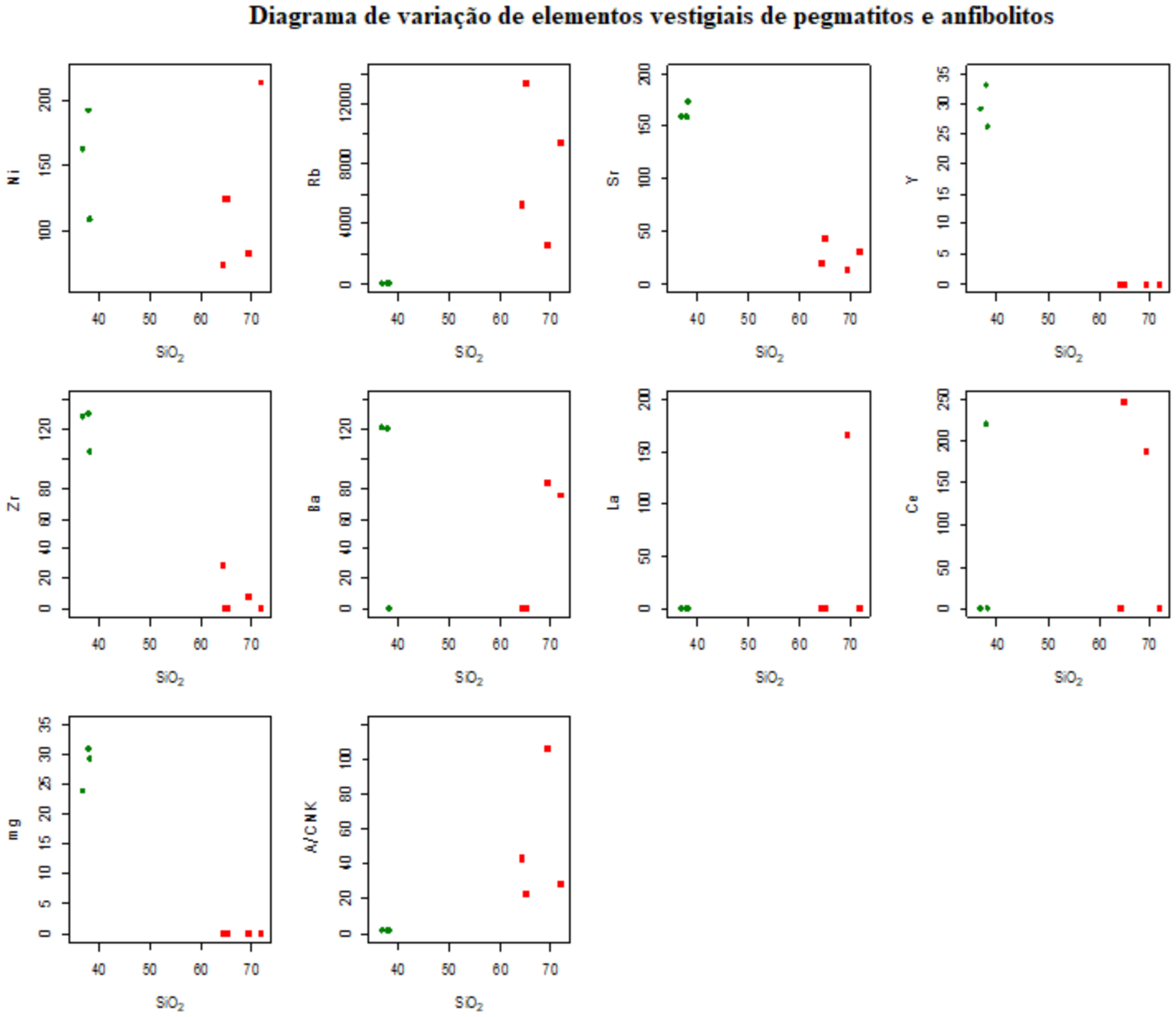
Viola, G., Handerson, I.H.C., Bingen, B., Thomas. R. J., Smethurst. M. A. de Azevedo, S., (2008). Growth and collapse of a deeply eroded orogen: Insights from structural, geophysical, and geochronological constraints on the Pan-African evolution of NE Mozambique.

ANEXOS

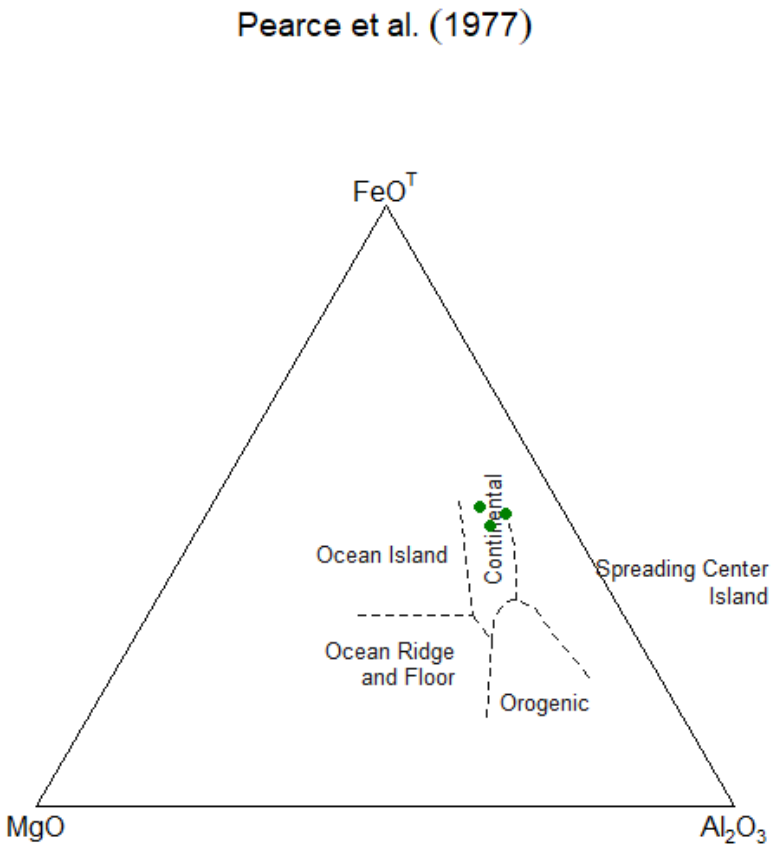
Diagrama de variação óxidos de elementos maiores de pegmatitos e anfibolitos



Anexo 1: Os pegmatitos (círculos vermelhos) mostram teores elevados de SiO_2 (superiores a 65%), associados a baixos valores de MgO, elevado conteúdo em Al_2O_3 e razões A/CNK superiores a 1, o que evidencia um carácter peraluminoso, típico de magmas evoluídos ricos em voláteis. Em contraste, os anfibolitos (triângulos azuis) apresentam teores relativamente baixos de SiO_2 (entre 36 e 38%), acompanhados por valores elevados de MgO e baixos teores de Al_2O_3.

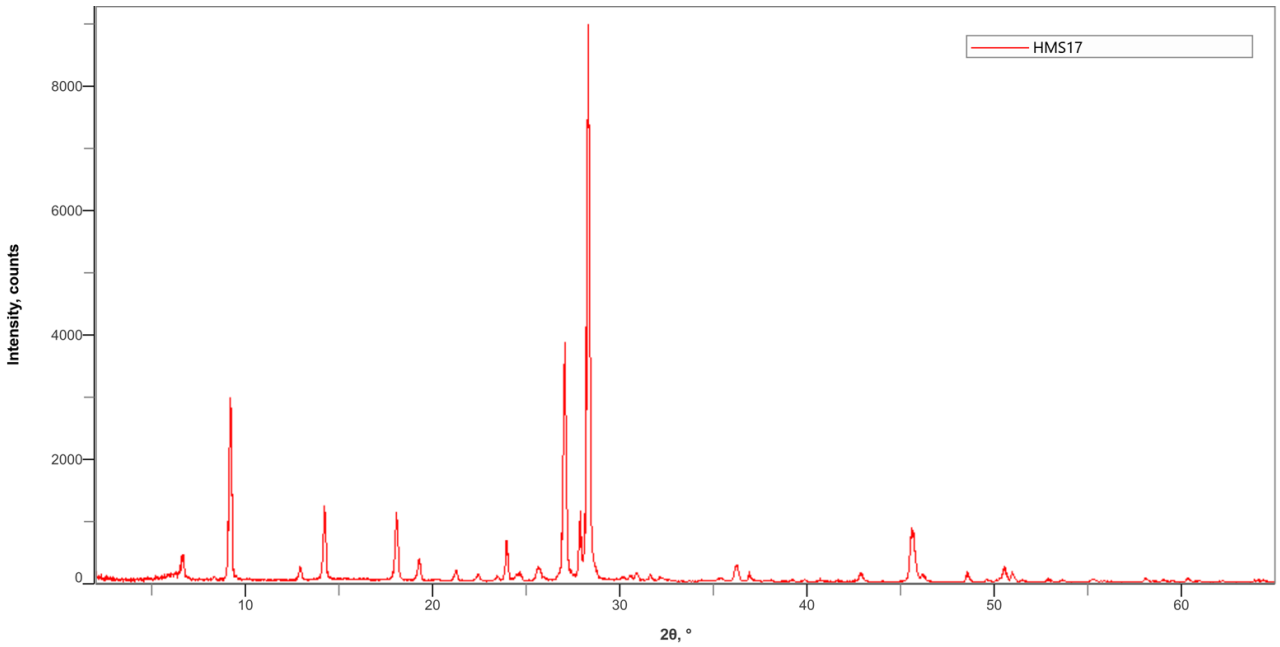


Anexo 2: Os diagramas multivariados de SiO_2 versus elementos traço mostram que os anfibolitos são ricos em elementos compatíveis como Ni, Sr, Zr, Ba e Y, refletindo a cristalização de minerais máficos e plagioclase cálcica. Por outro lado, os pegmatitos revelam baixos teores destes elementos, mas enriquecimento em Rb e La, típico de líquidos residuais diferenciados.



Anexo 3: Diagrama ternário de Pearce et al. (1977), que usa as concentrações de FeOT (óxido de ferro total), MgO e Al2O3 para determinar o ambiente geotectônico de rochas basálticas**.** Continental: Este campo indica que o protólito, ou seja, a rocha ígnea original que deu origem aos anfibolitos, foi um basalto de ambiente continental.

Difratogramas dos pegmatitos HM-517



Difratogramas dos pegmatitos HM-518

