

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia apresentado à disciplina

TCC II (GAP233215A)

**CARACTERIZAÇÃO METAMÓRFICA DE BIOTITA XISTO DA UNIDADE SANTO
ANTÔNIO NA REGIÃO DE LUMINÁRIAS - MG**

Lara Agostini Patto

MsC. Regiane Andrade Fumes (Orientadora)

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto (Coorientador)

Rio Claro (SP)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

LARA AGOSTINI PATTO

CARACTERIZAÇÃO METAMÓRFICA DE BIOTITA XISTO
DA UNIDADE SANTO ANTÔNIO DA REGIÃO DE
LUMINÁRIAS – MG.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro – SP

2019

LARA AGOSTINI PATTO

CARACTERIZAÇÃO METAMÓRFICA DE BIOTITA XISTO
DA UNIDADE SANTO ANTÔNIO DA REGIÃO DE
LUMINÁRIAS – MG.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

MsC. Regiane Andrade Fumes (orientadora)

Prof. Dr. Luiz Sérgio Amarante Simões

Prof. Dr. Marcos Aurélio Farias de Oliveira

Rio Claro, 06 de dezembro de 2019.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos professores pela inspiração e motivação acadêmica durante toda a graduação: Prof. Dr. José Alexandre Perinotto, Prof. Dr. Mario Assine, Prof. Dr. José Eduardo Zaine e Prof. Dr. George Luiz Luvizotto.

Agradeço minha orientadora, doutoranda Regiane Andrade Fumes, e coorientador, Prof. Dr. George Luiz Luvizotto, pela ajuda constante no desenvolvimento do tema e pelo ensinamento transmitido. Agradeço aos funcionários, técnicos de laboratório e demais profissionais da UNESP Rio Claro pelo apoio institucional, e pela colaboração indireta para a realização do trabalho.

Faço aqui um agradeciemento especial à minha família pelo apoio e incentivo constante pela minha educação. Agradeço meu pai Claudio e tias Stella, Dalila e Tereza por sempre apoiarem meu desenvolvimento educacional e serem, para mim, exemplos de excelentes profissionais de sucesso.

Agradeço minha mãe Lúcia pelo cuidado, carinho e preocupação diários com meu desenvolvimento dentro e fora da Universidade, e por ser minha maior inspiração para trilhar o sucesso.

Agradeço à Neide, minha eterna guia e protetora, por todo o carinho e dedicação para com meu crescimento e desenvolvimento emocional, espiritual e intelectual.

Aos amigos da Turmalinda, agradeço pelas muitas atividades conjuntas, trabalhos, viagens de campo e experiências inesquecíveis. Em especial, para os colegas André Ponce Figols e Thales Henriques Teixeira que sempre me auxiliaram durante atividades de Mapeamento I e II, bem como nos permonores da vida acadêmica.

Agradeço aos amigos Paulo Henrique, Gabriel Antunes, João Penteado, Amanda Molina, Suelen Portughesi, Nadine Piveta, Nathalia Weigel, Marina Ciccolin, Rapahel Parra, André Ponce Figols, Thales Henriques Teixeira e demais que são de extrema importância na minha vida pessoal, e que me ajudaram muito a crescer e ser uma pessoa melhor, vou guardá-los para sempre em meu coração.

Ao meu amado e companheiro Caio Novais, pelo suporte emocional e pela extrema confiança depositada em mim para a finalização deste trabalho. Espero ter oportunidade de estar ao seu lado quando esta etapa se concluir e te ver formar geólogo.

RESUMO

A sul do Cráton São Francisco encontra-se o Orógeno Brasília Meridional. Este orógeno é caracterizado por um sistema de *Nappes* de cavalgamento deslocadas lateralmente em direção à borda sul do Cráton São Francisco que apresentam gradientes metamórficos distintos. Dentre as *Nappes* do Sistema de *Nappes* Carrancas e Andrelândia, o foco de estudo é dado às rochas da *Nappe* de Luminárias, especificamente o biotita xisto da Unidade Santo Antônio que aflora na porção norte da *nappe*. A *Nappe* de Luminárias corresponde a estrutura alongada de orientação NNE-SSW de idade neoproterozoica. Compreende conjunto de rochas xistosas (metapelíticas) e quartzosas que representam parte da sequência de margem passiva do Cráton São Francisco. Esta margem passiva foi metamorfisada durante orogênese Ediacarana – Cambriana, que levou à aglutinação do Gondwana Ocidental. Realizou-se, neste estudo, a caracterização metamórfica das rochas xistosas da Unidade Santo Antônio através de petrografia, microtectônica, química mineral e termobarometria. O biotita xisto Santo Antônio, da porção norte da *nappe*, é constituído de clorita, quartzo, plagioclásio (albita/oligoclásio), muscovita, biotita e granada, com ilmenita, rutilo, monazita e zircão como acessórios. A associação mineral do pico metamórfico para a porção norte da *nappe*, em especial para a Unidade Santo Antônio, é Grt+Bt+Ms+Pl. Os estudos da paragênese, química mineral, e cálculo termobarométrico foram essenciais para obtenção das condições de P e T através do método *average PT* do THERMOCALC. Os dados obtidos foram: 717°C ($\pm 67^\circ\text{C}$) e 7.2 kbar (± 3.1 kbar) e 739°C ($\pm 93^\circ\text{C}$) e 5.7 kbar (± 3.9 kbar) respectivamente para duas amostras analisadas. Tais condições registradas nas rochas estudadas são superiores àquelas sugeridas nos outros trabalhos para a área de estudos, e divergem das informações presentes na literatura. A disparidade dos resultados aqui apresentados, em comparação com a literatura, abre caminho para o surgimento de novas hipóteses para explicar o metamorfismo na região. Sugere-se a intensificação dos estudos geoquímicos e termobarométricos para as rochas xistosas da Unidade Santo Antônio, de modo a aprofundar mais as interpretações e discussões quanto ao entendimento geológico local.

Palavras-chave: *Nappe* de Luminárias; Unidade Santo Antônio; *average PT*; fácies anfíbolito; Megassequência Andrelândia; química mineral; THERMOCALC.

ABSTRACT

At the south of the San Francisco Craton are the Southern Brasilia Orogen. This orogen is characterized by a system of riding Nappes displaced laterally toward the southern edge of the San Francisco Craton that have distinct metamorphic gradients. Among nappes of the Carrancas and Andrelândia Nappe Systems, the focus of this study is given to the schist rocks of the Santo Antônio Unit that emerge in the northern portion of the Luminarias Nappe. This nappe corresponds to the elongated NNE-SSW orientation structure of neoproterozoic age. It is composed of a set of quartzite and metapelitic rocks that represent part of the passive margin sequence of the São Francisco Craton. This passive margin was metamorphosed during the Ediacaran-Cambrian orogenesis, which led to the agglutination of West Gondwana. This paper is based on the metamorphic characterization of the schist rocks of the Santo Antônio Unit through petrography, microtectonics, mineral chemistry and thermobarometry. The mineral paragenesis observed for the Santo Antônio schist biotite, from the northern portion of the nappe, is $\text{Chl} + \text{Rt} + \text{Ilm} + \text{Qtz} + \text{Ms} + \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Grt}$, with the presence of retrorretromorphic chlorite. The assemblage of the metamorphic peak for the northern portion of the nappe, especially for the Santo Antônio Unit, is $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Pl}$, with excess $\text{Ilm} + \text{Qtz} + \text{Ms} + \text{H}_2\text{O}$. Studies of paragenesis, mineral chemistry, and thermobarometric calculations were essential for obtaining P and T conditions through THERMOCALC average PT method. The data obtained were: 717°C ($\pm 67^\circ\text{C}$) and 7.2 kbar (± 3.1 kbar) and 739°C ($\pm 93^\circ\text{C}$) and 5.7 kbar (± 3.9 kbar) respectively for two samples analyzed. These conditions recorded in the studied rocks are superior than those suggested in other studies for this area, and differ from the information present in the literature. The disparity of the results presented here, compared to the literature, opens up a way to new hypotheses and approaches to explain metamorphism in the region. It is suggested to intensify geochemical and thermobarometric studies for the schist rocks of the Santo Antônio Unit, in order to further deepen the interpretations and discussions regarding the local geological understanding.

Keywords: Luminarias Nappe; Santo Antônio Unit; average PT; amphibolite facies; Andrelândia megasequence; mineral chemistry; THERMOCALC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Carta Topográfica de Luminárias e adjacências, com delimitação da área de estudo	16
Figura 2. Mapa de acesso à área de estudo partindo de Rio Claro	17
Figura 3. A. Mapa de Compartimentação do Estado de Minas Gerais em domínios geomorfológicos. B. Mapa de Padrões de Relevo do Estado de Minas Gerais.....	19
Figura 4. Modelo Digital de Elevação.....	20
Figura 5. Climograma de Luminárias com a precipitação (mm) e temperatura (°C) médias anuais	21
Figura 6. Mapa das Unidade de Planejamento das Bacias Hidrográficas do Estado de Minas Gerais.	24
Figura 7. Compartimentação geológica de Minas Gerais.....	36
Figura 8. Mapa geológico simplificado da região sudeste brasileira com subdivisão entre o Cráton São Francisco e as Faixas Brasília e Ribeira. Destaque para área de estudo, menção à <i>Nappe</i> de Luminárias.	42
Figura 9. Mapa geológico em detalhe da Megasequência Andrelândia.	45
Figura 10. Estratigrafia da Megasequência Andrelândia	45
Figura 11. Mapa Geológico do Orógeno Brasília Meridional, com destaque (traço vermelho) para a Unidade Santo Antônio da <i>Nappe</i> de Luminárias.	47
Figura 12. Mapa estrutural simplificado da extremidade sul da Faixa Brasília, com a discriminação das Nappes.....	52
Figura 13. Mapa metamórfico simplificado.	55
Figura 14. Mapa de distribuição dos principais minerais índices metamórficos e os traços de isogradas para as rochas da Megasequência Andrelândia.....	55
Figura 15. Afloramentos de biotita xistos da unidade Santo Antônio	57
Figura 16. Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas do Biotita xisto da Unidade Santo Antônio (LR-08).....	60
Figura 17. Imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura com detectores de eletrons retroespalhados	61
Figura 18. Imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de eletrons retroespalhados. S.....	62
Figura 19. Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas e microtectônicas do Biotita xisto Santo Antônio.....	64
Figura 20 Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas e microtectônicas do Biotita xisto Santo Antônio.	65
Figura 21. Prancha de fotomicrografias do Biotita xisto Santo Antônio.....	67
Figura 22. Fotomicrografia de Biottia Xisto Santo Antônio obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	68
Figura 23. Mapa de fases do biotita xisto Santo Antônio, no qual foram baseadas as análises de química mineral.....	69
Figura 24. Química mineral da granada no biotita xisto da porção norte da <i>Nappe</i> de Luminárias (Unidade Santo Antônio).	72

Figura 25. Química mineral de biotita no biotita xisto da porção norte da <i>Nappe</i> de Luminárias (Unidade Santo Antônio).	73
Figura 26. Química mineral de muscovita no biotita xisto da porção norte da <i>Nappe</i> de Luminárias (Unidade Santo Antônio).....	74
Figura 27. Química mineral de clorita no biotita xisto da porção norte da <i>Nappe</i> de Luminárias (Unidade Santo Antônio)... ..	75
Figura 28. Diagrama Ternário de Classificação de Feldspatos com membros finais Or-Ab-An. Análises pontuais feitas em 138 cristais de plagioclásio (LR-09 e LR-54).....	76
Figura 29. Imagens de BSE analisados por EPMA..	78
Figura 30. Gráfico representativo dos dados de pico metamórfico por <i>average PT</i> das amostras LR-09 e LR-54..	79
Figura 31. Projeções AFM de sequência de associação mineral em rochas metapelíticas (sistema KFMASH) durante o metamorfismo progressivo	81
Figura 32. Estágios de desenvolvimento de nova xistosidade a partir de clivagem de crenulação em foliação S_1	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Localização dos pontos. Coordenadas em UTM (Zona 23k WGS 84).....	31
Tabela 02. Grupos e respectivas unidades/formações mapeadas por Trouw <i>et al.</i> (1983).....	38
Tabela 03. Grupos com respectivas fácies e unidades mapeadas em Trouw <i>et al.</i> (1986).....	39
Tabela 04. Contexto Tectônico segundo Campos Neto (2004).....	40
Tabela 05. Reclassificação do Terreno Andrelândia por Campos Neto <i>et al.</i> (2007).....	46
Tabela 06. Resumo das análises de química mineral com os valores mais representativos para óxidos e cátions (em porcentagem).....	70
Tabela 07. Análise química mineral da EPMA de cristal de granada (Grt_1) da amostra LR-09.....	122
Tabela 08. Análise química mineral da EPMA de cristal de granada (Grt_2) da amostra LR-09.....	123
Tabela 09. Análise química mineral da EPMA de granada da amostra LR-54.....	124
Tabela 10. Análise química mineral da EPMA de biotita da amostra LR-09.....	126
Tabela 11. Análise química mineral da EPMA de biotita da amostra LR-54.....	127
Tabela 12. Análise química mineral da EPMA de clorita da amostra LR-09.....	128
Tabela 13. Análise química mineral da EPMA de clorita da amostra LR-54.....	130
Tabela 14. Análise química mineral da EPMA de muscovita da amostra LR-09.....	131
Tabela 15. Análise química mineral da EPMA de muscovita da amostra LR-54.....	132
Tabela 16. Análise química mineral da EPMA de plagioclásio da amostra LR-09.....	133
Tabela 17. Análise química mineral da EPMA de plagioclásio da amostra LR-54.....	135
Tabela 18. Condições de P e T para pico metamórfico analisadas para amostra LR-09. Cálculos pelo software THERMOCALC.....	78
Tabela 19. Condições de P e T para pico metamórfico analisadas para amostra LR-54. Cálculos pelo software THERMOCALC.....	79

APÊNDICES

APÊNDICE I - MAPA GEOLÓGICO E DE PONTOS.....	98
APÊNDICE II - FICHAS DE DESCRIÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS.....	100
APÊNDICE III - ANÁLISE DE QUÍMICA MINERAL.....	121
APÊNDICE IV – GRÁFICOS DO THERMOCALC.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS MINERAIS (KRETZ, 1983):

Abreviatura	Mineral	Fórmula
<i>Alb</i>	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
<i>Aln</i>	Allanita	$(\text{Ce,Ca,Y})_2(\text{Al,Fe})_3(\text{Si}_3\text{O}_{11})\text{O}(\text{OH})$
<i>Alm</i>	Almandina	$\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
<i>Ap</i>	Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$
<i>An</i>	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
<i>Bt</i>	Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe,Al,Ti})_3[(\text{Al,Si})_3\text{O}_{10}](\text{OH,F,Cl})_2$
<i>Cld</i>	Cloritoide	$(\text{Fe}^{2+}\text{Mg,Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
<i>Chl</i>	Clorita	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
<i>Grt</i>	Granada	$(\text{Ca,Mg,Fe}^{2+}\text{Mn})_3(\text{Al,Fe}^{3+}\text{Mn,Cr,Ti}^{4+})_2(\text{SiO}_4)_3$
<i>Gros</i>	Grossulária	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
<i>Ilm</i>	Ilmenita	$\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$
<i>Ms</i>	Muscovita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
<i>Mnz</i>	Monazita	$(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$
<i>Or</i>	Ortoclásio	KAlSi_3O_8
<i>Prp</i>	Piropo	$\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
<i>Pl</i>	Plagioclásio	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$
<i>Qtz</i>	Quartzo	SiO_2
<i>Rt</i>	Rutilo	TiO_2
<i>Sps</i>	Espessartita	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
<i>Zrn</i>	Zircão	ZrSiO_4

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Apresentação e Objetivos.....	14
1.2 Localização, Extensão e Acesso à Área.....	15
1.3 Aspectos Fisiográficos e Socioeconômicos	17
1.3.1 Relevô 17	17
1.3.2 Clima 21	21
1.3.3 Vegetação 22	22
1.3.4 Hidrografia..... 22	22
1.3.5 Aspectos Sociais e Atividades Econômicas 25	25
1.4. Fundamentação Teórica	27
1.4.1. Cálculos termobarométricos (<i>Average PT</i>)..... 30	30
2. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	31
2.1 Etapa Preparatória	31
2.2 Etapa de Atividade de Campo	31
2.3 Etapa Laboratorial	31
2.3.1. Petrografia 32	32
2.3.2. Imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 32	32
2.3.3. Análise da química mineral por Microsonda Eletrônica..... 33	33
2.3.4. Termobarometria..... 34	34
2.4 Etapa de Confecção da monografia	34
3. GEOLOGIA REGIONAL	35
3.1. Contexto Geotectônico	35
3.1.1 Faixa Brasília 37	37
3.1.2 Zona de Interferência entre as Faixas Brasília e Ribeira 41	41
3.2. Geologia da Nappe de Luminárias	43
3.2.1 Geologia Estrutural..... 50	50
3.2.2 Metamorfismo na Megassequência Andrelândia 53	53

4. RESULTADOS	56
4.1 Geologia Local: Unidade Santo Antônio	56
4.1.1 <i>Petrografia:</i>	57
4.1.2 <i>Microtectônica</i>	63
4.2. Química Mineral:.....	69
4.2.1. <i>Grupo das Granadas</i>	71
4.2.2. <i>Grupo das Micas</i>	72
4.2.3. <i>Grupo das Cloritas</i>	75
4.2.4. <i>Plagioclásio</i>	76
4.3. Termobarometria (average PT):.....	77
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	80
5.1. <i>Discussão do metamorfismo e comparação com a literatura</i>	80
5.2. <i>Discussão de microtectônica/estrutural e paralelo com a literatura</i>	84
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	88
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Objetivos

A *Nappe* de Luminárias, localizada nas proximidades do município de Luminárias na porção sul do estado de Minas Gerais, é uma estrutura alongada de direção NNE-SSW de idade neoproterozóica situada a sul do Cráton São Francisco, no Orógeno Brasília Meridional.

Nas últimas décadas, houve muitos debates e controvérsias na literatura sobre a superposição de eventos deformacionais e metamórficos entre a Faixa Brasília e Faixa Ribeira (TROUW, PACIULLO e RIBEIRO, 1994; CAMPOS NETO, 2000; CAMPOS NETO e CABY, 2000; CAMPOS NETO *et al*, 2004; PETERNEL *et al*, 2005; HEILBRON *et al*, 2008; CAMPOS NETO *et al*, 2011; e TROUW *et al*, 2013).

No entanto, ainda há poucas informações sobre o metamorfismo das rochas da Unidade Santo Antônio na *Nappe* de Luminárias, o que dificulta o entendimento da tectônica local. Tendo em vista a importância do estudo metamórfico para a compreensão da evolução da Faixa Brasília Meridional, os xistos da *Nappe* de Luminárias são foco do presente trabalho.

Metapelitos são muito importantes no estudo metamórfico por apresentarem minerais muito sensíveis às variações de P e T durante o metamorfismo, muitos dos quais formados por reações descontínuas e por registrarem, mais facilmente, as foliações metamórficas.

Muitos trabalhos na região descrevem o gradiente metamórfico regional através de petrografia e da associação mineral da rocha, sem se aprofundar nos estudos geoquímicos e termobarométricos (que podem fornecer dados mais exatos acerca da caracterização metamórfica). Desse modo, o trabalho objetiva determinar as condições de pico do metamorfismo nas rochas xistosas da Unidade Santo Antônio da porção norte da *Nappe* de Luminárias por meio de estudos petrográficos, microtectônicos e geoquímicos, além de cálculos termobarométricos de *Average PT*, visando definir as condições de pressão e temperatura registrados nestas rochas.

O trabalho se justifica pela oportunidade de aprofundar as discussões quanto ao metamorfismo local e suas implicações na evolução tectônica regional, a partir de estudo de análise química mineral e determinações de condições de P e T por cálculos termobarométricos.

1.2 Localização, Extensão e Acesso à Área

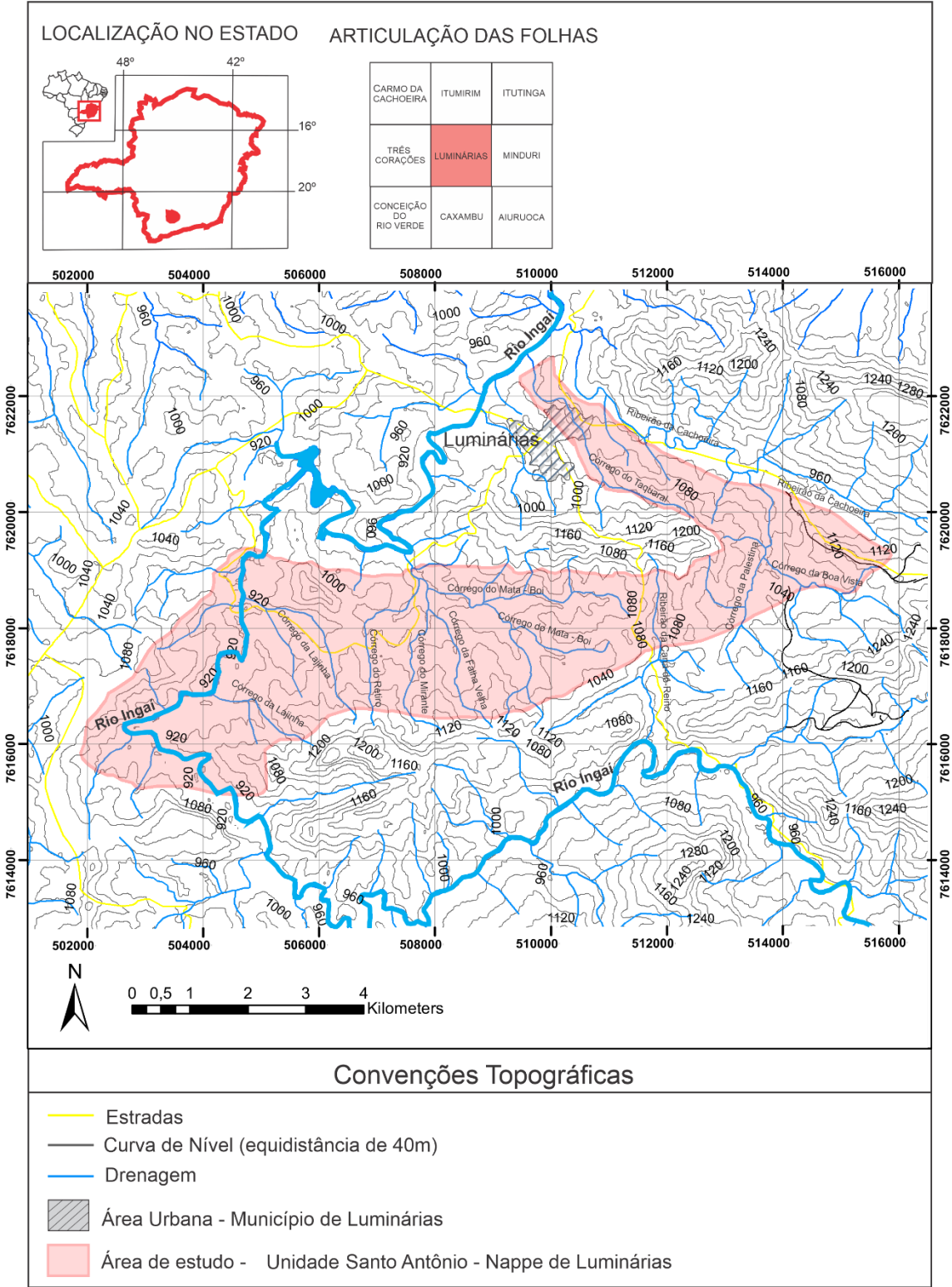
Localizada na região sul do estado de Minas Gerais, a área de estudo concentra-se no entorno do município de Luminárias. Segundo dados do censo IBGE (2017), o município conta com uma população de 5.422 habitantes distribuídos em 500,143 km² de área de unidade territorial, com densidade demográfica em torno de 10,84 hab/km².

Situada na folha Luminárias 1:50.000 (SF.23-X-C-IV-1) (IBGE, 1975), a área de estudo (representada pela área sombreada em rosa da Figura 1) é delimitada dentro de uma área cujos pontos contem as seguintes coordenadas geográficas UTM Datum Córrego Alegre, zona 23K: X: 502000 Y: 7622000 – a noroeste; X: 516000 Y: 7622000 – a nordeste; X: 502000 Y: 76150000 – a sudeste; e X: 516000 Y: 76150000 – a sudoeste. Com aproximadamente 34,7 km² de extensão, a área de estudo (polígono rosa da Figura 1) se refere à localização espacial das rochas aflorantes da Unidade Santo Antônio da *Nappe* de Luminárias.

Com relação à espacialização geográfica, o município faz limite territorial ao norte com os municípios de Ingaí e Itutinga, ao sul com São Tomé das Letras, Cruzília e São Bento Abade, a oeste com Carmo da Cachoeira, a leste com Carrancas; e próxima - 34km a sul - da cidade de Lavras, a maior da região.

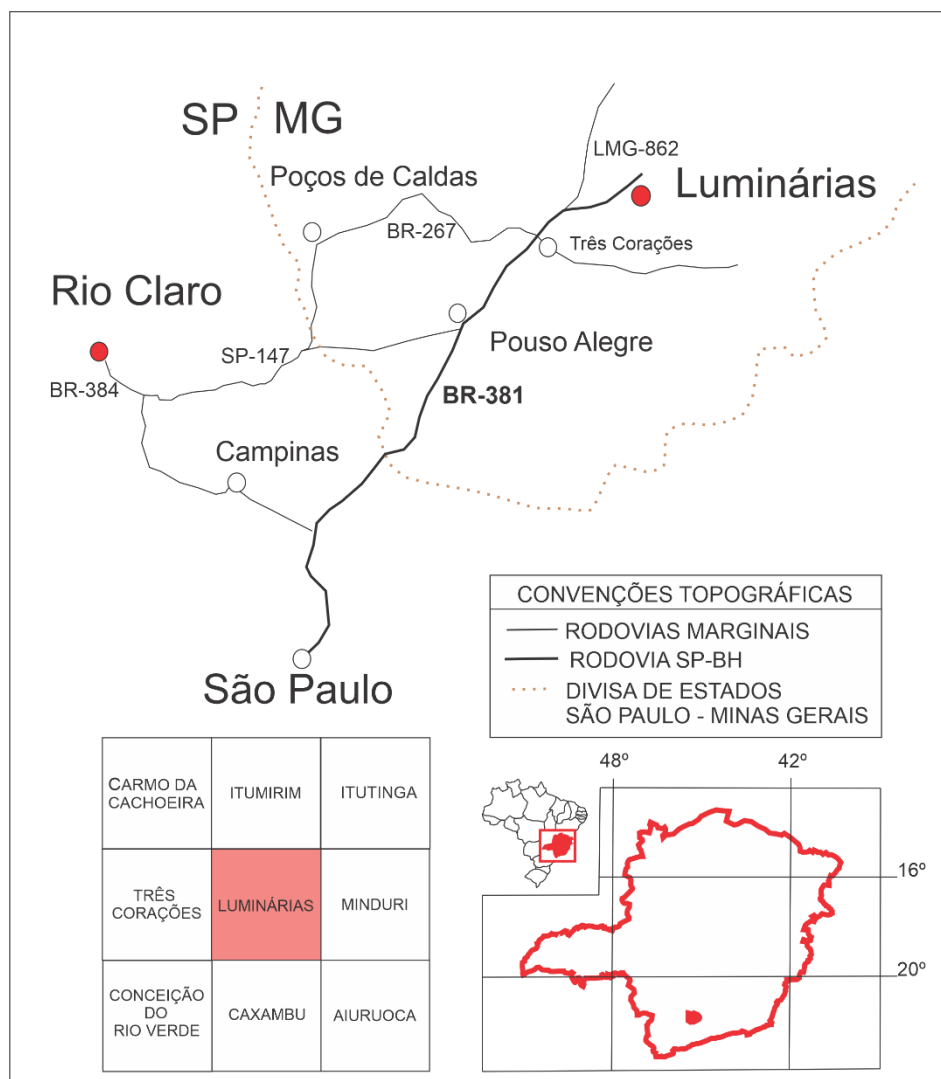
Distante cerca de 374 km do município de Rio Claro –SP, o trajeto mais viável pode ser realizado partindo-se da BR-364, em direção ao município de Limeira. Em Limeira, seguir a BR-373 com rampa de acesso à Rodovia Engenheiro João Tosello (SP-147). Nesta, permanecer por 20km até chegar ao município de Itapira, onde deve-se acessar a SP-352 até chegar no limite da divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais. A partir de Minas, seguir a MG-290 até o município de Pouso Alegre; e seguir pela Rodovia Fernão Dias (BR-381) até Três Corações. Por fim, seguir cerca de 50 km pela LMG-862 até o município de Luminárias. Se não houver trânsito, percorre-se todo o trajeto em cinco horas e meia (Figura 2).

Figura 1. Carta Topográfica de Luminárias e adjacências, com delimitação da área de estudo



Fonte: imagem confeccionada a partir da carta topográfica de Luminárias (IBGE, 1975).

Figura 2. Mapa de acesso à área de estudo partindo de Rio Claro



Fonte: imagem confeccionada a partir de bases topográficas do IBGE (1975).

1.3 Aspectos Fisiográficos e Socioeconômicos

1.3.1 Relevo

A compartimentação geomorfológica do Estado de Minas Gerais foi primeiramente proposta por Saadi (1991), que explica a complexa estruturação morfológica a partir da evolução morfotectônica de quatro províncias estruturais (Mantiqueira, Tocantins, São Francisco e Paraná) que compõem o arcabouço estrutural do Brasil.

No entanto, trabalhos mais recentes (BAPTISTA *et al.* 2010) baseiam-se em processos atuantes de agração ou denudação, e nos litotipos presentes para uma compartimentação mais atual do território mineiro, dividindo-o em cinco grandes domínios geomorfológicos: (I) Domínio das Unidades Agradacionais, (II) Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Cristalinas ou Sedimentares, (III) Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas

Sedimentares Litificadas, (IV) Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Sedimentares pouco Litificadas e por fim, (V) Domínio dos Relevos de Aplainamento.

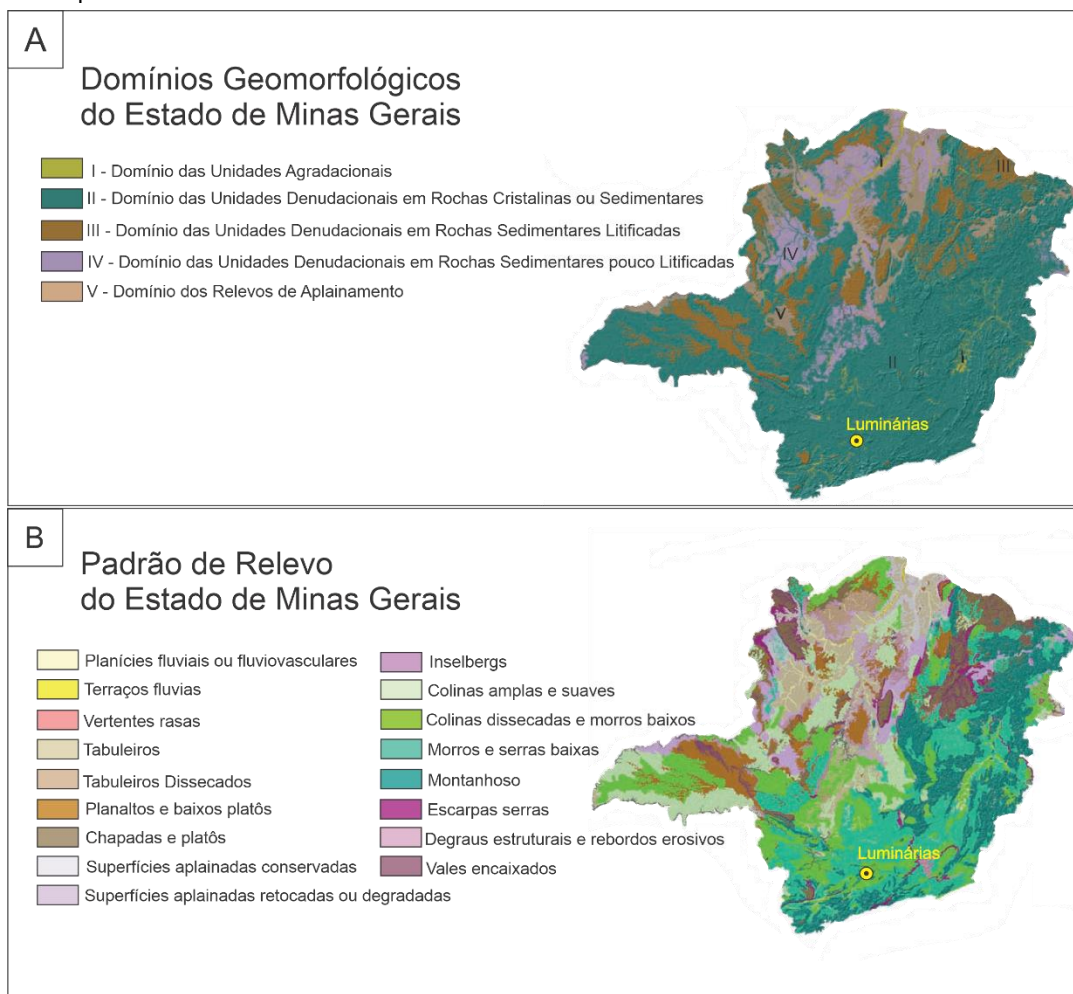
Baptista *et al.* (2010) conceitua os domínios da seguinte maneira: no domínio das unidades agradacionais (I), há três padrões de relevo correspondentes às zonas de acumulação atual de sedimento: Planícies fluviais ou fluviolacustres, os terraços fluviais e as vertentes recobertas por depósitos de encosta. No domínio de rochas cristalinas ou sedimentares (II), oito são os padrões correspondentes a relevos denudacionais: colinas amplas e suaves, colinas dissecadas e morros baixos, domínio de morros baixos e de serras baixas, domínio montanhoso, escarpas serranas, degraus estruturais e rebordos erosivos, e vales encaixados. No Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Sedimentares Litificadas é composto por dois padrões de relevo, que correspondem exclusivamente à ambientes de degradação de rochas sedimentares: planatos e baixos platôs, e chapadas e platôs de superfícies tabulares. No (IV) Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Sedimentares pouco Litificadas, observa-se padrões de degradação em Tabuleiros (formas suavemente dissecadas) com topos planos e alongados, onde há predomínio de processo de pedogênese; e padrões em tabuleiros dissecados por redes de drenagem de alta densidade, com recorrente processo de erosão linear acelerado ou laminar.

Por fim, no Domínio de Relevos Aplainados, Baptista *et al.* (2010) classificam os padrões em: superfícies aplainadas conservadas, superfícies aplainadas retocadas ou desagregadas, inselbergs e outros relevos residuais.

Conforme exposto acima e pela observação do Mapa de Compartimentação do Estado de Minas Gerais em Domínios Geomorfológicos (Figura 3 A), afirma-se que grande porção territorial do estado mineiro se insere no Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Cristalinas ou Sedimentares, bem como, o município de Luminárias.

Figura 3. A. Mapa de Compartimentação do Estado de Minas Gerais em domínios geomorfológicos.

B. Mapa de Padrões de Relevo do Estado de Minas Gerais



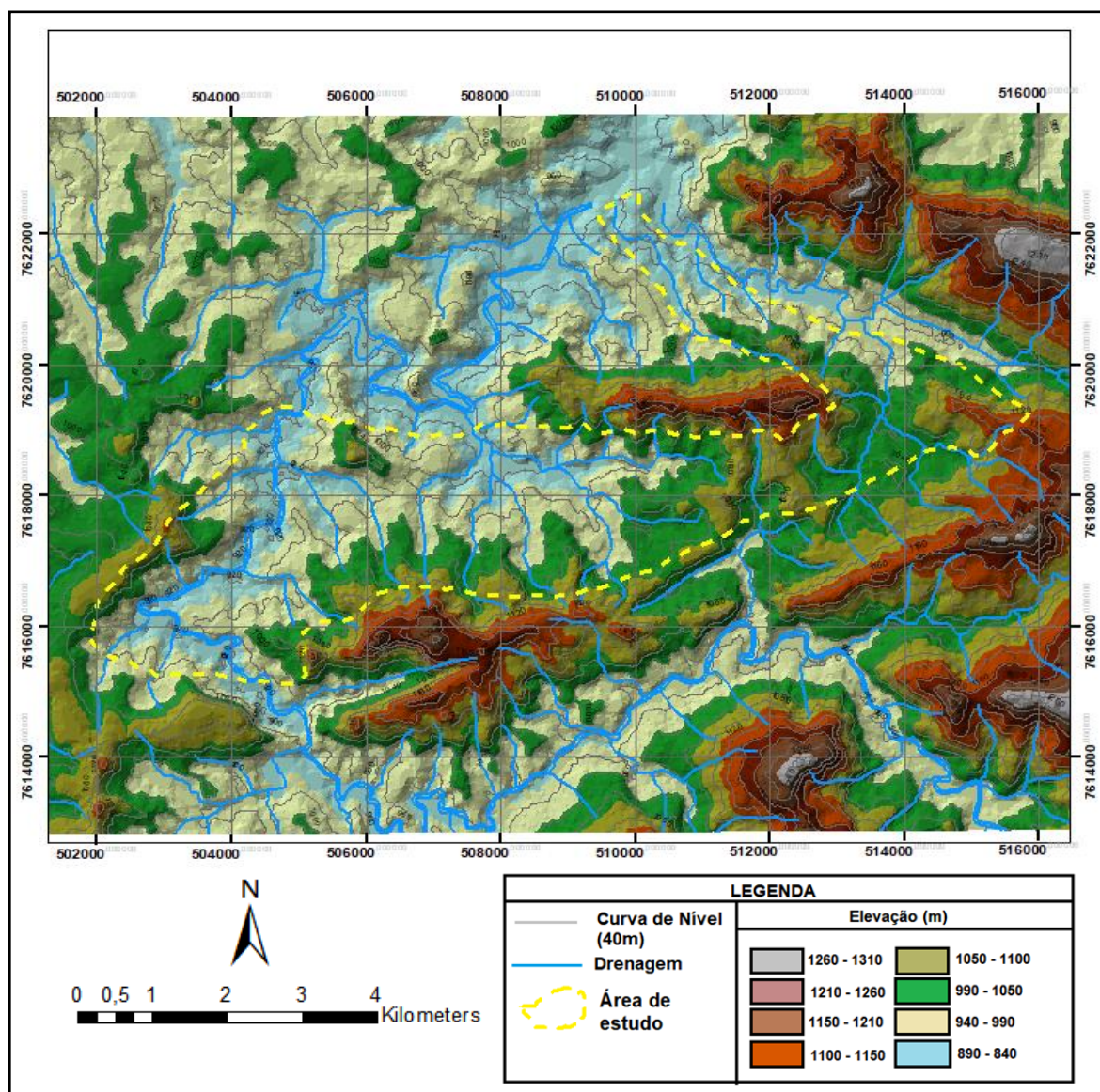
Fonte. Adaptado de Baptista *et al.* (2010).

De acordo com o Mapa de Padrão de Relevos (Figura 3 B) de Baptista *et al.* (2010), é possível localizar a área de estudo e seu respectivo padrão de relevo. Constata-se, portanto, que o município de Luminárias está cercado por domínio de morros baixos e colinas dissecadas. Tal padrão constitui colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou aguçados devido a ação de desgaste natural por processos intempéricos que alteram a geomorfologia do relevo.

Conceitualmente, há um sistema de drenagem principal que permite a deposição de sedimentos em planícies aluviais restritas ou em vales fechados. Para Baptista *et al.* (2010), os morros baixos exibem amplitude de relevo que variam de 30 a 80 m e inclinação de vertentes de 5-20°. Frequentemente pode haver processos de erosão laminar e ocorrência esporádica de processos de erosão linear acelerada (sulcos, ravinas e voçorocas), além da geração de rampas de colúvios nas baixas vertentes.

Conforme destaca o Modelo Digital de Elevação para Luminárias e entorno (Figura 4), as menores altitudes se localizam nas porções norte e central, enquanto as maiores se situam nas extremidades das margens leste, nordeste e sudeste. Em suma, a área possui amplitude topográfica entre 840 e 1310 metros aproximadamente, e apresenta grandes desníveis em escarpas na porção centro-leste do mapa, enquanto a porção oeste apresenta uma declividade menos acentuada, de modo geral.

Figura 4. Modelo Digital de Elevação.



Fonte: Mapa confeccionado no *software* ArcGIS 10.5 e editado no *software* CorelDRAW 2017.

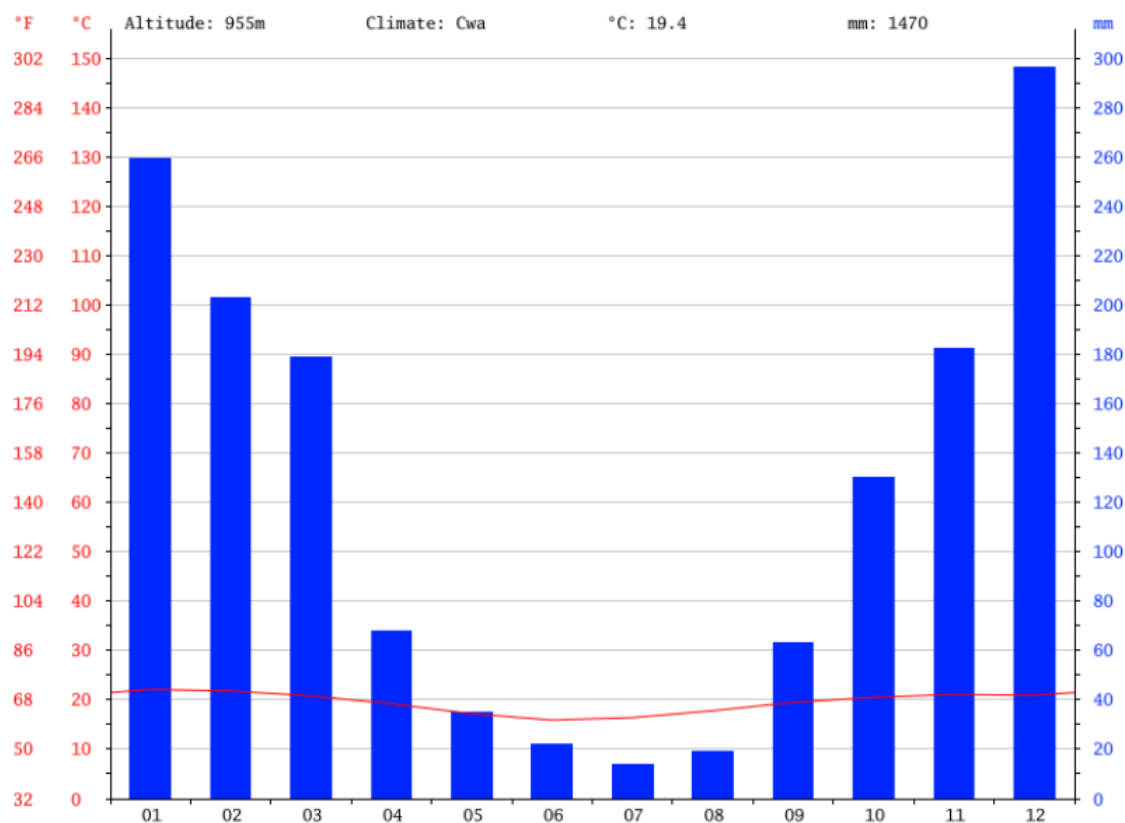
1.3.2 Clima

Segundo a Classificação Climática de Köppen e Geiger, o clima em Luminárias é considerado como “Cwa”: clima subtropical úmido influenciado pelas monções. Isto implica que a média do mês mais frio está acima de 0 °C ou -3 °C, que ao menos um mês do ano atinge temperatura média acima de 22 °C e ao menos quatro meses ao ano apresentam média acima de 10 °C.

Segundo dados do IBGE (2017), a temperatura média do município é de 19.4 °C, com variação durante o ano de cerca de 6,2%. No mês de janeiro, por exemplo, é de 22.1 °C. Ao longo do ano, junho tem uma temperatura média de 15.9 °C, considerada a temperatura mais baixa do ano.

Neste clima, o verão é pelo menos dez vezes mais chuvoso do que o inverno, que é seco; havendo, portanto, uma pluviosidade muito mais significativa no verão. Pode-se dizer também que 70% da chuva cai durante os meses mais quentes, e somente 30% cai nos meses mais frios. O mês mais seco tem uma diferença de precipitação de 282 mm em relação ao mês mais chuvoso, e a pluviosidade média anual é 1470 mm (Figura 5).

Figura 5. Climograma de Luminárias com a precipitação (mm) e temperatura (°C) médias anuais



Fonte: extraído da Página Climate-Data.Org.

1.3.3 Vegetação

As diferentes formas de relevo em Minas Gerais, somadas às especificidades de solo e clima, propiciaram paisagens muito variadas, recobertas por vegetações características, adaptadas a cada um dos inúmeros ambientes particulares inseridos no domínio de três biomas brasileiros: o Cerrado, a Mata Atlântica e a Caatinga (DRUMMOND *et al*; 2005).

É possível, assim, entender a ocorrência de vegetações distintas em ambientes semelhantes do ponto de vista topográfico e climático, mas com características locais particulares (MARTINS, 2000). A região sul de Minas Gerais localiza-se em uma área de transição entre dois biomas: Cerrado e Mata Atlântica - matas semidecíduas do Sul e Sudeste do país (COSTA *et al.*, 1998).

Nessa região, está localizado o município de Luminárias, especificamente na microrregião do Alto Rio Grande (RODRIGUES *et al.* 2002). A vegetação primária da região do Alto Rio Grande compreendia um extenso mosaico vegetacional composto por manchas florestais, cerrados, campos rupestres e campos de altitude (AZEVEDO 1962, IBGE 1993), cuja diversidade de formações deve-se, às transições entre os cerrados do Brasil Central e as florestas semidecíduais (OLIVEIRA FILHO & FLUMINHAN-FILHO 1999). Neste contexto, a paisagem vegetal está associada a solos rasos e jovens do topo das montanhas, enquanto o cerrado e florestas semidecíduais compartilham solos mais antigos, profundos e férteis (EITEN 1982).

No entorno de Luminárias, existe uma limitação agrícola relacionada ao solo e à topografia que se restringe à mecanização (QUEIROZ *et al.* 1980). A vegetação natural do município forma um mosaico juntamente com pastagens e áreas cultivadas (ativas ou abandonadas).

1.3.4 Hidrografia

Segundo o Comitês de Bacias Hidrográficas de Minas Gerais, órgão colegiado integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, o estado de Minas Gerais é subdividido em dez Bacias Hidrográficas (Figura 6), dentre as quais o sistema fluvial do município de Luminárias se insere no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Grande.

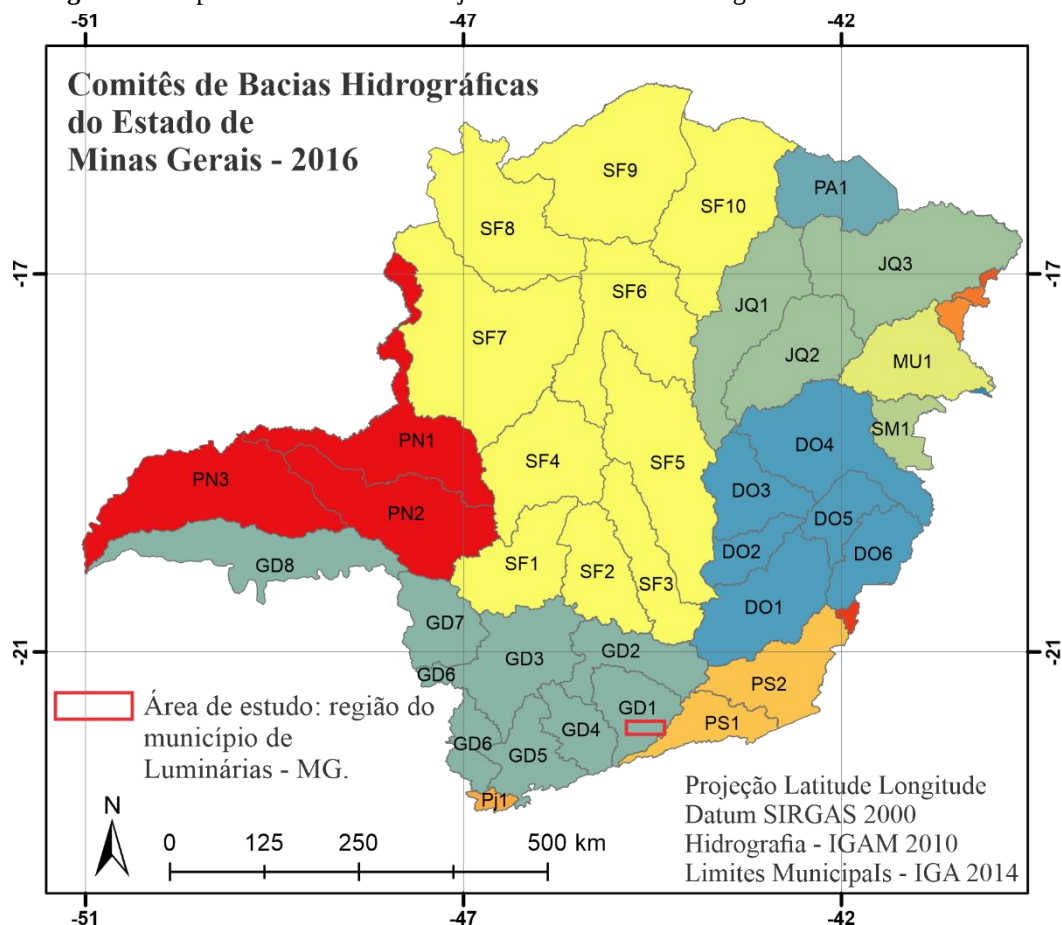
A Bacia Hidrográfica do Rio Grande possui expressiva área territorial, com mais de 143 mil km² de área de drenagem situada na região sudeste do país, com 60,2% no estado de Minas Gerais, e 39,8% no estado de São Paulo. No curso do alto Rio Grande destacam-se as usinas hidrelétricas de Camargos e Itutinga, e a Usina Hidrelétrica do Funil, entre os municípios de Lavras e Perdões, distante cerca de 70 km de Luminárias.

Em termos de capacidade instalada de geração de energia elétrica a Bacia Hidrográfica do Rio Grande responde por 8%, ou 7.800 MWatts, responsável por cerca de 67% de toda a energia gerada no Estado mineiro; o que traduz o alto potencial estratégico e energético da região e de sua bacia. A Bacia Hidrográfica do Rio Grande possui expressiva área territorial, com mais de 143 mil Km² de área de drenagem situada na região sudeste do país, com 60,2% no estado de Minas Gerais, e 39,8% no estado de São Paulo.

Atentando-se para a legenda da Figura 6, há subdivisão interna da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (GD1 até GD9) referente aos agrupamentos de afluentes. A área de estudo abrange a região denominada GD1 - CHB do Alto Rio Grande, cujos afluentes percorrem os municípios mineiros: Aiuruoca, Alagoa, Andrelândia, Arantina, Bocaina de Minas, Bom Jardim de Minas, Carrancas, Carvalhos, Ingaí, Ijaci, Itumirim, Itutinga, Liberdade, Luminárias, Madre de Deus de Minas, Minduri, Nazareno, Piedade do Rio Grande, Santana do Garambéu, São Vicente de Minas, Seritinga, Serranos, Baependi, Bom Sucesso, Cruzília, Ibertioga, Ibituruna, Itamonte, Lavras, Lima Duarte, Santa Rita de Ibitipoca, São João Del Rei e São Tomé das Letras.

Com relação aos rios e córregos que compõe o sistema fluvial de drenagens que se ligam aos afluentes do Bacia do Rio Grande, e que adentram o município de Luminárias e a área de estudo, vale destacar: Rio Ingaí, Córrego da Boa Vista, Córrego da Palestina, Ribeirão da Canadão-Reino, Ribeirão da Cachoeira, Córrego do Taquaral, Córrego do Mata-Boi, Córrego da Falha Velha, Córrego do Mirante, Córrego do Retiro e Córrego da Lajinha (vide Figura 1). Todas juntas compõe um sistema de drenagens com alta sinuosidade em vale fechado e encaixado na morfologia do terreno, dissecando os morros de maior amplitude e declividade, alterando a dinâmica geomorfológica local.

Figura 6. Mapa das Unidade de Planejamento das Bacias Hidrográficas do Estado de Minas Gerais.



Legenda: Comitês de Rios de Domínio Estadual

- | | |
|--|---|
| <p>Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba</p> <p>Pn1 - CBH do Alto Rio Paranaíba</p> <p>Pn2 - CBH do Rio Araguari</p> <p>Pn3 - CBH do Baixo Rio Paranaíba</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Grande</p> <p>GD1-CBH do Alto Rio Grande</p> <p>GD2-CBH Vertentes do Rio Grande</p> <p>GD3-CBH do entorno do Reservatório de Furnas</p> <p>GD4-CBH do Rio Verde</p> <p>GD5-CBH do Rio Sapucaí</p> <p>GD6-CBH dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo</p> <p>GD7-CBH do Médio Rio Grande</p> <p>GD8-CBH do Baixo Rio Grande</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul</p> <p>PS1-CBH dos Rios Preto e Paraíba</p> <p>PS2-CBH dos Rios Pomba e Muriaé</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul</p> <p>PJ1-CBH dos Rios Piracicaba e Jaguari</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus</p> <p>SM1-CBH do Rio São Mateus</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Mucuri</p> <p>MU1-CBH do Rio Mucuri</p> | <p>Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco</p> <p>SF1-CBH do Alto São Francisco</p> <p>SF2-CBH do Rio Pará</p> <p>SF3-CBH do Rio Paraopeba</p> <p>SF4-CBH do entorno da Represa Três Marias</p> <p>SF5-CBH do Rio das Velhas</p> <p>SF6-CBH dos Rios Jequitai e Pacuí</p> <p>SF7-CBH do Rio Paracatu</p> <p>SF8-CBH do Rio Urucuia</p> <p>SF9-CBH do Médio São Francisco</p> <p>SF10-CBH do Rio Verde Grande</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Doce</p> <p>DO1-CBH do Rio Piranga</p> <p>DO2-CBH do Rio Piracicaba</p> <p>DO3-CBH do Rio Santo Antonio</p> <p>DO4-CBH do Rio Suaçu</p> <p>DO5-CBH do Rio Caratinga</p> <p>DO6-CBH águas do Rio Manhuaçu</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha</p> <p>JQ1-CBH do Alto Rio Jequitinhonha</p> <p>JQ2-CBH do Rio Araçuaí</p> <p>JQ3-CBH do Médio e Baixo Rio Jequitinhonha</p> <p>Bacia Hidrográfica do Rio Pardo</p> <p>PA1-CBH do Rio Pardo</p> |
|--|---|

Fonte. Instituto Mineiro de Gestão de Águas – Igam

1.3.5 Aspectos Sociais e Atividades Econômicas

Com relação aos aspectos sociais, pode-se afirmar que Luminárias é um município interiorano cujo panorama socioeconômico é de uma região com processo de urbanização mais lento que a média para o estado de Minas Gerais (IBGE, 2017), com manchas urbanas pequenas e taxas bem mais altas de empregabilidade na área agrícola.

Quanto à educação, o município apresenta uma alta taxa de escolarização básica (de pessoas de 6 a 14 anos), referente a 99,3% da população total alfabetizada. Esse dado à posiciona em 50º dentre os 853º municípios do Estado de Minas Gerais (IBGE, 2017). A economia é primordialmente de caráter primário (agricultura, pecuária e silvicultura) e subordinadamente, por exploração de quartzito.

De acordo com o último censo IBGE (2017), a produção agrícola de cereais, leguminosas e oleaginosas movem a economia, caracterizada tanto pela lavoura permanente quanto pela temporária. Vale destacar também a pecuária bovina, bubalina, equina, suína, galinácea, ovina e mel de abelha que chegaram a altos patamares de produção/comercialização em 2017, segundo o censo IBGE. A silvicultura se apresenta como alternativa para atender a grande demanda por produtos de origem florestais, dessa forma, o plantio e posterior extração de eucalipto é fonte de matéria prima para suprir os setores moveleiros e de construção civil, bem como para atender a produção de carvão vegetal, celulose, papel e óleos.

A região que engloba Luminárias e São Tomé das Letras é considerada Polo Produtor da Pedra São Tomé. A mineração de quartzito é um dos setores que mais aquece a economia local. No entanto, no caso de Luminárias, há cerca de 20 mineradoras atuando na exploração da rocha, e a maioria não está legalizada. São atividades clandestinas, com uma série de ilegalidades praticadas pelos extratores que gera degradação dos recursos hídricos e do solo. Segundo a Coordenadoria Regional das Promotorias de Justiça do Meio Ambiente da Bacia do Rio Grande - CRRG, a principal exigência dos órgãos responsáveis pela legalização de mineradoras é a recuperação das áreas degradadas, e a maior dificuldade para as empresas minerarem é a obtenção da licença ambiental.

Ressalta-se também, o crescente turismo ecológico na região, complementando o setor de serviços ativos, sobretudo na região serrana e nas províncias espeleológicas (IBGE, 2017). Dentre os principais atrativos turísticos de Luminárias destaca-se o Complexo da Serra Grande com várias cachoeiras, grutas, picos e piscinas naturais. O complexo é famoso pela Gruta de Quartzito Serra Grande, pela Cachoeira do Funil, pelo Complexo de Cachoeiras do Mandembe e Água Santa, o Ribeirão do Lavarejo, e pela Serra de Luminárias, que deu origem ao nome da cidade, repleta de pinturas rupestres (de grande importância arqueológica).

Segundo o Guia do Turismo Local – Luminárias, o alto potencial eco-turístico se manifesta na prática de esportes de aventura radical, muito requisitados e frequentes no município, como o Rapel, Escalada, Bóia-cross, Trekking, Moto-cross, Enduro, Off-road, Biking, Montanhismo, e atividades de lazer pelas inúmeras cachoeiras e cavernas em quartzito.

Além disso, o município faz parte da Estrada Real, integrando o Circuito Turístico Vale Verde Quedas D'água, juntamente com as cidades de São Thomé das Letras, Lavras, Carmo da Cachoeira, Bom Sucesso, Ribeirão Vermelho, São Bento Abade, Ingaí e Itumirim; compondo um atrativo roteiro histórico-cultural e natural na região.

1.4. Fundamentação Teórica

Diversos são os métodos de cálculos termodinâmicos para a determinação das condições de formação de rochas metamórficas. Segundo Will (1998), dentre os métodos existentes, o de diagrama de fases, é o que merece maior destaque.

A construção de diagramas de fases foi método alternativo desenvolvido com o objetivo de sumarizar as informações de pressão, temperatura e composição de rochas metamórficas de acordo com sistemas modelos apropriados.

A utilização de diagrama de fases é uma forte alternativa ao estudo termodinâmico porque permite, por exemplo, observar dados texturais e de associação mineral da rocha, cujas correlações são importantes para a caracterização de pressão e temperatura da mesma. Desse modo, a relevância do estudo metamórfico por diagrama de fases se dá por tratar de parâmetros que, geralmente, não são considerados nos estudos por métodos geotermobarométricos convencionais (WILL; 1998).

A definição de diagramas de fases se resume a uma representação gráfica das condições físico-químicas das associações minerais em equilíbrio dentro de um sistema composicional adequado à rocha de interesse. Pode-se também, representar os campos de estabilidade de fases minerais em função de diversas variáveis.

A descrição termodinâmica de equilíbrio de fases sempre é enquadrada em um sistema. Por “sistema”, segundo Will (1998), entende-se que é a terminologia usada para uma gama de entidades químicas, necessária para a descrição da composição de um mineral ou rocha. O sistema é constituído de fases (mineral, fluido e líquido – fusão), e pode ser isolado, fechado ou aberto. Ou seja, pode haver (ou não) troca de calor (energia) e matéria, com trabalho de gasto/ganho energético sobre o mesmo.

Rochas metapelíticas, por exemplo, são usualmente descritas dentro do sistema químico KFMASH, cujos componentes K_2O , FeO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 e H_2O ; integram o “sistema modelo” de metapelitos. No entanto, dependendo da mineralogia da rocha metapelítica, outros óxidos podem ser adicionados ao sistema modelo; como exemplo, o sistema NCKFMASHTO, que inclui Na_2O , CaO , TiO_2 e O_2 ; ou ainda o sistema MnNCKFMASHTO que inclui MnO na composição mineral.

Por entidades químicas, entende-se que são átomos e óxidos componentes do sistema (ou das fases), por exemplo, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , etc. Se a referência for ao sistema, o componente descreve a variação química do mesmo. Caso seja referente às fases, “componentes” serão os minerais que se enquadram nas variações de fases específicas (membros ideais das soluções sólidas).

As variáveis que compõe um diagrama de fases podem ser intensivas (i) e extensivas (e). Pressão (P), temperatura (T) e potencial químico (μ_i) são intensivas; e Ph, E (energia interna), S (entropia), H (entalpia), G (energia livre de Gibbs), n_i (número de mols de um componente), M (massa) e V (volume) são variáveis extensivas.

Em termodinâmica, a entropia (S) significa o grau de desordem de um sistema e a entalpia (H) verifica o balanço térmico - se a reação libera calor (exotérmica, $\Delta H > 0$) ou não (endotérmica, $\Delta H < 0$). A energia livre de Gibbs (ΔG), por sua vez, nada mais é que uma relação entre a variação de entalpia e entropia envolvendo a temperatura. Ou seja, ela define se a reação será espontânea (ou não) e qual a direção em que a mesma ocorrerá (sentido dos reagentes ou produtos).

O estudo e análise da relação das fases minerais em qualquer sistema modelo é facilitado se houver uma representação adequada da composição mineral e volumétrica da rocha de interesse; que podem ser adquiridas graficamente e algebricamente. Graficamente, o estudo pode ser feito com auxílio de diagramas em barra, ternários e/ou tridimensionais, para representar sistemas com dois, três ou quatro componentes, respectivamente. A vantagem da representação gráfica é o entendimento do contexto termodinâmico a partir das relações das fases em equilíbrio dentro do diagrama.

No entanto, grande desvantagem é a limitação de até três ou quatro eixos composicionais no diagrama. Sistemas com mais componentes não podem ser registrados graficamente devido à necessidade de um diagrama de quatro (ou mais) dimensões; exigindo, portanto, técnicas algébricas. Dependendo do tamanho do sistema, essa situação pode ser contornada, caso haja fases ocorrendo em excesso.

Muitos são os tipos de projeções de diagramas de fases: grades petrogenéticas P x T (ex: diagrama de polimorfos de Al_2SiO_5); diagramas composicionais, quimiográficos ou de compatibilidade (ex: AFM); e pseudosseções. A produção de diagrama de fases pode ser feita através de resultados de petrologia experimental, por cálculos calorimétricos, ou ainda, por programas baseados em conjunto de dados termodinâmicos internamente consistentes (ex: THERMOCALC, TWK, Perple_X, etc).

Neste trabalho faz-se uma abordagem termodinâmica pelo cálculo de P e T através do *software* THERMOCALC 3.4 com o banco de dados versão 6.2 de Holland e Powell (2011), White *et al.* (2014), usando o método *average PT*.

Para a construção de diagrama de fases é necessário compreender as imposições da Regra de Fases de Gibbs (tratadas pelas Regras de Schreinemakers) pois permite interpretar equilíbrios de fase em sistemas heterogêneos.

A Regra de Fase de Gibbs fornece a fundamentação teórica baseada na termodinâmica para caracterizar o estado químico de um sistema e prever as relações de equilíbrio das fases (minerais, fundidos, líquidos, vapores) presentes em função de condições físicas. No entendimento mais simples dos diagramas de fase, as montagens estáveis de fase (mineral) são representadas como "campos" no "espaço PT", e os limites entre as montagens estáveis de fase são definidos por linhas (ou curvas) que representam reações entre os conjuntos de fases. A regra de fases é expressa pela seguinte formulação (equação 1):

$$F + L = C + 2 \quad (\text{Equação 1})$$

F é número de fases do sistema, C o número de componentes e L é grau de liberdade (variância). Uma fase é qualquer material fisicamente separável no sistema. Todo mineral é uma fase (incluindo polimorfos). É possível ter duas ou mais fases no mesmo estado da matéria (por exemplo, montagens minerais sólidas, silicato imiscível e derretimento de sulfetos, líquidos imiscíveis como água e hidrocarbonetos). As fases podem ser compostos puros ou misturas como sólidos ou soluções aquosas, mas devem "comportar-se" como uma substância coerente com propriedades químicas e físicas fixas.

C é o número mínimo de componentes químicos necessários para constituir todas as fases do sistema (por exemplo, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , etc.). F é referente ao número de variáveis (por exemplo, pressão e temperatura) que podem ser alteradas independentemente sem alterar o estado do sistema (isto é, o número de fases e suas composições são constantes).

Neste caso, dependendo da variância (grau de liberdade), três tipos comuns de equilíbrio são possíveis:

- I. Equilíbrios invariantes, nos quais nenhuma variável pode ser alterada (ex: P e T); em um diagrama de fases, isso é representado como um ponto invariante singular;
- II. Equilíbrios univariantes, nos quais uma variável pode ser alterada (ex: P ou T) independentemente, mas para manter o estado do sistema, deve haver uma alteração correspondente na outra variável. Isso é chamado de curva univariante;
- III. Equilíbrios divergentes, nos quais duas variáveis (ex: P e T) podem mudar independentemente, sem alterar o estado do sistema (mas limitados pelas condições definidas pelos equilíbrios univariantes).

1.4.1. Cálculos termobarométricos (*Average PT*)

A geotermobarometria consiste na estimativa das condições de pressão e temperatura de metamorfismo a que uma rocha foi submetida assumindo-se que associações minerais encontram-se em equilíbrio metamórfico (BUCHER & FREY 1994). Estas associações minerais podem representar o pico de metamorfismo ou o retrometamorfismo, indicando assim momentos específicos da trajetória P-T da rocha.

Para os estudos de termobarometria, utilizou-se neste trabalho o programa THERMOCALC versão 3.40 para o cálculo de P e T através da função *average PT* (avPT). Segundo Powell, R. & Holland (1994, 2008), a lógica por trás dos cálculos do avPT é simples. Dado um conjunto de minerais que é interpretado como estando em equilíbrio, os membros finais dos minerais (para os quais existem dados termodinâmicos no conjunto de banco de dados internamente consistentes) são usados para escrever um conjunto independente de reações. Para cada reação, uma relação de equilíbrio pode ser escrita (equação 2):

$$0 = \Delta G_0 + RT \ln K \quad (\text{Equação 2})$$

Em que ΔG_0 é uma função de apenas P e T, enquanto K é uma função da composição dos minerais. Se os membros finais estão em um sistema de óxido n e existem m membros finais, existem $m - n$ relações de equilíbrio.

Nos cálculos do tipo avPT, sabe-se as atividades das composições dos minerais que são usadas para calcular o K; portanto, cada relação de equilíbrio é uma linha em PT. As informações para as várias reações independentes são então combinadas no sentido de mínimos quadrados para calcular as condições de formação. Isso pode ser feito de várias maneiras, e dependendo da quantidade de "informação" existente na assembléia mineral, as vezes, pode não ser possível calcular P e T (informação insuficiente).

Existem diferentes maneiras de reconhecer os dados, tanto por cálculos de avP, avT ou avPT. Para obter P médio (ou avP), nomeia-se um T ou uma série de T e o *software* THERMOCALC calcula uma série de valores de avP a partir do conjunto de relações de equilíbrio. Para obter T médio (ou avT), ocorre o mesmo processo: nomeia-se um P ou uma série de P e o *software* calcula uma série de valores de avT.

No caso do presente trabalho, o estudo se pauta na obtenção de PT médio. Desse modo, P e T são calculados a partir do conjunto de relações de minerais em equilíbrio existentes nas associações de pico e retrometamorfismo.

2. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

2.1 Etapa Preparatória

Durante esta etapa, foi discutida a viabilidade do projeto para a região de Luminárias, possibilitada através de revisão e levantamento bibliográfico regional. O mesmo abrange tópicos de caracterização mineralógica, estratigráfica, geomorfológica e estrutural da *Nappe* de Luminárias.

Tal processo preliminar capacita o aluno a assimilar as informações da literatura com o entendimento do contexto geológico regional. A presente etapa, conta com a busca pela informação geológica da área de estudo por meio da pesquisa acerca de dados pré-existentes: trabalhos, mapas e amostras (estas do acervo da orientadora).

2.2 Etapa de Atividade de Campo

O trabalho de campo, realizado em campanha ocorrida entre os dias 11 e 14 de Fevereiro de 2019, foi fundamentado nas atividades de coleta de amostras, descrição e interpretação dos afloramentos. As correlações das informações obtidas em campo, juntamente com as já analisadas durante a etapa preliminar de estudo, são resultados – tais como a caracterização da área de acordo com contexto geológico - esperados para esta etapa. Dentre os materiais selecionados para estudo, houve separação de amostras e dados pré coletados em campos anteriores pelo grupo de pesquisa (orientadora/coorientador).

A localização geográfica e as respectivas amostras coletadas em cada ponto de parada para estudo e coleta de dados são apresentadas na Tabela 01 a seguir:

Tabela 01. Localização dos pontos. Coordenadas geográficas em UTM (Zona 23K, WGS84).

Pontos	LR-08	LR-09	LR-17	LR-53	LR-54	LR-69B	LR-70	LR-71	LR-77	LR-78B
UTME	507538	507731	511432	508987	505190	504202	509005	510387	510942	511254
UTM S	7619042	7617820	7620562	7618214	7616186	7616678	7618212	7618289	7621303	7618155

2.3 Etapa Laboratorial

Nesta etapa houve estudo e análise das amostras obtidas em campo. Com relação a atividade laboratorial, expõem-se a seguir uma breve introdução dos materiais e métodos utilizados:

- Petrografia
- Imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
- Análise química mineral por Microsonda Eletrônica (EPMA)
- Cálculos termobarométricos (*Average PT*)

2.3.1. Petrografia

Das amostras coletadas em campo e das já existentes no acervo de pesquisa da orientadora/coorientador; dez (10) foram selecionadas para confecção de lâminas polidas - realizadas pelos técnicos do Laboratório de Laminação do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM). As dez lâminas escolhidas (LR-08, LR-09, LR-17, LR-53, LR-54, LR-69B, LR-70, LR-71, LR-77, LR-78B) passaram por estudos petrográfico e microtectônico para a caracterização das associações minerais metamórficas e fases em equilíbrio, bem como caracterização de suas relações texturais e estruturais.

As análises microscópicas foram realizadas à luz transmitida, em Microscópio Petrográfico Carl Zeiss, modelo Axioskop 40; do Laboratório Didático de Microscopia do DPM – IGCE, com aumentos de 2.5x, 5x, 10x e 40x (vezes). A documentação fotomicrográfica das fases minerais, texturas e estruturas foi feita utilizando-se câmera Canon modelo DS126201 acoplada ao microscópio Zeiss modelo Axioskop 40. A identificação do nome dos minerais nas fotomicrografias foi realizada com base na lista de abreviações de Kretz (1983).

2.3.2. Imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nesta etapa, utilizou-se o Microscópio Eletrônico JEOL modelo JSM-6010 LA, com detectores de elétrons secundários (SE) retroespalhados (BSE) e espectrômetro de Raios-x de dispersão por energia (EDS), do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do DPM.

Selecionou-se quatro (4) seções delgadas (amostras LR-09, LR-17, LR-53 e LR-54) que, antes de inseridas no MEV, foram metalizadas por carbono. A técnica permite a identificação e mapeamento dos elementos químicos presentes no material por análises pontuais semi-quantitativas de Raios-x por dispersão de energia (EDS). Tal método possibilita a produção de imagens (imageamento) de varredura de elétrons de lâminas polidas, e podem fornecer informações referentes à morfologia e a composição química mineral. A aceleração da corrente foi de 15 keV (valores de corrente).

A identificação dos elementos químicos presentes nos minerais é feita por análises pontuais semi-quantitativas de Raios-x por dispersão de energia. Os resultados, por sua vez, são dados em porcentagem molar e de massa de óxidos (Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , FeO , SiO_2 , P_2O_5 , CaO , etc) para cada mineral (análise pontual).

2.3.3. Análise da química mineral por Microsonda Eletrônica

No Laboratório de Microsonda Eletrônica do DPM, utilizou-se o equipamento da marca JEOL, modelo JXA8230 SuperProbe; equipado com 5 detectores WDS, detector EDS do tipo SSD, detectores de elétrons secundários (SEI) e elétrons retroespalhados (BSE).

Esta etapa compreendeu estudos de química mineral em duas (2) lâminas delgadas (LR-09 e LR-54) previamente estudadas no MEV. Estas foram selecionadas para análise na Microsonda Eletrônica (“*Electron Micro-Probe Analysis*” - EPMA). Os dados de química mineral obtidos servem como base para quantificar a composição química de minerais formadores de rocha, bem como auxiliar na discussão da variação química dos minerais ao longo do gradiente metamórfico.

Foram realizadas análises quantitativas usando espectrometria por comprimento de onda dispersiva (WDS) em cristais de granada, plagioclásio, biotita, muscovita e clorita; minerais escolhidos por critérios petrográficos de acordo com a paragênese de interesse. Utilizou-se aceleração de 15keV e corrente de 20nA, feixe focado de 5µm nas análises quantitativas. O tempo de contagem foi de 20s para os elementos maiores e de 30s para os elementos menores, igualmente distribuídos no pico e no background.

Para obter as composições minerais, foram realizadas análises pontuais e em perfis (exclusivamente na granada). Os cálculos das fórmulas estruturais dos minerais foram realizados pelo *software* “AX_62” de Tim Holland, disponíveis no site:

<https://www.esc.cam.ac.uk/research/research-groups/research-projects/tim-hollands-software-pages/ax>).

Mapas composicionais foram obtidos por microsonda eletrônica. Os mapas foram gerados usando uma aceleração de corrente de 15 keV e uma corrente de 100 nA. O tamanho dos pixels foi de 10 µm e o tempo por pixel foi de 100 ms. Os mapas composicionais confeccionados foram processados utilizando o *software* XMapTools 2.5.1 (LANARI *et al.*, 2014, 2019).

2.3.4. Termobarometria

Para o estudo termobarométrico, escolheu-se a função *average PT* no módulo *calcmode* = 2 (referente a “*average pressure-temperature calculations*”) para o cálculo de P e T da rocha em questão através do *software* THERMOCALC (POWELL & HOLLAND, 1988; POWELL *et al.* 1998) versão 3.40 com banco de dados ds62. Tal *software* utiliza bancos de dados termodinâmicos internamente consistentes para formar um gráfico considerando P e T como variáveis e as linhas/campos de estabilidade em que a associação mineral da rocha se forma.

Para dar início à construção do cálculo *average PT*, é necessário ter em mãos a descrição petrográfica da rocha e os dados da composição química mineral obtidos pela Microsonda Eletrônica. Sabendo-se as associações minerais em equilíbrio do metamorfismo progressivo, regressivo e de pico metamórfico, faz-se os cálculos de determinação de P e T nestas condições.

2.4 Etapa de Confeção da monografia

O Mapa Geológico e de Pontos em escala 1:200.000 (Apêndice I), que contém a apresentação da localização dos pontos estudados, foi confeccionado a partir de compilação de dados de mapeamento presente nas folhas Caxambu, Lavras, Nepomuceno e Varginha; respectivamente dos trabalhos de Trouw *et al.* (2003), Queménéuer *et al.* (2003), Peternel e Castro (2008), e Paciullo e Ribeiro (2008).

Neste mesmo mapa, os pontos estudados que passaram por estudo petrográfico, microtectônico e de química mineral (Microscopia Eletrônica de Varredura e Microsonda Eletrônica) são apresentados com legendas distintas de modo a caracterizar cada etapa de processo laboratorial.

Os resultados obtidos a partir da caracterização petrográfica, são apresentados na forma de texto corrido dentro do item (4.1.1. Petrografia) e na forma de fichas descritivas no Apêndice II. As informações sobre as texturas, estruturas e mineralogia foram correlacionadas com os dados de trabalhos anteriores realizados na região.

Os produtos obtidos a partir de química mineral são apresentados em tabelas no Apêndice III e reorganizados em forma de texto, gráficos e diagramas para interpretação final dos dados obtidos. Após o tratamento dos dados e interpretação dos resultados seguiu-se a etapa de consolidação dos produtos da pesquisa e a elaboração do trabalho final, estruturado e subdividido nos seguintes capítulos: 1 – Introdução; 2 – Métodos e Etapas de Trabalho; 3 – Geologia Regional; 4 – Resultados; 5 – Discussão dos Resultados 6 – Conclusões e 7 – Referências Bibliográficas.

3. GEOLOGIA REGIONAL

3.1. Contexto Geotectônico

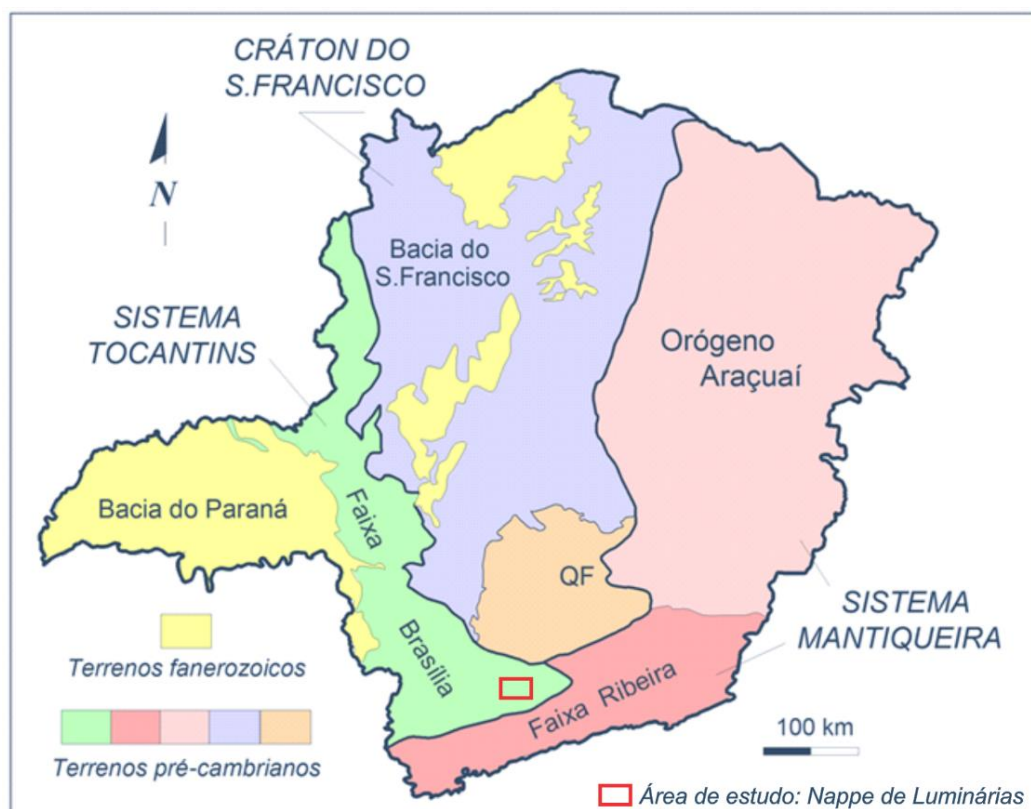
No contexto da Plataforma Sul-americana, o Brasil ocupa grande e considerável extensão territorial, abrangendo tanto porções antigas - que formam o substrato continental de rochas de idades pré-cambrianas - quanto os terrenos jovens, que compõem a cobertura formada por rochas de idades fanerozoicas (ALMEIDA, 1967; ALMEIDA *et al.*, 1981). Tais porções antigas (pré-cambrianas), quando expostas, são denominada s escudos; e na literatura, dentro do território brasileiro distinguem-se os escudos Atlântico, das Guianas e do Brasil Central (ALMEIDA, 1967; ALMEIDA *et al.*, 1981).

Os escudos podem ser subdivididos em dois tipos de terrenos pré-cambrianos: os crátons e os sistemas orogênicos brasileiros (ou faixas móveis). Os terrenos jovens, por sua vez, são representados por bacias sedimentares fanerozóicas (ALMEIDA *et al.*, 1981). O estado de Minas Gerais abrange uma considerável extensão sob rochas do Escudo Atlântico, cujo território é subdividido entre as províncias estruturais do Cráton do São Francisco, Província Tocantins (Faixa Brasília) e Província Mantiqueira (Orógeno Araçuaí e Faixa Ribeira) (ALMEIDA, 1967; ALMEIDA *et al.*, 1981). As porções restantes do território mineiro, que são recobertas por terrenos fanerozóicos, ficam restritas à região do Triângulo Mineiro (rochas sedimentares da Bacia do Paraná) e parte do vale do São Francisco.

Cabe aqui ressaltar que as áreas cratônicas são tectonicamente estáveis, portanto, não há processos orogenéticos atuando sob as mesmas. Isso implica que, muitas vezes, os crátons sofrem depressões em seu substrato e são recobertos por rochas sedimentares fanerozoicas (como é o caso da Bacia Intracratônica do São Francisco). Em contraposição, os sistemas orogênicos são cadeias de montanhas antigas soerguidas por uma ativa tectônica ao final da Era Neoproterozoica cujas colisões e orogêneses são associados ao Evento Brasileiro (ALMEIDA *et al.*, 1981; 2000, ALMEIDA & HASUI 1984, BRITO-NEVES *et al.*, 1999, CAMPOS NETO 2000).

A Figura 7 indica a compartimentação geológica do estado de Minas Gerais, de acordo com os terrenos pré-cambrianos e fanerozóicos, destacando em polígono vermelho, a área de estudo.

Figura 7. Compartimentação geológica de Minas Gerais.



Fonte: extraído de CODEMGE em História Geológica de Minas Gerais.

Segundo a literatura (PETERNEL *et al.*, 2005; CAMPOS NETO *et al.*, 2011), a região de Luminárias se insere nesse contexto tectônico orogenético, onde as Faixas Brasília e Ribeira, bordejando o sul do Cráton do São Francisco, registram importantes processos metamórficos, magmáticos e sedimentares do Neoproterozoico relacionados ao Evento Brasileiro (ou Orogênese Brasileira) de colagem e amalgamação do supercontinente Gondwana ocidental (BRITO NEVES *et al.*, 1999; CAMPOS NETO, 2000).

3.1.1 Faixa Brasília

A Faixa Brasília (ALMEIDA, 1977; MARINI *et al.*, 1981; FUCK *et al.*, 1994; DARDENNE, 2000; VALERIANO *et al.*, 2004, 2008) se desenvolveu em resposta a convergência de três blocos continentais que correspondem atualmente aos crátons Amazônico, do São Francisco e ao Bloco Paranapanema (MANTOVANI & BLEY, 2005). Consiste num conjunto de terrenos e sistemas de cavalgamento com vergência para leste em direção ao Cráton do São Francisco, sendo subdividida em dois segmentos: setentrional e meridional.

O Orógeno Brasília Meridional foi alvo de estudo desde a década de 50, e depois intensificados entre os anos 1980 e 2000. Heinz Ebert foi o primeiro a estudar as rochas da região, identificando dois complexos: Arqueano e Algonquiano. Ebert (1956a, 1956b) considerou o Complexo Arqueano como rochas do embasamento divididas em Sequências Granítico-Migmatíticas, rochas sedimentares clásticas e metabasitos da Série Barbacena, e mica xistos da Formação Lafaiete (ambas de alto grau metamórfico). O Complexo Algonquiano, por sua vez, seria formado por sequências metassedimentares do Grupo São João Del Rei, divididas em Formações Prados (EBERT, 1956a), Barroso (EBERT, 1956b), Carandaí (EBERT, 1955) e Série Andrelândia.

Nos anos 70, Ebert estuda com mais afinco a região, subdividindo-a em Ciclo Barbacena, Ciclo Minas e Ciclo Paraíba. Ebert (1971, 1984) considera o primeiro como embasamento, formada pelos Grupos Amparo (meta-arcósios, paragneisses e rochas calciossilicáticas) e Barbacena (greenstone belts). O Ciclo Minas é formado por filitos, quartzitos e gonditos do Grupo Minas e por mica xistos da Formação Lafaiete. Por fim, o Ciclo Paraíba seria formado pelos Grupos Andrelândia e São João Del Rei.

Durante os anos 80 e 90 intensificaram-se os estudos na porção sul do Orógeno Brasília. Ribeiro e Heilbron (1982); Trouw, Ribeiro e Paciullo (1983, 1986); Heilbron (1984, 1985); Ribeiro, Paciullo (1989); Ribeiro *et al.* (1995), Paciullo *et al.* (1996, 1998); Trow, Paciullo, Ribeiro (1998); e Campos Neto, Caby (1999) são trabalhos mais recorrentes na literatura acerca da identificação das unidades, e caracterização metamórfica e estrutural das mesmas.

Trouw *et al.* (1980) mapearam a região e identificaram biotita xisto (quartzo+plagioclásio+carbonato+granada) relativamente homogêneo e sem estratificação sedimentar reconhecível, equivalente à mesma litologia aflorante em São João Del Rei reconhecida por Ebert (1956) como Formação Carandaí.

Nesse mesmo trabalho, Trouw *et al.* (1980) identificaram entre os grupos São João Del Rei e Andrelândia (EBERT 1956a), metassedimentos com características intermediárias e transitórias. Estas foram agrupadas no Grupo Carrancas, subdividido em Formação São Tomé

das Letras (quartzitos) e Formação Campestre (intercalação de quartzitos e filitos/xistos). Trouw *et al.* (1982) analisam a geologia estrutural e suas implicações para com o metamorfismo das unidades e grupos apresentados em trabalho anterior (TROUW *et al.*, 1980).

Ribeiro e Heilbron (1982) identificam as rochas transicionais de Trouw *et al.* (1980) como Fácies São Tomé das Letras – Conceição do Rio Verde, e considerou os Grupos Carrancas (Formação Campestre e São Tomé das Letras), São João Del Rei (biotita xisto) e Andrelândia (quartzitos, filitos, xistos grafitosos e biotita xistos) como variações faciológicas de um único ciclo deposicional descrito em Ebert (1956a,1956b).

Os mesmos autores também interpretaram os metassedimentos da região como dois conjuntos: autóctone e alóctone. O autóctone prevê os filitos grafitosos e biotita xistos que estão em contato direto com o embasamento (na região de Itumirim e Itutinga), compondo uma faixa com mudança de fácies dos filitos de São João Del Rei. O conjunto alóctone considera os quartzitos da Formação São Tomé das Letras, a alternância de quartzitos, filitos e xistos grafitosos da Formação Campestre, Fácies Três Pontas-Luminárias e Fácies São Tomé das Letras – Conceição do Rio Verde como fases transicionais entre si, todas do Grupo Carrancas aflorantes na região de Luminárias e na faixa Itumirim-Carrancas-Minduri.

Trouw *et al.* (1983) consideram as litologias do embasamento (gnaisse bandado) e os metassedimentos distribuídos entre Grupo São João Del Rei (subdivididos em cinco unidades A, B, C, D e E), Carrancas e Andrelândia (subdivididos em quatro unidades informais) segundo apresentado na Tabela 02 a seguir.

Vale ressaltar que esta é a primeira vez que surge a designação “Santo Antônio” em referência ao biotita xisto do Grupo Andrelândia.

Tabela 02. Grupos e respectivas unidades/formações mapeadas por Trouw *et al.* (1983).

GRUPO SÃO JOÃO DEL REI		GRUPO CARRANCAS	GRUPO ANDRELÂNDIA		
Filitos com lentes de rochas calcárias, calco xistos e horizontes grafitosos (D)	Biotita xisto ou filito com veios de quartzo (E)	Formação Campestre (Trouw <i>et al.</i> , 1980)	Diques e veios de pegmatito compostos de quartzo, feldspato, muscovita, turmalina e pouca granada		
Conglomerado intercalado com ardósia e quartzito (C)			Quartzito com xisto intercalado	Biotita xisto Santo Antônio associado a lentes de quartzito e rochas cálcio-silicáticas	Xisto Cachoeira das Marias (variação faciológica do Biotita Xisto Santo Antônio)
Ardósia branca (B)		Formação São Tomé das Letras (Trouw <i>et al.</i> , 1980)			
Quartzitos puros, microconglomerados e quartzito micáceo (A)	Quartzito Itutinga				
EMBASAMENTO*					

Fonte. Extraído de Teixeira (2015).

Trouw *et al.* (1986) apresentam novos estudos embasados em mapeamento de detalhe (1:25.000) que permitiram a classificação do Grupo São João Del Rei em fácies de

denominação homônima e Fácies Luminárias; bem como nova subdivisão em cinco unidades (A, B, C, D e E), agora para as rochas do Grupo Andrelândia (Tabela 03). Classificam o Biotita xisto Santo Antônio (TROUW *et al.*, 1983) como pertencente à Unidade D, e as unidades A e B correspondentes à Fácies Luminárias do Grupo São João Del Rei.

Tabela 03. Grupos com respectivas fácies e unidades mapeadas em Trouw *et al.* (1986).

GRUPO SÃO JOÃO DEL REI	Fácies São João Del Rei	Fácies Luminárias	GRUPO ANDRELÂNDIA	Unidade E Xistos grosseiros ricos em plagioclásio, granada, cianita/sillimanita e rutilo, intercalados com gnaisses, anfibolitos, quartzo xistos, quartzitos, biotita-xisto, rochas cálcio-silicáticas e metaultramáficas
	Filitos cinzentos intercalados com quartzitos e biotita-clorita filito. Bandas de biotita gnaiss fino	Quartzito com mica verde intercalado com os filitos; Biotita xisto com feldspato, gradando para gnaiss fino; Biotita gnaiss fino, com anfibolito, rochas ultramáficas; lentes de metacalcáreo		Unidade D Biotita xisto Santo Antônio (Trouw <i>et al.</i> , 1983)
	Filitos listrados, calcifilitos e lentes de metacalcáreo			Unidade C Xistos grosseiros, ricos em biotita, muscovita e granada, com quartzitos e anfibolitos subordinados
	Quartzitos, metasiltitos e conglomerados			Unidade B Biotita gnaisses finos intercalados com quartzitos micáceos e filitos/xistos cinzentos, com biotita xisto e anfibolitos
				Unidade A Biotita gnaiss com anfibolitos e metaultramáficas
EMBASAMENTO*				

Fonte. Extraído de Teixeira (2015).

Trabalhos de Ribeiro e Heilbron (1982); Trouw, Ribeiro e Paciullo (1983, 1986); Heilbron (1984, 1985) consideravam uma única bacia deposicional proterozóica para as rochas metassedimentares da região, de acordo com a subdivisão de Ebert (1956, 1971, 1984). Andreis *et al.* (1989) e Ribeiro *et al.* (1990) separam as unidades em ciclos deposicionais novos: Tiradentes, Lenheiros, Carandaí e Andrelândia.

Segundo Trouw *et al.* (2000), os ciclos deposicionais Tiradentes e Lenheiros são os primeiros a se depositar sobre o embasamento, e ambos são separados dos ciclos Carandaí e Andrelândia por uma discordância angular (RIBEIRO; PACIULLO; ANDREIS 1990).

O Ciclo Depositional Andrelândia (CDA), em Paciullo *et al.* (1993), é descrito e dividido em duas sequências (CDA I e CDA II) depositadas em uma bacia intracratônica em margem continental passiva; onde CDA I seria correspondente ao início e abertura da bacia, e CDA II, ambiente de deposição de sedimentos em condições marinhas profundas. Mais tarde, Paciullo *et al.* (1996) reformulam a classificação, para Sequência Depositional São Vicente (equivalente

a CDA I) e Sequência Depositional Andrelândia (equivalente a CDA II). Esta última, por sua vez, abrange o Biotita xisto Santo Antônio de Trouw *et al.* (1983).

Ribeiro *et al.* (1995) redefinem os ciclos em bacias deposicionais: Bacia São João del Rei (Ciclos Depositionais Tiradentes e Lenheiros), Bacia Carandaí e Bacia Andrelândia; respectivamente, de 1,8 a 1,3 Ga, 1,3 a 1 Ga, e 1 a 0,6 Ga. Por fim, a Bacia Andrelândia é redefinida como Megassequência Andrelândia por Trouw *et al.* (2000).

A Megassequência Andrelândia, de idade neoproterozóica, foi estudada por Paciullo (1997), Paciullo *et al.* (2000), Ribeiro *et al.* (1995; 2003), Campos Neto (2000) e Heilbron *et al.* (2000).

O Orógeno Brasília Meridional é, portanto, definido por sistemas de *Nappes* com empilhamento tectônico vergente para E-ESSE. Campos Neto (2004) agrupa nos conjuntos: Sistema de *Nappes* Carrancas (ao qual se inclui a *Nappe* de Luminárias), *Nappe* Lima Duarte, e Terreno Andrelândia (subdividido em *Nappes* Inferiores e Superiores). A Tabela 04 a seguir, expõe simplificada a sucessão estratigráfica acima mencionada.

Tabela 04. Contexto Tectônico segundo Campos Neto (2004).

SISTEMA OROGÊNICO TOCANTINS MERIDIONAL	TERRENO ANDRELÂNDIA Equivale às unidades Na ₅ e Na ₆ de Trouw <i>et al.</i> (2000)	Nappes Superiores: Três Pontas- Varginha, Pouso Alto e <i>Klippe</i> Carvalhos
		Nappes Inferiores: Carmo da Cachoeira e Aiuruoca-Andrelândia
	NAPPE LIMA DUARTE Equivale à parte da unidade Na ₃ de Trouw <i>et al.</i> (2000)	
	SISTEMA DE NAPPES CARRANCAS – Equivale às unidades Na ₁ , Na ₂ , Na ₃ , Na ₄ e parte da unidade Na ₅ de Trouw <i>et al.</i> (2000)	Nappe Luminárias, <i>Klippe</i> Carrancas-Itumirim, alóctone Serra da Bandeira
		Alóctone Madre de Deus
EMBASAMENTO		

Fonte. Extraído de Teixeira (2015).

3.1.2 Zona de Interferência entre as Faixas Brasília e Ribeira

Há muita discussão na literatura acerca da evolução tectônica nas proximidades do contato entre as Faixas Brasília e Ribeira. Há autores que discutem a hipótese de o contato entre as faixas terem se formado independentemente, em contato abrupto e sem relação direta de uma com a outra, exclusivamente devido ao metamorfismo e deformação associados a Orogenia Brasileira (CAMPOS NETO 2000, CAMPOS NETO *et al.* 2004, 2007, 2011, WESTIN *et al.* 2016).

Peternel *et al.* (2005), Trouw *et al.* (2000, 2013), Heilbron *et al.* (2008, 2017) e Coelho *et al.* (2017), por sua vez, entendem que houve evento de superposição da deformação e do metamorfismo da Faixa Ribeira, mais nova, sobre a Brasília, gerando uma zona de interferência entre ambas. Tal divergência de hipóteses tectônicas alimenta a necessidade de maiores discussões, as quais serão apresentadas com o estudo do presente trabalho.

Segundo Heilbron *et al.* (2004), a estruturação principal da Faixa Ribeira e sua Zona de Interferência com a Faixa Brasília é resultado de processos estritamente acrescionários da Orogênese Brasileira, e que a superposição de uma sobre a outra se dá pelo fato das rochas do sistema Mantiqueira terem se formado após o soerguimento da porção do sistema Tocantins ali presente; o que dá origem a um quadro geológico de alta complexidade (HEILBRON *et al.*, 2017).

A Faixa Ribeira, por sua vez, tem seu embasamento composto por gnaisses e granitos de idades arqueanas / paleoproterozoicas e faixas tipo granito-greenstone separados de sucessões metassedimentares por importante discordância regional, ora litológica, ora angular (PETERNEL *et al.*, 2005). A mais velha das unidades é a sequência São João Del Rei, seguida pelas sequências Tiradentes e Carandaí (mesoproterozóicas), e Neoproterozóicas da Megassequência Andrelândia (PACIULLO *et al.*, 2003); compondo um complexo padrão tectônico caracterizado por empilhamento dos terrenos que convergiram no sentido NW-SE e colidiram obliquamente com o cráton gerando estruturas como falhas de empurrão e zonas de cisalhamento transpressivas.

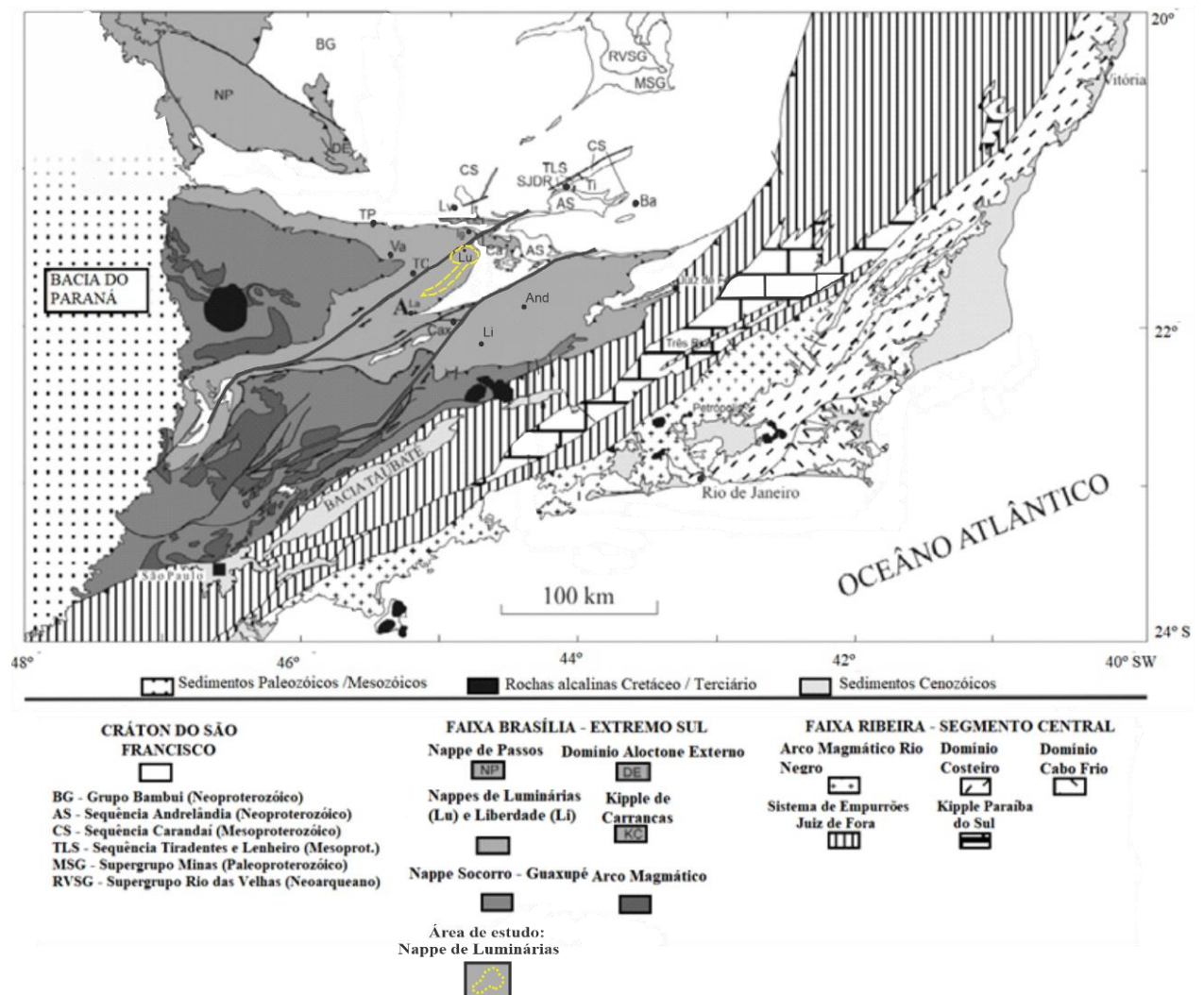
Segundo Trouw *et al.* (2000) e Heilbron *et al.* (2004) a evolução do segmento meridional da Faixa Brasília e do segmento central da Faixa Ribeira é dividida em três estágios evolutivos:

I. O primeiro estágio, entre 640 e 600 Ma (CAMPOS NETO & CABY, 2000), corresponde ao fechamento do oceano Brasilides em resposta a subducção da paleoplaca São Franciscana para W e a colisão desta com o bloco Paranapanema. Este primeiro estágio corresponde à geração do sistema de *Nappes* inferior (Klippe de Carrancas e *Nappe* Luminárias-Liberdade) e do sistema de *Nappes* superior (Socorro-Guaxupé);

II. O segundo estágio, responsável pela estruturação da Faixa Ribeira entre 590 e 550 Ma (MACHADO *et al.*, 1996), contou com eventos de subducção do Cráton do São Francisco para SE e posterior colisão com a microplaca da Serra do Mar, formando o Arco Magmático Rio Negro.

III. O terceiro estágio está relacionado à colisão do terreno Cabo Frio com o Arco Magmático Rio Negro em torno de 520 Ma (SCHMITT *et al.*, 2001), encerrando a cadeia de eventos que consolidou a estruturação final (exposto no mapa geológico da Figura 8) de ambas as faixas supracitadas.

Figura 8. Mapa geológico simplificado da região sudeste brasileira com subdivisão entre o Cráton São Francisco e as Faixas Brasília e Ribeira. Destaque para área de estudo, menção à *Nappe* de Luminárias.



Fonte. Extraído de Peternel *et al.* (2005). Modificado de Trouw *et al.* (2000).

3.2. Geologia da *Nappe* de Luminárias

A *Nappe* de Luminárias, como citado anteriormente, constitui uma das *Nappes* do sistema de *Nappes* Carrancas transpostas da Faixa Brasília com vergência E-ESE, cujas rochas aflorantes correspondem a uma sequência alóctone de metassedimentos proterozóicos empurradas sobre um conjunto de rochas do embasamento arqueano (Heilbron *et al.*, 2004). Estas sucessões foram divididas em três megassequências dominadas por rochas metassedimentares: Andrelândia, Carandaí e São João Del Rei. As Megassequências Carandaí e São João Del Rei são sucessões intracontinentais de idade paleo a mesoproterozóicas, definidas por Ribeiro *et al.* (1995).

Na *Nappe* de Luminárias, afloram rochas da Megassequência Andrelândia composta por associações de litofácies distintas e rochas metaígneas associadas, definidas por Paciullo, Ribeiro e Trouw (2003), Paciullo *et al.* (2000). Esta megassequência ocorre em todos os domínios que integram o Terreno Ocidental da Faixa Ribeira (domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora), bem como nos terrenos alóctones (*Nappes*) que ocorrem na porção sul da Faixa Brasília.

Trouw *et al.* (2000) e Paciullo *et al.* (2000; 2003) subdividem a Megassequência Andrelândia em duas sequências deposicionais: a sequência basal compreende quatro associações de litofácies distintas (unidades Na₁ a Na₄), denominada Sequência Carrancas; e a sequência superior, atualmente referida como Sequência Serra do Turvo, compreende a litofácies de topo (unidades Na₅). Uma discordância interna separa as duas sequências supracitadas, e ambas as associações gradam lateralmente para a unidade Na₆ que representa sucessões distais da bacia, depositadas contemporaneamente às outras associações (PETERNEL *et al.*, 2005). As Figura 9 e 10 ilustram respectivamente a compartimentação e a estratigrafia da Megassequência Andrelândia (em seis unidades) de acordo com as subdivisões expostas acima.

A Sequência Carrancas, definida por Paciullo *et al.* (2000) e Paciullo, Ribeiro e Trouw (2003), é composta pelas seguintes unidades: biotita gnaisses finos bandados com intercalações de anfibolitos (Na₁); biotita gnaisses finos bandados com intercalações de quartzitos, xistos e anfibolitos (Na₂); quartzitos com xistos e escassos conglomerados intercalados (Na₃); e uma intrínseca intercalação de grafita filitos/xistos com quartzitos (Na₄).

Paciullo *et al.* (2008) reescreve a litoestratigrafia da Megassequência Andrelândia classificando a Sequência Depositional Carrancas por sucessão metassedimentar basal e mediana do Grupo Andrelândia que inclui paragneisses bandados com intercalações de anfibolitos, quartzitos e filitos/xistos cinzentos com quartzitos na base (Unidade São Vicente)

seguida verticalmente por quartzitos com micas esverdeadas (Unidade São Tomé das Letras) e filitos/xistos cinzentos (Unidade Campestre) para o topo, correspondentes às unidades Na₁ a Na₄ (PACIULLO *et al.*, 2000; PACIULLO, RIBEIRO e TROUW, 2003).

A Sequência Serra do Turvo, definida por Paciullo *et al.* (2000) e Paciullo, Ribeiro e Trouw (2003), recobre as unidades da Sequência Carrancas e do embasamento, e compreende: clorita-biotita-filitos e plagioclásio biotita xisto/gnaiss de granulação fina a média e sem bandamento, com fragmentos isolados de granitoides do embasamento (unidade Na₅); e biotita xisto a gnaiss, de granulometria grossa, com intercalações de anfibolito, gondito, quartzito e rochas cálcio-silicáticas (unidade Na₆) referente a associação de topo.

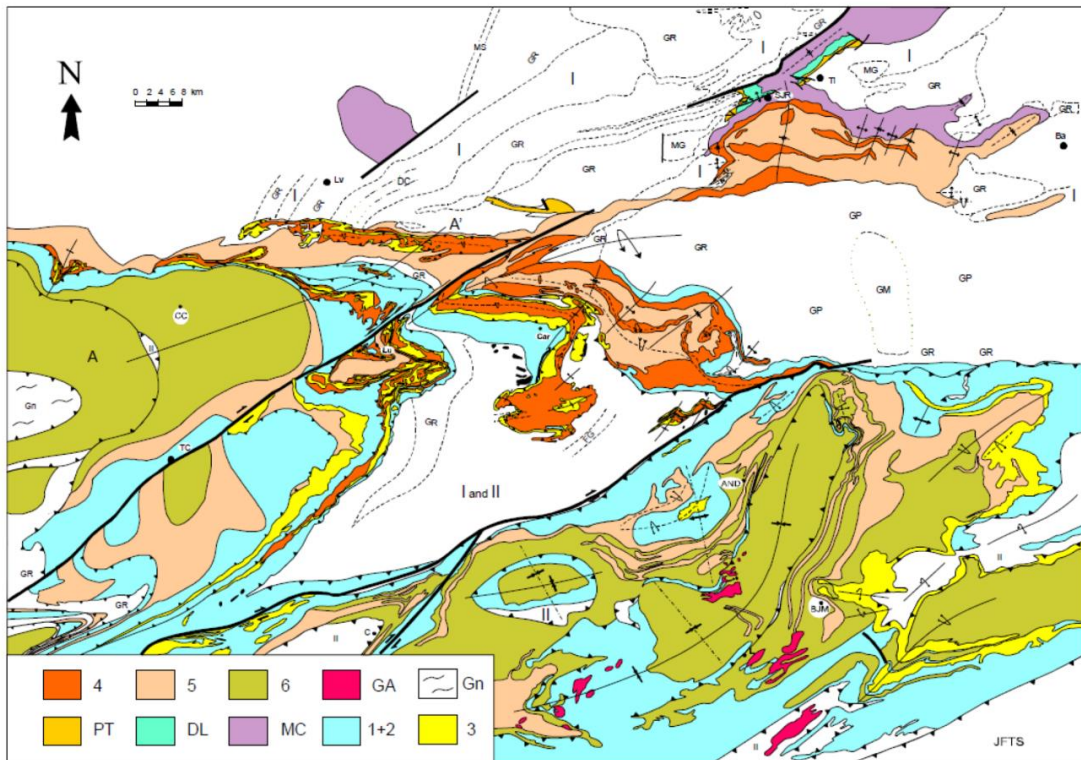
Paciullo *et al.* (2008) renomeiam as unidades da Sequência Depositional Serra do Turvo, constituída por uma sucessão de biotita xisto feldspático (Unidade Santo Antônio) seguido por biotita-muscovita xisto/gnaiss grosso com intercalações de quartzito e quartzoxisto, rocha calcissilicatada e anfibolito (Unidade Arantina), correspondentes respectivamente às unidades Na₅ e Na₆ de Paciullo *et al.* (2000) e Paciullo, Ribeiro e Trouw (2003).

A discordância que define a sequência deposicional (SLOSS, 1963) está representada pelo contato basal do biotita xisto da Unidade Santo Antônio recobrindo as litologias das unidades da Sequência Depositional Carrancas nos domínios alóctones e o embasamento no domínio autóctone (Figura 10). Além disso, a sequência deposicional representa uma mudança na proveniência da área fonte, pois, a sedimentação torna-se mais imatura com forte presença de feldspatos, em contraste com o evento sedimentar anterior feldspático-quartzoso-pelítico da Sequência Depositional Carrancas (PACIULLO, 1997).

As associações de litofácies (Na₁ a Na₆) representam a evolução da abertura de *rift*, sedimentação plataformar incluindo turbiditos, transgressão marinha e sedimentação de águas profundas. A ampla e regular distribuição das litofácies do Ciclo Depositional Andrelândia e seus correlatos, bem como sua extensa distribuição, indicam bacia com proporções continentais de relativa estabilidade tectônica (PACIULLO *et al.* 1993).

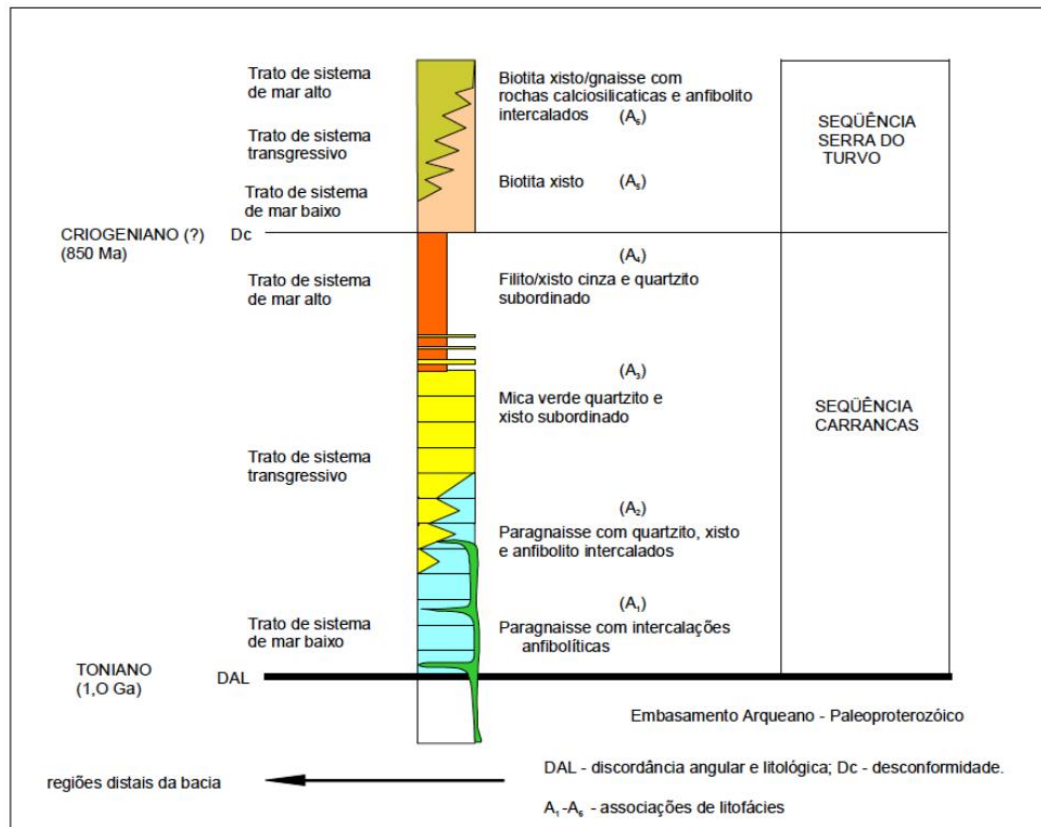
Segundo os mapas geológicos de Trouw *et al.* (2003), Quéméneur *et al.* (2003), Peternel, Trouw e Castro (2008), a *Nappe* de Luminárias é composta majoritariamente pelas unidades Na₁₊₂, Na₃, Na₄ no extremo norte (situada na Folha Geológica Lavras, QUÉMÉNEUR *et al.*, 2003), pelas unidades Na₁₊₂, Na₃, Na₄ e Na₅ a norte, e pelas unidades Na₁₊₂, Na₃, Na₄ ao centro e ao sul (porções norte e sul na Folha Geológica Caxambu – TROUW *et al.*, 2013).

Figura 9. Mapa geológico em detalhe da Megasequência Andrelândia. Legenda: Sequência Carrancas (1-4), Sequência Serra do Turvo (5-6). GA - granitos anatóticos; Gn - Nappe Guaxupé; MC - Megasequência Carandaí; Sequências Barroso e Prados; DL - delta do Lenheiro; Seq



Fonte. Paciullo (1997) e Trouw *et al.* (2000).

Figura 10. Estratigrafia da Megasequência Andrelândia



Fonte. Trouw *et al.* (2002) e Ribeiro *et al.* (2003). Modificado de Paciullo (1997).

Há uma certa divergência na literatura quanto à classificação das rochas da *Nappe* de Luminárias. Campos Neto *et al.* (2004) agrupa a *Nappe* como uma das pertencentes ao Sistema de *Nappes* Carrancas da Megassequência Andrelândia (vide Tabela 04). Posteriormente, Campos Neto *et al.* (2007) reclassifica o Terreno Andrelândia, como Sistema de *Nappes* Andrelândia, incluindo nesta subdivisão, o Xisto Santo Antônio (Tabela 05).

Tabela 05. Reclassificação do Terreno Andrelândia por Campos Neto *et al.* (2007)

SISTEMA OROGÊNICO TOCANTINS MERIDIONAL (ORÓGENO BRASÍLIA MERIDIONAL)	SISTEMAS DE <i>NAPPES</i> ANDRELÂNDIA	<i>Nappe</i> Pouso Alto (e <i>klippen</i> Aiuruoca, Carvalhos e Serra da Natureza) Campos Neto <i>et al.</i> (2004)	
		<i>Nappe</i> Liberdade (rochas de nível crustal mais profundo)	
		<i>Nappe</i> Andrelândia (supracrustais em fácies anfibolito)	Xisto Serra da Boa Vista
			Xisto Santo Antônio
		Xisto Rio Capivari	
	<i>NAPPE</i> LIMA DUARTE		
	SISTEMA DE <i>NAPPES</i> CARRANCAS Campos Neto <i>et al.</i> (2004)	ESCAMA CAMPOLIDE Muscovita quartzito e clorita-muscovita quartzito xisto intercalados com sillimanita-granada-biotita xistos e granada-biotita xistos associados a anfibolitos e metaultramáficas (Unidade Na ₂ de Trouw <i>et al.</i> , 2000)	
EMBASAMENTO			

Fonte. Extraído de Teixeira (2015).

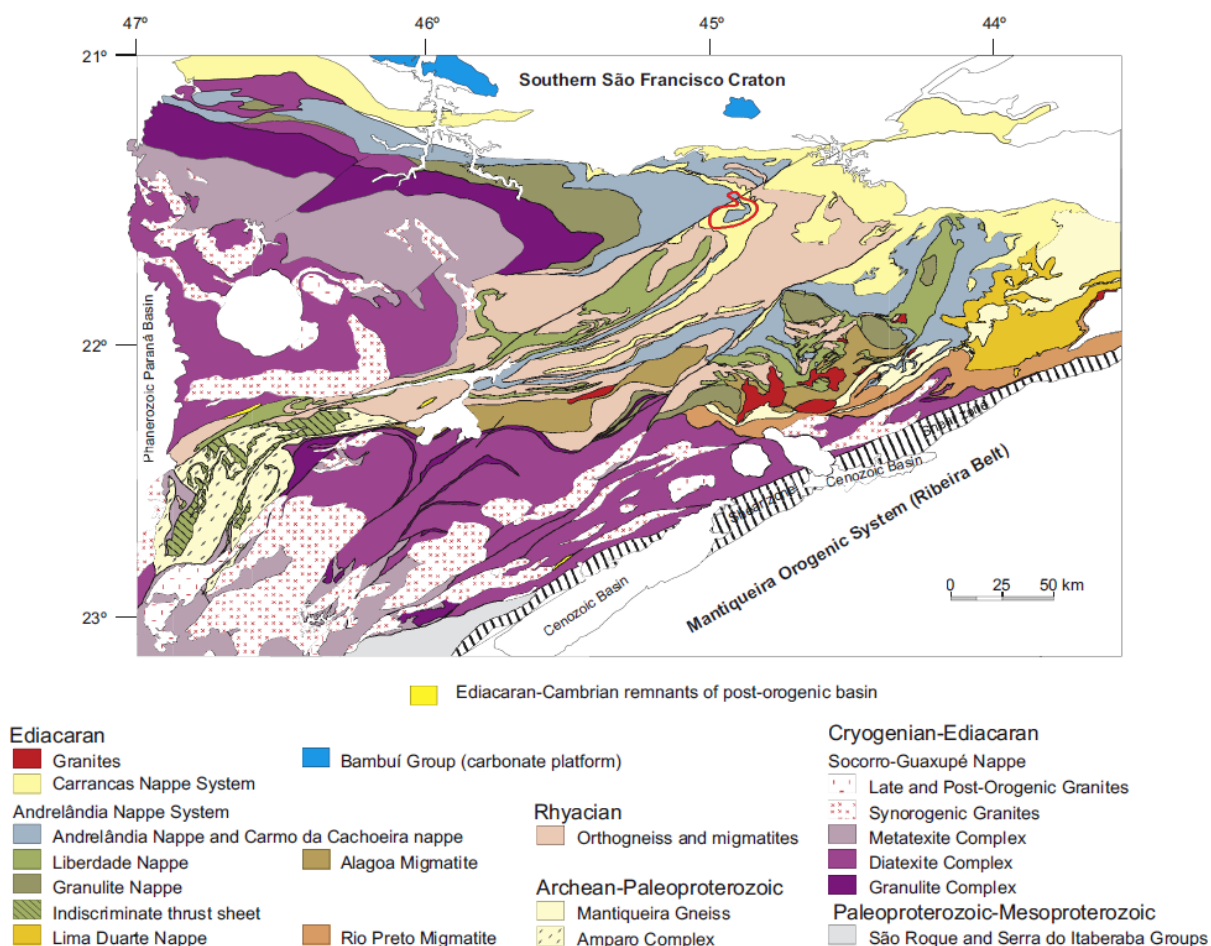
Desse modo, considera-se que a *Nappe* de Luminárias é formada na base por rochas das unidades Na₁ a Na₄ da Sequência Carrancas de Paciullo *et al.* (2000) e Paciullo, Ribeiro e Trouw (2003), pertencente ao Sistema de *Nappes* Carrancas (CAMPOS NETO *et al.*, 2004); e no topo, por rochas da unidade Xisto Santo Antônio (TROUW *et al.*, 1980, 1983) do Sistema de *Nappes* Andrelândia (CAMPOS NETO *et al.*, 2007) (Figura 11).

A associação de litofácies da unidade Na₅ por Paciullo *et al.* (2000, 2003) e Trouw *et al.* (2000) pertencente à Sequência Serra do Turvo da Megassequência Andrelândia foi interpretada por diversos autores como correspondente a Unidade Biotita xisto, ou Xisto Santo Antônio da *Nappe* Andrelândia definido por Trouw *et al.* (1980, 1983) e recentemente estudada por Paciullo *et al.* (2008), Campos Neto *et al.* (2007, 2010, 2011), Westin e Campos Neto (2013) e Westin *et al.* (2016, 2019).

Neste trabalho, adota-se a denominação estabelecida por Trouw *et al.* (1980, 1983) para as rochas xistosas da porção norte da *Nappe* (foco de estudo do presente trabalho), caracterizando a Unidade Santo Antônio por clorita-biotita-filitos e plagioclásio biotita xisto (gradando a gnaiss) de granulação fina a média e sem bandamento, com fragmentos isolados

de granitóides do embasamento. A unidade recebe este nome em menção a área-tipo (Serra de Santo Antônio) no município de Andrelândia, no sopé da Serra do Turvo, (Folha Andrelândia 1: 100.000), onde afloram lajedos de biotita xistos homogêneos (PACIULLO *et al.*, 2008).

Figura 11. Mapa Geológico do Orógeno Brasília Meridional, com destaque (traço vermelho) para a Unidade Santo Antônio da *Nappe* de Luminárias.



Fonte. Extraído de Campos Neto *et al.* (2010).

Campos Neto (2007), Westin & Campos Neto (2013), Westin *et al.* (2015, 2016) consideram o Xisto Santo Antônio da *Nappe* Andrelândia, como uma unidade metawacke (metagrauvaca) constituída de pacote homogêneo de biotita-clorita-muscovita quartzo xisto, com granada e plagioclásio e lentes de quartzo, em contato tectônico e discordante sobre às rochas do Sistema de *Nappes* Carrancas na região da cidade de Carrancas.

Segundo Trouw *et al.* (2013), esta unidade de mapeamento corresponde a muscovita-biotita xistos ricos em plagioclásio, que gradam a gnaisses. Geralmente, contêm cristais de granada e rutilo, e delgados veios lenticulares de quartzo. Pequenas quantidades de estauroлита, cianita e/ou sillimanita aparecem nas zonas de fácies anfíbolito. Estes xistos formam sucessões

monótonas, com até centenas de metros de espessura aparente, e cobrem unidades da Sequência Carrancas (por exemplo, em São Tomé das Letras). Regionalmente, interpretado como turbidito pelítico, localmente com seixos pingados (por exemplo, São Tomé das Letras, Madre de Deus de Minas), que passam no topo a pelitos hemipelágicos. Estes depósitos devem representar, respectivamente, sedimentação de mar baixo e mar alto glácio-eustáticas, provavelmente relacionadas à Glaciação Macaúbas (PACIULLO, 1997; PACIULLO *et al.*, 1998).

A Unidade Santo Antônio, datada do ediacarano (Neoproterozóico), corresponde à unidade do topo da Sequência Serra do Turvo, pertencente ao ciclo deposicional Andrelândia. Além de ocorrer na *Nappe* de Luminárias, esta unidade ocorre com frequência como unidade dominante dentro do sistema de *Nappes* inferiores (*Nappe* Andrelândia e *Nappe* Carmo da Cachoeira), como camada expressiva de rocha no sistema de *Nappe* intermediária (*Nappe* Liberdade) e no Domínio Estrutural Autóctone do Terreno Ocidental da Faixa Ribeira (HEILBRON *et al.*, 2004).

Segundo Campos Neto & Caby (1999) e Campos Neto *et al.* (2004), as *Nappes* Carmo da Cachoeira e Andrelândia são constituídas por rochas de alta pressão com pico metamórfico na fácies anfibolito e representadas por rutilo-granada-biotita-plagioclásio-quartzo xisto/gnaiss (Xisto Santo Antônio), rutilo- cianita/sillimanita-granada-biotita xisto, quartzito impuro e sequência rítmica xisto-quartzítica (Pacote Moreiras). A *Nappe* intermediária (*Nappe* Liberdade) é caracterizada por rochas com associações da fácies anfibolito, em que predominam rochas pelíticas a granada, sillimanita, cianita e estauroлита, intercaladas com rochas calciossilicáticas, retroeclogito, rochas metaultramáficas, mármore, anfibolitos, quartzitos, gonditos, BIFs e camadas expressivas do Xisto Santo Antônio (TROUW *et al.*, 2000).

Trabalhos recentes de Westin & Campos Neto (2013), Westin *et al.* (2013, 2016, 2019) afirmam que a unidade indivisa Na1+2 – por eles também denominada de Complexo São Vicente - é mais antiga que os grupos Andrelândia e Carrancas. Segundo estes autores, as rochas metassedimentares do Complexo São Vicente são imaturas e possuem três idades principais de deposição, entre 2170 Ma, 2140 Ma e 2130 Ma; portanto, unidade de idade paleoproterozóica, e que não tem relação nem com o Grupo Carrancas e nem com a Megassequência Andrelândia.

Os mesmos autores afirmam que as rochas da unidade metagrauvaca (Biotita xisto Santo Antônio) possuem assinatura geoquímica de rochas sedimentares depositadas em ambiente de colisão continental e idade máxima de deposição ao redor de 610 Ma. Foram interpretadas como sedimentos do tipo *flysch*, sin-colisionais de idade edicariano (entre 630 e 610 Ma) depositados

sobre os sedimentos da margem passiva, resultantes da erosão das *Nappes* da margem ativa (CAMPOS NETO *et al.*, 2007, 2014; WESTIN & CAMPOS NETO, 2013).

Estudos de proveniência com base em determinações de idade detrital de zircão revelaram que as unidades Na₁, Na₂, Na₃, Na₄ e Na₆ da Megassequência Andrelândia são associações derivadas de unidades basais rhyacianas do Cráton São Francisco, incluindo as sucessões Paleo/mesoproterozoico de preenchimento da Bacia Intracratônica do São Francisco (MACHADO and GAUTHIER, 1996; VALLADARES *et al.*, 2004, 2008; VALERIANO *et al.*, 2004; BELÉM *et al.*, 2011; SANTOS, 2011).

Diferentemente das unidades Na₁ a Na₆, os dados disponíveis para os xistos e gnaisses ricos em plagioclásio da unidade Na₅ indicam uma proveniência essencialmente de fontes neoproterozóicas e idade máxima deposicional de 620 Ma (BELÉM *et al.*, 2011); corroborando com a hipótese de Campos Neto *et al.* (2014) e Westin & Campos Neto (2013) das rochas desta unidade serem metassedimentos resultantes da erosão das *Nappes* da margem ativa, depositados sobre os sedimentos da margem passiva.

A Megassequência Andrelândia pode ser interpretada como a sucessão de margem passiva do rift neoproterozoico desenvolvida ao longo da margem sul do paleocontinente do São Francisco (RIBEIRO *et al.*, 1995; PACIULLO *et al.*, 2000).

Segundo Alkmim *et al.* (2017) e Fuck *et al.* (2017) a sequência tem sido correlacionada ao Grupo Macaúbas do Orógeno Araçuaí e dos Grupos Canastra e Vazante da Faixa Brasília. A unidade Na₅ também tem unidades equivalentes no Orógeno Araçuaí e Faixa Brasília: Formação Salinas e as unidades de Araxá e Ibiá, respectivamente.

3.2.1 Geologia Estrutural

A estrutura regional pré-cambriana para o sul mineiro é dominada por estágios colisionais durante a Orogenia Brasileira que culminaram com a geração de sistemas de *Nappes* (Trouw *et al.* 1980; 1982; 1983; 1984; 1986; 2000; 2003). Na região de estudo ocorrem, da base para o topo, as *Nappes* de Luminárias, São Tomé das Letras e Carmo da Cachoeira (Figura 12), com transporte tectônico para E, e estruturas vinculadas à evolução do extremo sul da Faixa Brasília. Mais ao sul, aparecem partes das *Nappes* Andrelândia e Liberdade, e a *Klippe* Aiuruoca. Estas estruturas registram transporte tectônico de topo para E relacionado à Faixa Brasília, modificado por cavalgamentos para NNW, atribuídos à evolução da Faixa Ribeira, o que caracteriza a zona de interferência entre as duas faixas (TROUW *et al.*, 1994).

Com relação à *Nappe* de Luminárias e as outras adjacentes, intensos estudos foram realizados entre as décadas de 50 e 90. Trabalhos pioneiros de destaque são os de Ebert (1955; 1956; 1967; 1971). Posteriormente houve dissertação de mestrado na região de Luminárias por J. Almeida (1992) e tese de doutorado sobre a geologia regional, por Paciullo (1997). Trouw *et al.* (1980; 1982; 1983; 1984; 1986) descrevem aspectos estruturais e microtectônicos de grande relevância. A evolução tectônica e estratigráfica regional foram tratadas em Ribeiro *et al.* (1990; 1995), Paciullo *et al.* (1993; 1998; 2000) e Trouw *et al.* (2000).

Segundo a análise estrutural com base em critérios de superposição de estruturas (p. ex. dobras redobradas, lineações dobradas, padrões de interferência de dobramentos, etc.) realizada pelos autores supracitados, de modo geral, pode-se identificar a superposição de estruturas de pelo menos três eventos deformacionais – D₁, D₂, D₃; sendo as duas primeiras representativas de uma deformação progressiva (PACIULLO *et al.*, 1996).

A primeira fase de deformação (D₁) é caracterizada por empurrões, clivagem ardosiana S₁, presença de poucas dobras meso e microscópicas. As feições estruturais de dobras são primordialmente apertadas a isoclinais com orientação de eixos variando entre NW-SE a W-E, subhorizontal. No desenvolvimento de clivagem ardosiana penetrativa (S₁), origina-se localmente lineação de intersecção (L₁) entre S₀ e S₁ e/ou lineação mineral.

A fase seguinte de deformação (D₂) gerou foliação de transposição (S₂), como clivagem de crenulação, dobramento recumbente ou reclinado com eixos sub-horizontais caindo para W-E a NW-SE (muito localmente N-S), associados a empurrões com lineação penetrativa (L₂) mineral e/ou de estiramento, sub-paralela aos eixos de dobras D₂. A orientação das estruturas D₂ reflete uma compressão NW-SE, compatível com o sentido de movimento tectônico da Faixa Ribeira (HEILBRON *et al.*, 2000, 2004, 2008). Como microestruturas dominantes, vale

ressaltar a recristalização completa de quartzo e mica em charneiras de dobras D_2 , e a transformação progressiva de clivagem de crenulação para xistosidade.

Associadas à última fase deformacional (D_3), a compressão regional na direção NNW-SSE, produziu dobras suaves a abertas com planos axiais íngremes, e empurrões associados para NNW. As zonas de cisalhamento de Três Corações (ZCTC) e de Caxambu (ZCC), verticais e destrais, de rumo NE-SW e movimentação dextral, são feições estruturais que cortam as *Nappes* e, por tal razão, devem ser posteriores a D_2 .

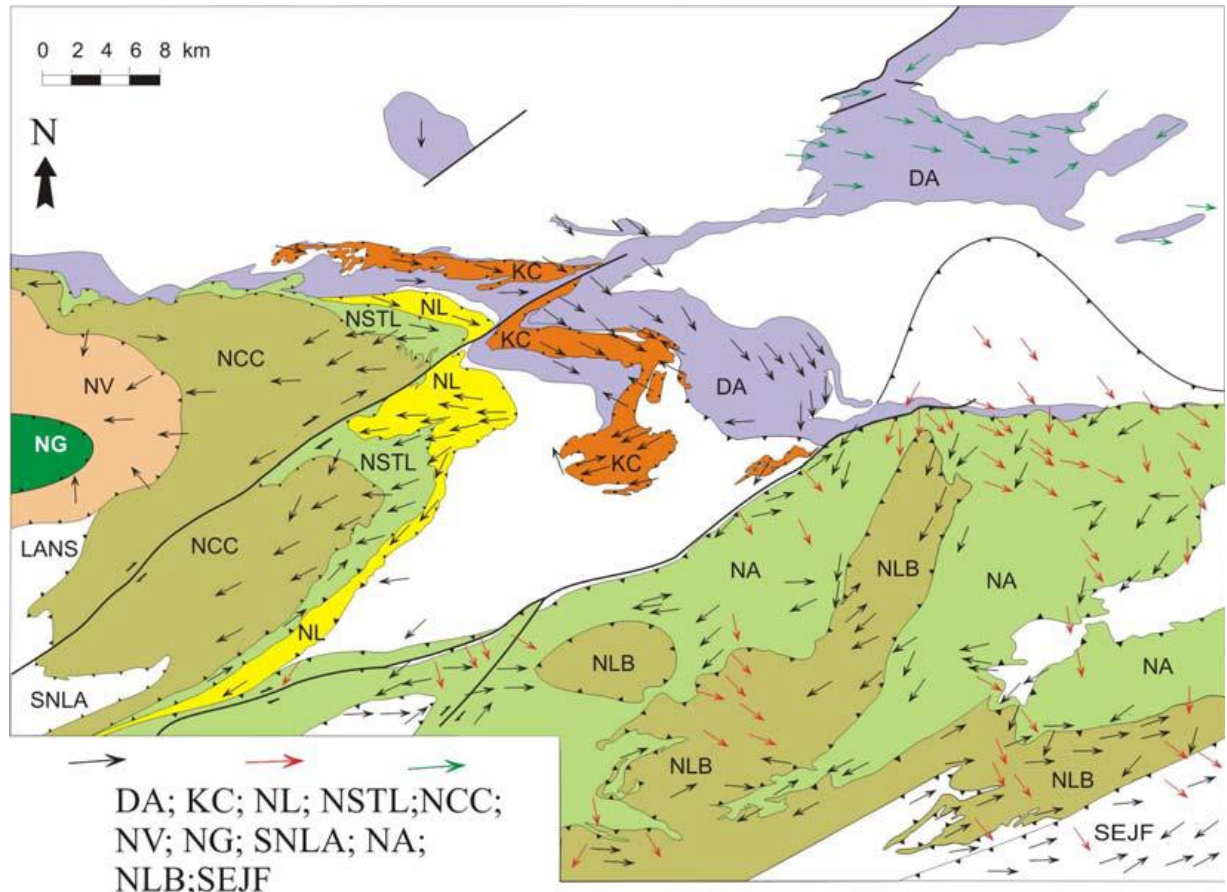
Os dobramentos do evento D_3 são caracterizados por cristais de cianita com *kink bands* e dobras abertas ou suaves (localmente apertadas) com orientação do eixo de dobra NE-SW, com pouco caimento, localmente para SE (Paciullo *et al.* 1996; 2000). Dentre as estruturas principais, há crenulação geral da foliação S_2 , com geração de lineação de crenulação comum (L_3), e os cristais de mica e quartzo apresentam-se deformados nas charneiras de dobras D_3 .

Em algumas regiões, segundo Heilbron (1984), é difícil distinguir estruturas D_1 e D_2 devido à intensidade de deformação D_2 . Heilbron *et al.* (1995) propõem modelo cinemático evolutivo típico para áreas de convergência oblíqua, associando a estruturação regional a fases deformacionais principais (D_1 e D_2), responsáveis pelo imbricamento das escamas de empurrão e relacionadas a dobras apertadas a isoclinais, assimétricas, acilíndricas, associadas à foliação penetrativa (S_2 ou $S_1 + S_2$), dobras em bainha e forte lineação de estiramento. Após a compartimentação, ocorre a fase tardia D_3 , com redobrimento de estruturas já formadas, planos axiais sub-verticais e eixos com caimento suave NE-SW.

Alguns autores (RIBEIRO *et al.*, 1995), atribuem a denominação D_{B1} e D_{B2} em alusão à tectônica da evolução da parte sul da Faixa Brasília. As estruturas D_3 , por sua vez, são relacionadas à evolução do segmento central da Faixa Ribeira (TROUW *et al.*, 1994; 2000; RIBEIRO *et al.*, 1995).

Durante evento D_1 , há crescimento mineral sin-deformacional representativo de fácies xisto verde, tais como muscovita, clorita, cloritóide e biotita. De acordo com Trouw *et al.* (1983) a fase deformacional D_2 coincide com o auge do metamorfismo, e o desenvolvimento de minerais metamórficos de condições *P-T* mais elevadas, como granada, estauroлита, cianita e sillimanita, além de muscovita e biotita. Na fase deformacional D_3 , há crescimento de minerais metamórficos de temperaturas mais baixas, tardi a pós deformacionais, como clorita, muscovita e cloritóide.

Figura 12. Mapa estrutural simplificado da extremidade sul da Faixa Brasília, com a discriminação das Nappes. Legenda: Nappes Superiores de alta T: NG- Guaxupé; Nappes Inferiores de alta a média P: NV- Varginha, NLB- Liberdade; NCC- Carmo da Cachoeira; NA- Andrelândia; NSTL-São Tomé das Letras; NL- Luminárias; KC - klippe Carrancas; DA - domínio autóctone. SEJF - sistema de empurrões Juiz de Fora do Orógeno Ribeira.



Fonte. Extraído de Trouw *et al.* (2008). Modificado de Paciullo (1997) e Trouw *et al.* (2000)

3.2.2 Metamorfismo na Megassequência Andrelândia

O metamorfismo neoproterozóico que se deu durante a Orogenia Brasileira, e que afeta as sucessões metassedimentares da Megassequência Andrelândia e parte do embasamento segundo Ribeiro e Heilbron (1982), é do tipo Barroviano (pressão intermediária), caracterizado por paragênese com granada e cianita, almandina, cianita, sillimanita e estauroлита (TROUW *et al.*, 1983).

De modo geral, o grau de metamorfismo aumenta de norte para o sul, desde a fácies xisto verde médio, com biotita, cloritóide e, localmente, cianita; passando por fácies xisto verde alto com granada (almandina), hornblenda e albita; até a fácies anfibolito com estauroлита, plagioclásio, cianita e sillimanita (PACIULLO *et al.*, 1996).

Segundo Trouw *et al.* (2003), o mapeamento de três isógradas metamórficas (estauroлита+cianita, sillimanita, cianita+K-feldspato) em rochas pelíticas, permitiu diferenciar quatro zonas metamórficas distintas:

1. **Zona da fácies xisto verde superior:** com biotita e granada, localmente cloritóide;
2. **Zona da fácies anfibolito inferior:** com estauroлита, cianita, granada, biotita, muscovita e quartzo;
3. **Zona da fácies anfibolito superior:** com sillimanita, além dos minerais da zona 2 e;
4. **Zona da fácies granulito de pressão relativamente alta (>9kbar):** com a associação cianita+K-feldspato+granada+rutilo+quartzo+biotita e ausência de muscovita.

O mapa metamórfico de Trouw *et al.* (2000) (Figura 13) ilustra que cada *Nappe* tem seu próprio padrão metamórfico, indicando auge do metamorfismo principal anterior ao final do movimento das *Nappes*. Além disso, confirma que o metamorfismo regional na Megassequência Andrelândia aumenta de NW para SE pelas seguintes deduções: zona da fácies xisto verde na parte norte da *Nappe* Luminárias e na *Nappe* São Tomé das Letras, zona da fácies anfibolito inferior ocorre na Klippe Carrancas e na parte sul da *Nappe* Luminárias e *Nappe* Carmo da Cachoeira; fácies anfibolito superior aparece nas *Nappes* Andrelândia e Liberdade; e fácies granulito ocorre na *Klippe* Aiuruoca.

O mapa metamórfico de Ribeiro e Heilbron (1982) (Figura 14) com distribuição dos principais minerais metamórficos confirma que as rochas do norte da *Nappe* de Luminárias estão divididas em quatro associações minerais, de norte para sul: Grt, Grt+St, Grt+St+Ky e Grt+St+Ky+Sill. Ou seja, estão metamorfizadas em fácies xisto verde no extremo norte caracterizado pela granada, ao norte por granada e estauroлита, ao centro contém cianita e as do sul contêm cianita e sillimanita.

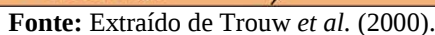
Na porção extremo norte da *Nappe*, (correspondente ao biotita xisto da Unidade Santo Antônio) a zona de fácies xisto verde é caracterizada por abundante clorita, e a fácies xisto verde superior pela presença de granada, segundo Quéméneur *et al.* (2003) e Paciullo *et al.* (2008). Os mesmos autores também afirmam que granada aparece nas zonas da fácies xisto verde superior e na fácies anfibolito onde, além da granada, podem ocorrer traços de estauroлита e cianita.

Fumes (2017) descreve clorita-cloritoide xisto contendo estauroлита e cianita, e xisto com muscovita, cloritoide e cianita como as principais rochas metapelíticas da porção norte da *Nappe* de Luminárias, em fácies anfibolito inferior de alta pressão.

Trabalhos mais recentes de Fumes *et al.* (2017, 2019) na *Nappe* de Luminárias usando o modo PT médio de THERMOCALC indica a presença de um gradiente metamórfico com condições aumentando de fácies xisto verde para anfibolito na porção norte e centro-norte, e transição de fácies anfibólito para fácies eclogito na porção sul. Segundo estes autores, o pico da assembléia metamórfica na porção norte é representado por Chl + Ky + St + Rt, sob alta pressão em condições de fácies anfibólitos inferior.

Na porção central da *nappe*, o principal tipo de rocha é um estauroлита muscovita biotita xisto, em que muscovita, biotita e quartzo definem os principais minerais que caracterizam a foliação e a xistosidade homogênea (FUMES *et al.*, 2019). Portanto, a assembléia de pico metamórfico na porção central, segundo estes autores, é Bt + St + Grt + Rt, estável em fácies anfibolito de alta pressão. Por fim, para a porção sul da *nappe*, os autores descrevem as rochas aflorantes como granada-estauroлита xisto, em que a matriz é composta por estauroлита, muscovita, quartzo, cianita, rutilo, ilmenita, zircão, monazita e granada. Nesse caso, a associação de pico metamórfico é St + Ky + Grt + Rt, na transição de fácies anfibólito de pressão alta para fácies eclogito (FUMES *et al.*, 2019).

As relações microtectônicas estudadas por Trouw, Ribeiro e Paciullo (1980), Trouw, Ribeiro e Paciullo (1983), Ribeiro e Heilbron (1982), Ribeiro *et al.* (1995), mostram que a fase D₁ registra o início do metamorfismo, a fase D₂ registra o auge do metamorfismo e fase D₃ atuou após o pico metamórfico. O metamorfismo principal é de pressão relativamente alta, contemporâneo a D₂. Este metamorfismo foi então relacionado as fases D₁ e D₂ geradas durante a evolução da Faixa Brasília, pois associa-se ao movimento das *Nappes* vinculadas a esta faixa (RIBEIRO *et al.*, 1995). A fase D₃, por sua vez, está relacionada com a Faixa Ribeira e provavelmente as reações de retrometamorfismo tardio registrado por porfiroblastos de granada e estauroлита substituídos por cloritoide (TROUW, RIBEIRO E PACIULLO, 1980; RIBEIRO E HEILBRON, 1982) estão associados às zonas de cisalhamento tardi-D₃.



The map displays the Luminárias Nappe (Nappe de Luminárias) in the Foz de Iguaçu region. Key features include:

- Isograds (Traço das isogradas):** Represented by dashed lines with arrows, labeled with mineral assemblages such as Grt Ky, Grt Ky St Kfs, Grt Ky St, Grt Ky St Sil, Grt Ctd, Grt Ctd Ky, Grt St Ky, Grt Ky St, and Grt Ky St Sil.
- Tectonic Zones:**
 - ZCTC (Zona de Cisalhamento Três Corações):** Indicated by a dashed line with arrows.
 - ZCC (Zona de Cisalhamento Caxambu):** Indicated by a dashed line with arrows.
- Mineral Assemblages:** Various assemblages are labeled throughout the map, including Ky, Bt, Grt, St, Kfs, Ctd, and Sil.
- Geographic Coordinates:** The map includes latitude coordinates (21° 30' and 22° 00') and longitude coordinates (44° 30' and 50° 00').
- Scale and Orientation:** A scale bar indicates 0 to 10 km, and a north arrow points towards the top of the map.

Fonte: Extraído e modificado de Ribeiro e Heilbron (1982).

4. RESULTADOS

Apresenta-se a seguir os resultados obtidos no presente trabalho, subdivididos nos itens: Geologia Local (inclui Petrografia e Microtectônica, auxiliadas por análise das seções delgadas em Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV), Análise Química Mineral (por Microsonda Eletrônica) e Cálculos Termobarométricos. A descrição da unidade presente na área de estudos segue a proposta de nomenclatura definida por Trouw *et al.* (1983) para biotita xisto da Unidade Santo Antônio (equivalente a unidade Na₅ de Paciullo *et al.*, 2000; 2003).

Mapas geológicos da região anteriormente confeccionados por Trouw *et al.* (2003), Quéméneur *et al.* (2003), Peternel, Trouw e Castro (2008); e Paciullo e Ribeiro (2008) serviram como base para a apresentação do Mapa Geológico e de Pontos do presente trabalho (Apêndice I); sendo que as unidades litoestratigráficas apresentadas seguem a classificação e denominação dos autores supracitados.

4.1 Geologia Local: Unidade Santo Antônio

As rochas xistosas da Unidade Santo Antônio são o alvo de estudo deste trabalho. Esta unidade aflora na porção norte da *Nappe* de Luminárias, próximo cerca de 3 km ao sul da mancha urbana do município, em uma área de aproximadamente 34,7 km² de extensão. No geral, a unidade é de considerada homogeneidade morfológica, visto que abrange poucas variações de estruturas do relevo. Ocorre em consideráveis desníveis topográficos, entre cotas de 900 a até 1230 m, em fundos de vales (próximo às drenagens nas cotas mais baixas, onde a rocha aflora devido ao entalhamento do relevo pela passagem de corpos hídricos) e em topos de morros e morrotes (Figura 15).

Geomorfologicamente, sua exposição abrange morros de topos arredondados com encostas convexas e de média declividade e amplitude; ou ainda se expõe como matacões e blocos que sobressaem à topografia, com coloração preta ou cinza escuro. Constituem uma rede de densidade alta de drenagens, sendo que os principais corpos d'água que cortam a unidade são: Rio Ingaí, Ribeirão da Cachoeira, Córrego do Taquaral, Córrego da Laranja, Córrego do Retiro, Córrego do Mirante, Córrego da Falha Velha, Córrego Mata-boi e Córrego São José (vide Figura 1).

Apresentam sinuosidade disposta em vales fechados e encaixados, configurando um processo de entalhamento do relevo e maior dissecação de seu entorno em áreas de maior declividade. Em escala de afloramento, as exposições de rocha ocorrem em dimensões

centimétricas - raras exceções com afloramentos de dimensões métricas (ex. Ponto LR-71) - e apresentam baixo grau de alteração, com estrutura bem preservada.

Figura 15. Afloramentos de biotita xistos da unidade Santo Antônio. **A.** afloramento ao longo do Córrego do Mirante, ponto LR-09. **B.** Afloramento em queda d'água do Córrego da Lajinha, afluente do Rio Ingaí, ponto LR-69. **C.** Exposição de rocha inalterada, em lajedo, na Fazenda Pedra Negra, Ponto LR-71. **D.** Ponto LR-77, em topo de morro convexo, próximo ao Córrego do Taquaral.



4.1.1 Petrografia:

Os dados aqui tratados são referentes à análise petrográfica de dez (10) seções delgadas em luz transmitida, cujas fichas de descrições detalhadas se encontram no Apêndice II e a distribuição geográfica dos pontos é apresentada na etapa de campo do capítulo de Materiais e Métodos (vide Tabela 01) e no Mapa Geológico e de Pontos (vide Apêndice I). A abreviação dos minerais aqui apresentados segue a definida por Kretz (1983).

Macroscopicamente, trata-se de uma rocha homogênea de coloração cinza escuro a cinza esverdeado, de granulação fina, composta primordialmente por cristais de quartzo e micas; com presença de porfiroblastos de granada. Em análise microscópica, o biotita xisto da Unidade Santo Antônio é composto essencialmente por quartzo (30 - 40%), biotita (30%) e muscovita (25 - 35%); e em menor proporção, granada (3%), plagioclásio (4%), clorita (5-6%). Os minerais apatita, monazita, rutilo, ilmenita e zircão estão presentes como minerais acessórios, perfazendo baixa proporção volumétrica (<1%) da totalidade da rocha.

O quartzo e o plagioclásio têm granulação fina a média ($\sim 0,2 - 1$ mm), ocorrendo em grande proporção volumétrica e dispersos homogeneamente na matriz. Cristais de quartzo podem ocorrer separados em bandas, finas e descontínuas bem distribuídos na matriz, entrelaçados aos minerais micáceos. Também ocorrem na forma de veios/lentes espessas (1 a 1,5 mm) de grãos grande e recristalizados (com extinção ondulante) paralelos à foliação, apresentando quantidades menores de plagioclásio e micas em seu entorno, e com textura granoblástica.

A matriz, de granulação fina, é composta principalmente por biotita, clorita e muscovita - cristais pequenos de 0,2 mm a intermediários de 0,8 mm – além de lentes ou veios de quartzo (de espessura milimétrica) intercalados às porções micáceas, paralelos a foliação principal. Há presença de cristais de granada de 1,6 mm até 2 mm de diâmetro, configurando porfiroblastos em meio à matriz fina e equigranular.

De acordo com a estrutura, a foliação secundária e contínua representa uma xistosidade bem definida pela orientação preferencial dos filossilicatos (grupo das micas e das cloritas) paralelos ao bandamento composicional. A lineação mineral é marcada pelos minerais placóides (micas).

O biotita xisto apresenta laminação definida pela alternância de leitos quartzo-feldspáticos e outros ricos em biotita e clorita, ou estratificação tabular delgada mal definida por camadas mais ricas em micas. Veios lenticulares de quartzo constituem outra feição típica. A textura predominante é lepidoblástica, devido aos minerais placóides arranjados paralelamente ou sub-paralelamente entre si (Figura 16 A e B).

Os porfiroblastos de granada apresentam textura poiquiloblástica, devido às trilhas de inclusão de minerais (ilmenita, quartzo e micas). Neste caso, vale salientar a textura helicítica, em que as inclusões estão orientadas com foliação interna referente a aspectos remanescentes de foliações anteriores.

A matriz é notadamente marcada por bandas mais quartzosas e outras bandas mais micáceas. Provavelmente o protólito possuía estrutura sedimentar de camadas intercaladas de porções mais argilosas e outras mais arenosas, que favoreceu a formação de veios de quartzo (camadas lenticulares - textura granoblástica) acompanhando paralelamente a foliação micácea predominante, que foi posteriormente crenulada. A recristalização dos grãos de quartzo é nítida pela observação de cristais alongados e paralelos ao PA da crenulação, e granulação pouco maior que a matriz ($\sim 1 - 1,5$ mm) (Figura 16 C e D).

Cristais de clorita ocorrem na matriz junto às micas e também como mineral de alteração nas bordas dos porfiroblastos de granada (Figura 16 E e F). O cristal é facilmente distinguível pela cor de interferência anômala. Vale ressaltar a existência de manchas roxas (a polarizadores

cruzados) arredondadas formadas em torno das inclusões que causam um efeito de halo pleocróico (deformação da rede cristalina) na clorita por alteração composicional (vide Figura 16 F).

A Figura 17 (A até F) ressalta a morfologia dos principais minerais formadores de rocha, bem como sua disposição e os contatos entre si. Minerais acessórios são rutilo, ilmenita, monazita, apatita e zircão. A Figura 18 (A até F) registra, principalmente, os minerais acessórios e suas relações/associações com a matriz bem como como trilhas de inclusões nos porfiroblastos. Muito recorrente são as trilhas de inclusão de quartzo, muscovita e ilmenita nas granadas. Rutilo e zircão são minerais acessórios que ocorrem em menor proporção e dispersos pela matriz. Monazita e apatita ocorrem muito raramente, ora na matriz, ora como inclusões.

Ilmenita possui hábito tabular e está frequentemente associada às micas, orientada de acordo com a foliação principal. Perfaz 2% da composição volumétrica da rocha.

Monazita, rutilo, apatita e zircão são acessórios que compõem juntos aproximadamente 1% do volume total da rocha. São inclusões em grãos de granada ou encontram-se dispersos pela matriz associados com apatita e micas.

Figura 16. Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas do Biotita xisto da Unidade Santo Antônio (LR-08). **A.** Relação textural lepdoblástica da matriz composta majoritariamente por quartzo, muscovita e biotita. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **B.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **C.** Veio de quartzo paralelo à foliação principal da matriz e dobrado. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **D.** Cristais de quartzo recrystalizados e alongados paralelos ao plano axial da crenulação. Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **E.** Orientação da foliação da matriz (muscovita, biotita e quartzo) se torna curva pelo anteparo rígido (granada), envolvendo-a. Notar os cristais de clorita sobrecrecendo junto as bordas do porfiroblasto de granada. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **F.** Notar cor de interferência anômala (azul de Berlim) característica da clorita, destacando o cristal cuja relação textural sugere substituição de granada. Fotomicrografia a polarizadores cruzados.

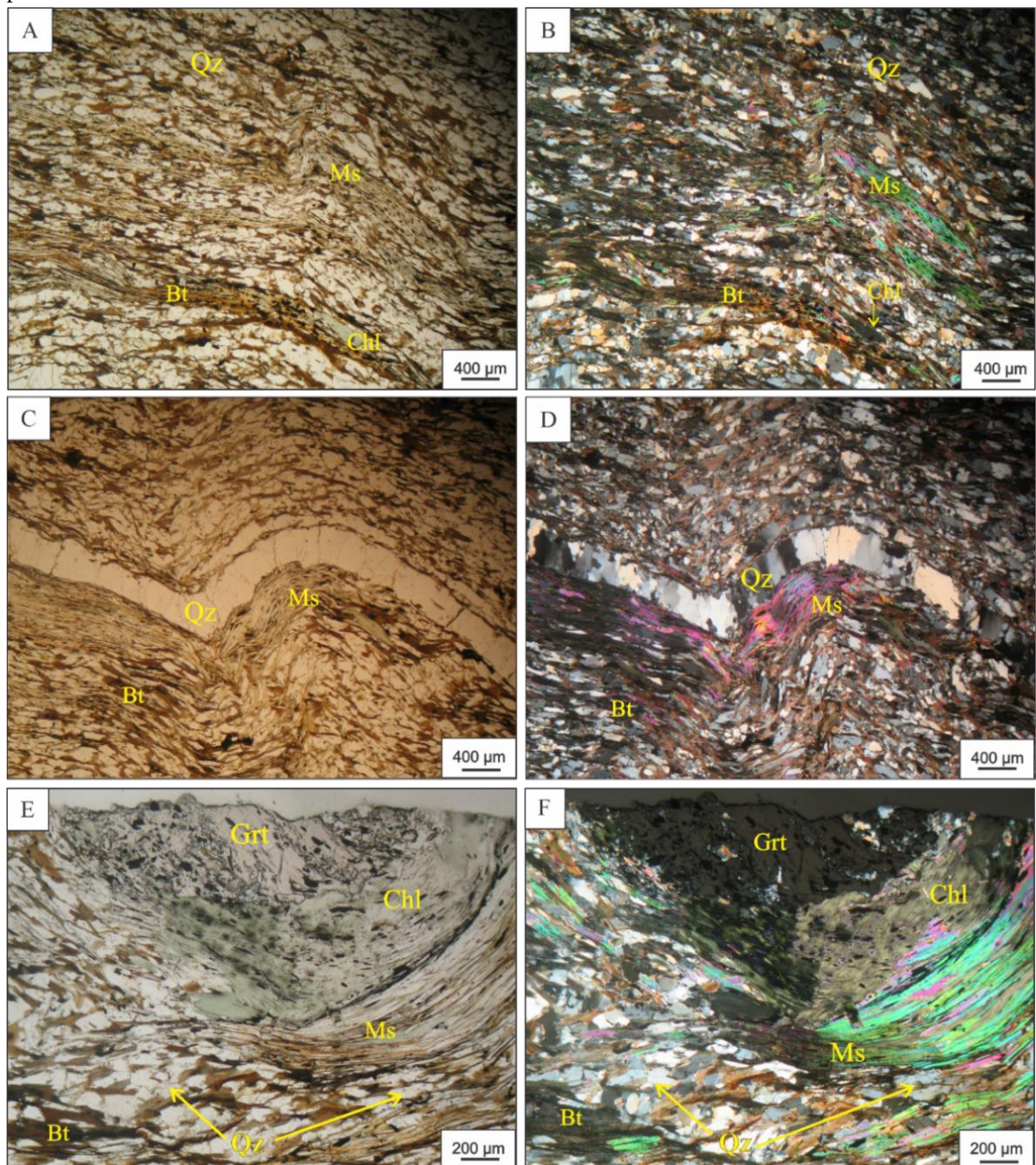


Figura 17. Imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura com detectores de elétrons retroespalhados **A.** e **B.** Notar disposição e contato dos minerais micáceos com o quartzo e plagioclásio. (LR-09). **C.** Granada bordejada por clorita e quartzo. Notar inclusão de quartzo, ilmenita e zircão (escrito em amarelo) (LR-17). **D.** Textura da matriz da rocha com destaque para apatita (mineral acessório – escrito em rosa). **E.** Notar minerais acessórios: monazita, rutilo e ilmenita entre os cristais da matriz (LR-54). **F.** Notar diferença de brilho e contraste entre os acessórios (ilmenita e apatita) (LR-54).

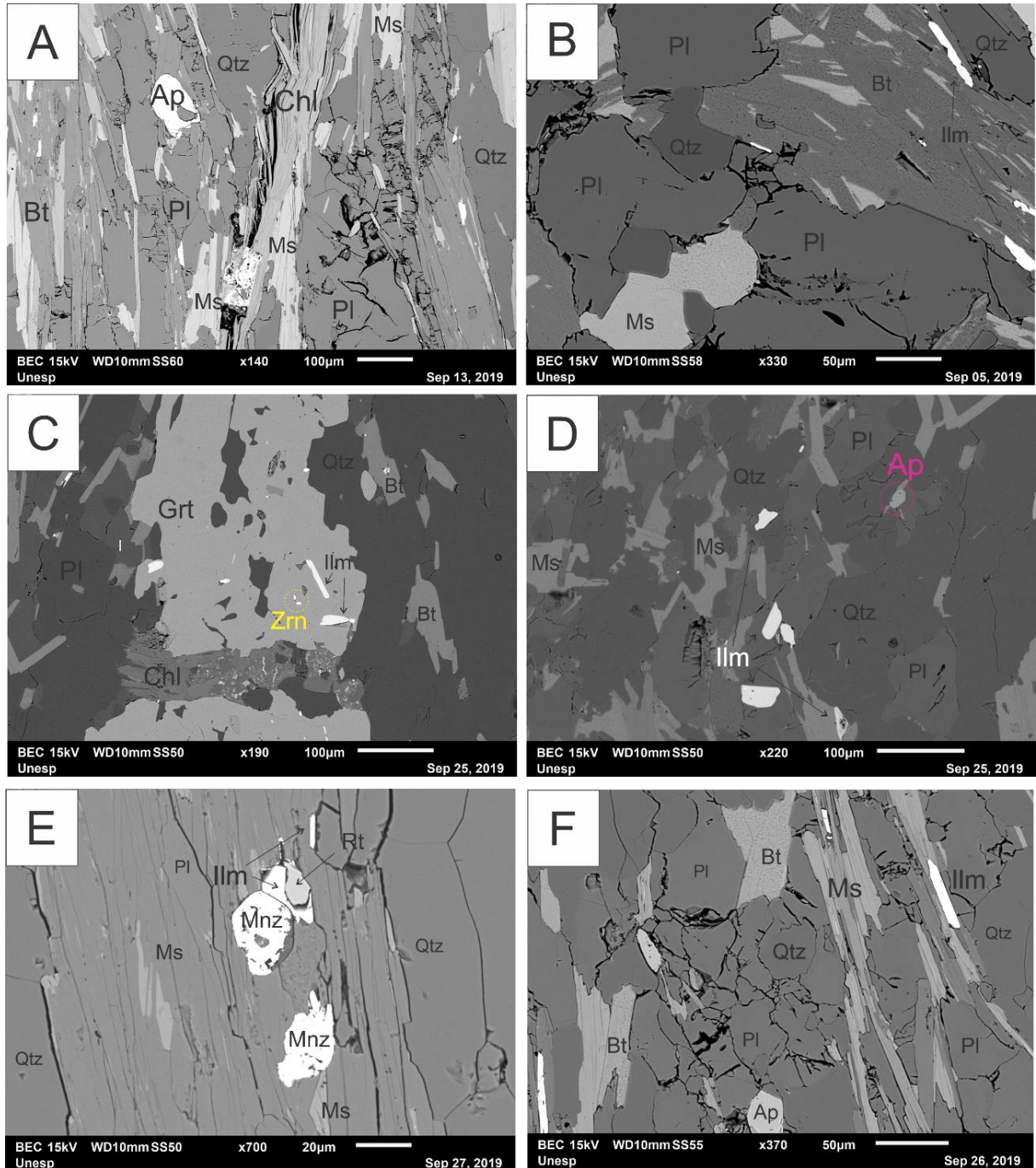
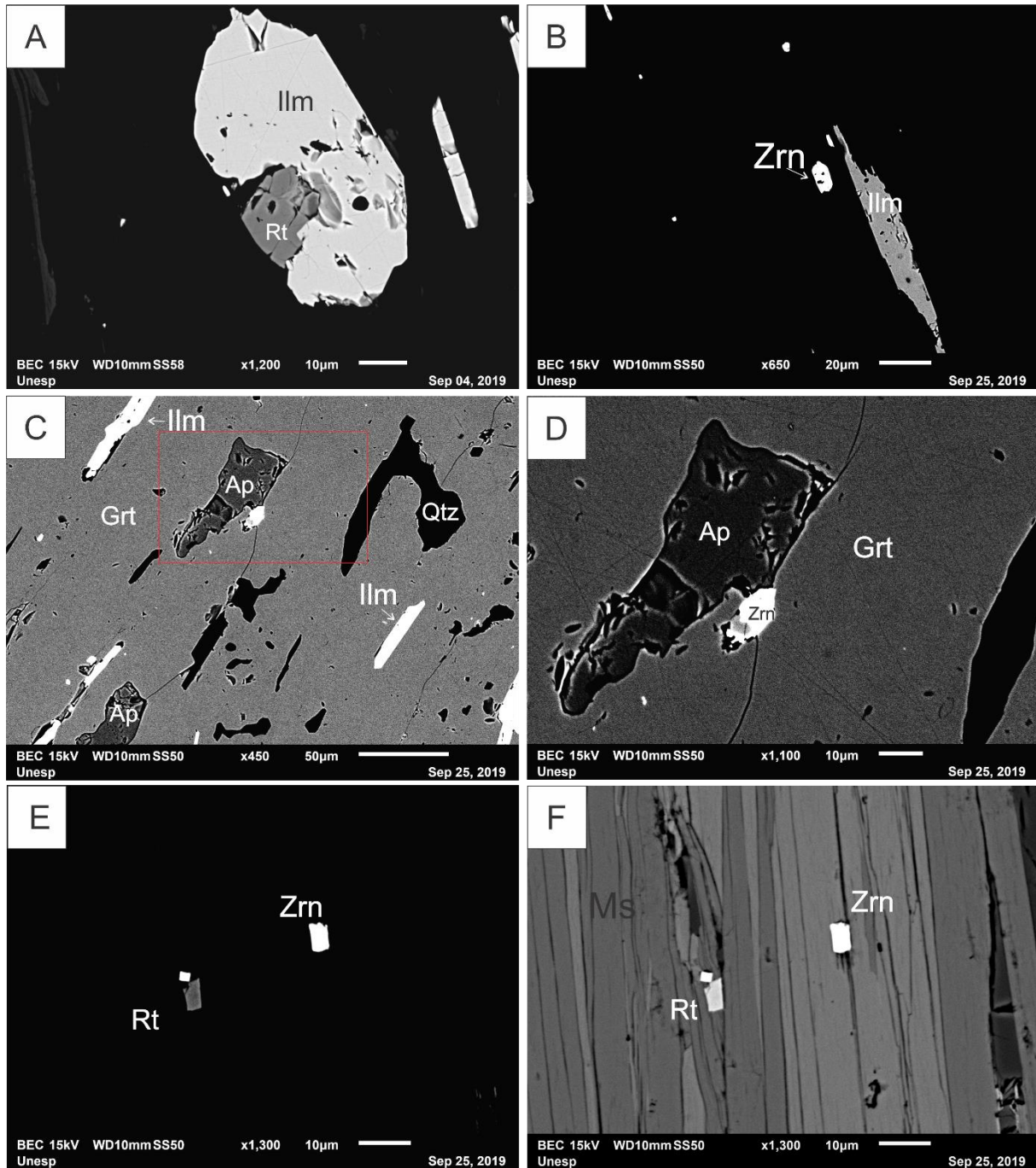


Figura 18. Imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de eletrons retroespalhados. **A.** Notar acessório ilmenita sunstituindo o rutilo. **B.** Notar habito prismático característico do zircão. **C.** Apatita, quartzo, ilmenita e zircão como inclusões na granada. Retângulo vermelho indica o zoon para a próxima Imagem (Figura 18.D). **D.** Aumento na Figura 18.C para dar destaque ao grão de zircão. **E.** Destaque para os minerais acessórios zircão, rutilo. **F.** Mesma imagem, com contraste e brilho diferente, mostrando minerais da matriz. Todas as imagens são da seção polida LR-09 obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com detectores EDS.



4.1.2 Microtectônica

A Microtectônica estuda as estruturas da rocha em microescala e a superposição de eventos deformacionais registrados nelas. Um dos conceitos primordiais desta disciplina é a análise das foliações em uma matriz e em porfiroblastos. Comparando-se a estruturação das foliações dentro (S_i – foliação interna) e fora (S_e – foliação externa) do porfiroblasto, é possível caracterizar a história microtectônica da rocha a partir de eventos de superposição.

No caso do biotita xisto, a orientação das inclusões de minerais opacos (ilmenita), apatita e quartzo nos porfiroblastos de granada, bem como inclusão de quartzo e muscovita na clorita, revelam a fase tectônica (pré, sin, inter ou pós eventos D_1 , D_2 e/ou D_3) dos minerais de acordo com suas foliações.

Observa-se na matriz uma foliação predominante S_n (ou S_2) formada a partir de um evento D_n principal que gerou a xistosidade da rocha. Provavelmente, os cristais de quartzo se segregaram durante o evento D_2 , cuja matriz predominantemente de albita/oligoclásio, biotita, muscovita e clorita é separada por intercalações de veios/lentes ricos em quartzo (Figuras 19 A e B).

Antes do evento D_2 , houve o evento D_1 que gerou a foliação S_1 . O bandamento composicional (S_0) é paralelo ao S_1 . A superposição de eventos marcaram parcialmente os possíveis registros da foliação S_1 , localmente identificáveis.

Próximo aos porfiroblastos de granada, a orientação preferencial da foliação predominante (S_n ou S_2) se torna curva pois a granada funciona como um anteparo rígido para os outros minerais que compõe a matriz. Sendo assim, o porfiroblasto é envolto pela matriz, curvando a foliação predominante S_n (Figuras 19 C e D).

Durante o evento D_n de geração da xistosidade, dobras isoclinais com plano axial (P.A) paralelo à foliação S_n (Figuras 19 E e F) foram formadas. Na região de charneira destas dobras isoclinais (D_n), os agregados de mica sofrem recristalização de modo a reorientar os cristais em ângulos opostos, formando arco poligonal (Figuras 20 A e B). O mesmo pode ocorrer com o quartzo. Estes, por sua vez, ao serem dobrados durante o esforço do evento D_n , são recristalizados e formam cristais com extinção ondulante e com dimensões maiores que os da matriz (mais bem desenvolvidos) (Figuras 20 C e D).

De acordo com a literatura, houve eventos pós D_n , aqui denominados de eventos D_3 de geração de dobras suaves simétricas com antiformas e sinformas, com plano axial perpendicular à foliação predominante S_n (S_2), de modo a crenular a xistosidade. Ou seja, o S_n está curvo (dobrado), mas em geral, não houve geração de uma segunda foliação plano axial associado às fases S_3 (Figuras 20 E e F).

Figura 19. Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas e microtectônicas do Biotita xisto Santo Antônio

A. Foliação predominante Sn característica de uma xistosidade. Notar o processo de segregação de veios de quartzo, deformados durante o evento D₁ e recrystalizados de modo a formar cristais com dimensões maiores que na matriz e com extinção ondulante. Amostra LR-08. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **B.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **C.** Porfiroblasto de granada serve como anteparo rígido, de modo que é envolto pelos cristais da matriz, tornando o Sn curvo. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. Amostra LR-54B. **D.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **E.** Dobras isoclinais sin-Dn com plano axial (PA) paralelo à xistosidade. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. Amostra LR-53. **F.** Fotomicrografia a polarizadores

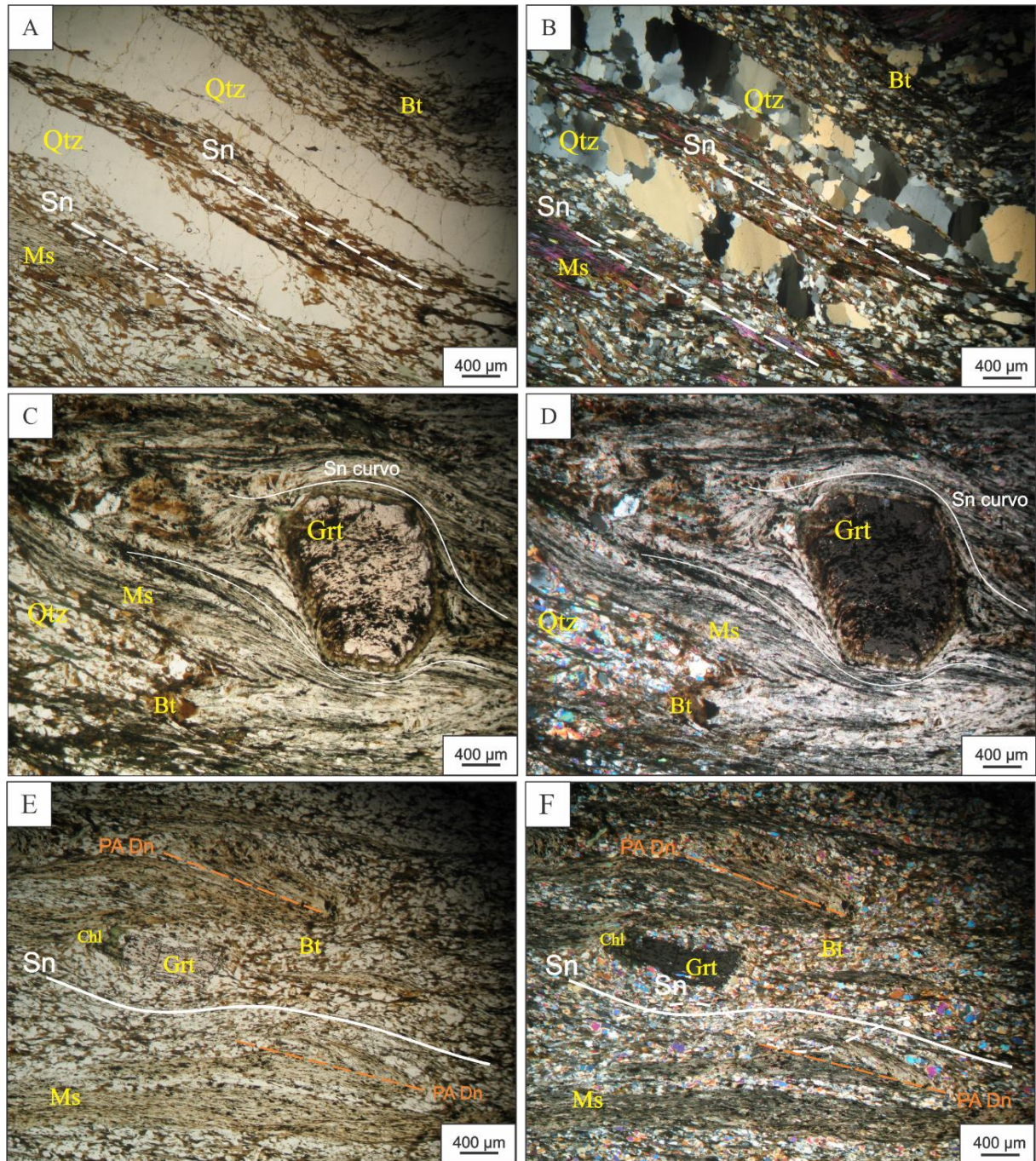
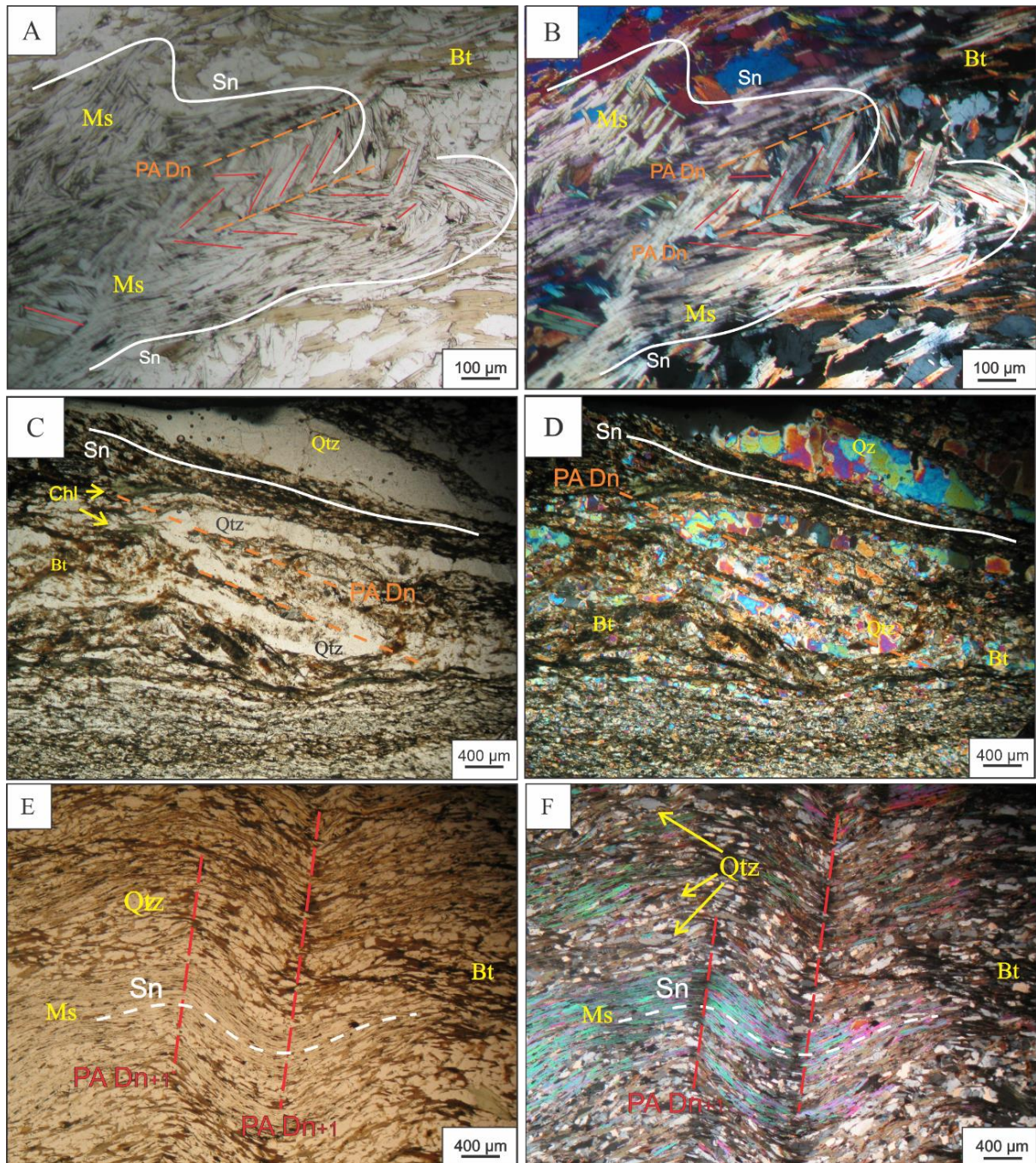


Figura 20 Prancha de fotomicrografias de feições petrográficas e microtectônicas do Biotita xisto Santo Antônio

A. Arco poligonal das micas gerado pela dobra isoclinal sin-Dn. Amostra LR-08. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **B.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **C.** Dobra isoclinal em camada quartzosa gerada durante o evento Dn. Notar que o plano axial (PA Dn) é paralelo ao Sn. Amostra LR-09A. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **D.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **E.** Crenulação Dn+1 formando dobras suaves cujo plano axial (PA Dn+1) é perpendicular à Sn. Amostra LR-08. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **F.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados.



Através da orientação preferencial das inclusões no porfiroblasto de granada, nota-se que a foliação interna (S_i) é reta no núcleo, passando a curvar na borda, definindo um padrão sigmoidal. A porção central do porfiroblasto de granada com S_i reto indica que o mineral iniciou seu crescimento antes do início da fase D_2 . Isto implica que a granada cresceu durante o evento deformacional D_n ou D_2 ($Sin-D_n$), sobrecrecendo os estágios iniciais da crenulação D_2 . Portanto, os porfiroblastos de granada são $Sin-D_2$ ou $Inter D_1-D_2$ a $Sin - D_2$. (Figuras 21 A e B, e Figura 22 A, B, e C).

Com relação aos cristais de clorita, duas gerações diferentes são identificadas: formados por substituição parcial da granada, sobrecrecendo os porfiroblastos (das bordas para o centro) e indicando que são cristais Pós D_2 e $Sin D_3$ (indica retrometamorfismo); ou ainda, cristais de clorita presentes na matriz em associação com as micas (biotita e muscovita).

Quando dispersa pela matriz, a clorita ocorre ora paralela à foliação predominante S_2 (cristais paralelos e crenulados) formada durante atuação do esforço preferencial do evento D_2 (Figuras 21 C e D); ora com orientação paralela à S_3 e perpendicular ao plano axial das dobras D_3 (Figuras 21 E e F), ambas indicativas de metamorfismo progressivo. Nota-se que a geometria do quartzo é a mesma na matriz e como inclusão na clorita, e que há semelhança na orientação alongada dos opacos (paralela à foliação S_n) dentro e fora do porfiroblastos de clorita. Estes são indícios de que a clorita é mineral Pós- D_n e $Sin-D_{n+1}$.

Pela análise microtectônica realizada, pode-se estabelecer um quadro síntese da blastese mineral para a rocha da Unidade Santo Antônio (Quadro 1). Os minerais quartzo, biotita, muscovita e plagioclásio são pretéritos ao evento D_n predominante que gera a xistosidade – bem marcada pela associação existente. Granada é mineral $Sin-D_2$ ou $Inter D_1-D_2$ a $Sin-D_2$ e a clorita é Pós- D_2 e $Sin-D_3$.

Quadro 1: Quadro Síntese da Sequência de Cristalização Mineral.

	D_1	Inter	D_2	Inter	D_3
Quartzo	-----	-----	-----	-----	-----
Muscovita	-----	-----	-----	-----	-----
Biotita	-----	-----	-----	-----	-----
Plagioclásio	-----	-----	-----	-----	-----
Granada	-----	-----	-----	-----	-----
Clorita prog.	-----	-----	-----	-----	-----
Clorita retro.	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 21. Prancha de fotomicrografias do Biotita xisto Santo Antônio **A.** Porfiroblasto de granada Sin-Dn com a foliação interna (Si) reta no núcleo do cristal e curva na borda. Amostra LR-70. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **B.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **C.** Granada quase totalmente substituído/consumida por clorita ao centro da figura, e também ocorrendo a partir da substituição da biotita, paralela à Sn. Amostra LR-08. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **D.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados. **E.** Cristais de clorita com orientação preferencial subparalela ao plano axial de D₃. Amostra LR-08. Fotomicrografia a polarizadores paralelos. **F.** Fotomicrografia a polarizadores cruzados.

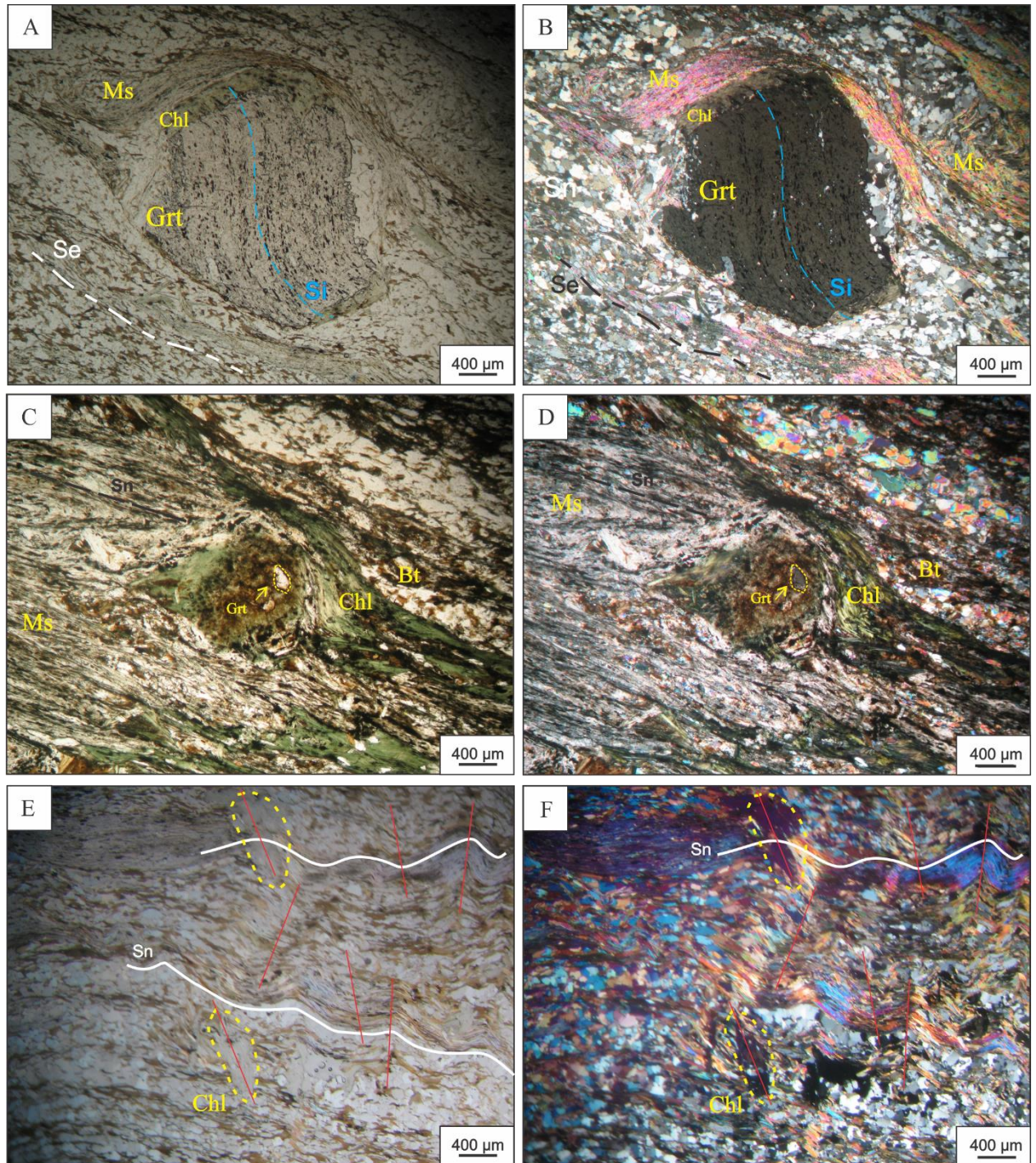
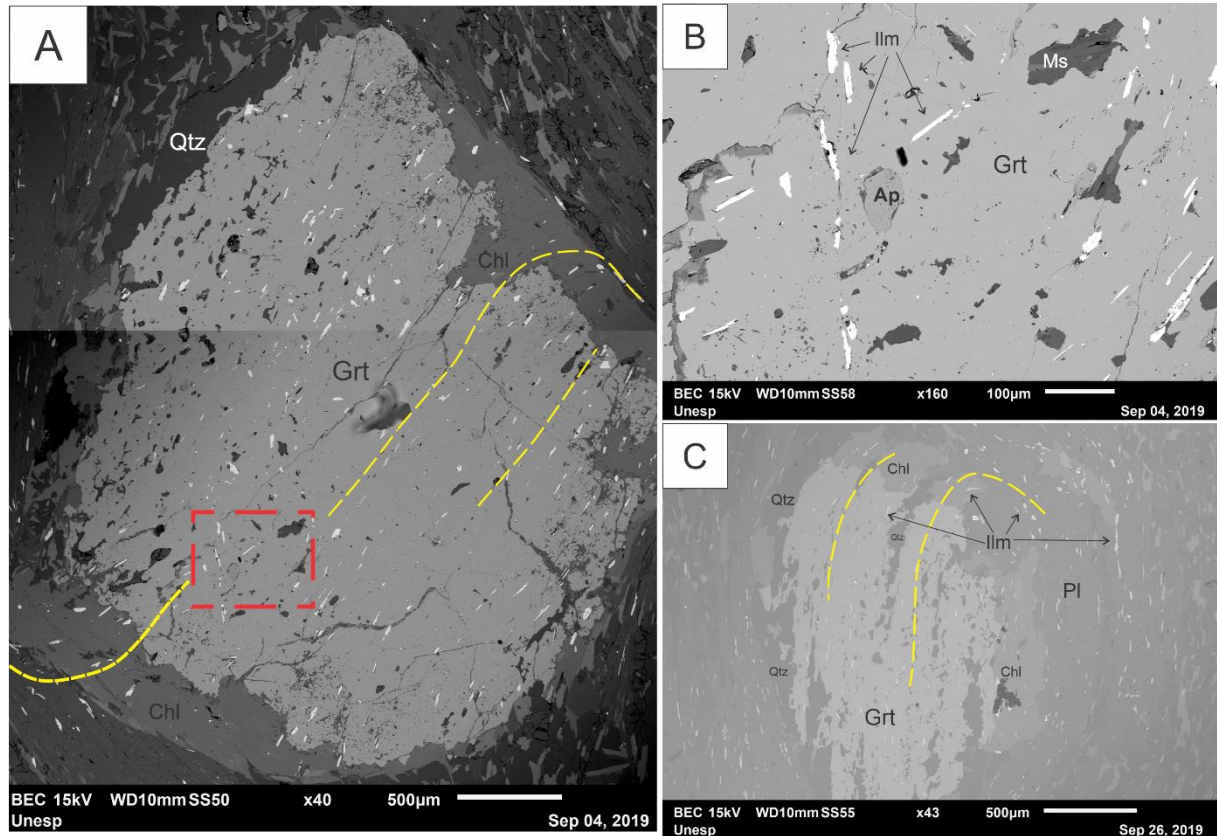


Figura 22. **A.** Cristal de granada bordejado por clorita e quartzo, com trilha de inclusões marcando foliação interna sigmoidal em alto ângulo com a foliação externa (tracejado amarelo). Retângulo vermelho na imagem representa destaque para a figura 22 B (LR-09). **B.** Zoon do quadriculado vermelho da figura 22.A, com destaque às inclusões de apatita, muscovita e ilmenita (LR09). **C.** Tracejado amarelo representa a trilha de inclusões (minerias: quartzo, muscovita e ilmenita) marcando a foliação interna. Si curvo na borda da granada indica que a granada cresceu durante o evento deformacional D2 (Sin-D2) visto que a crenulação existente no Si imita/copia o registro da crenulação. Portanto, os porfiroblastos de granada são Sin-D₂ a Inter-D₁-D₂ (LR-53). Imagens obtidas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com detectores WDS



4.2. Química Mineral:

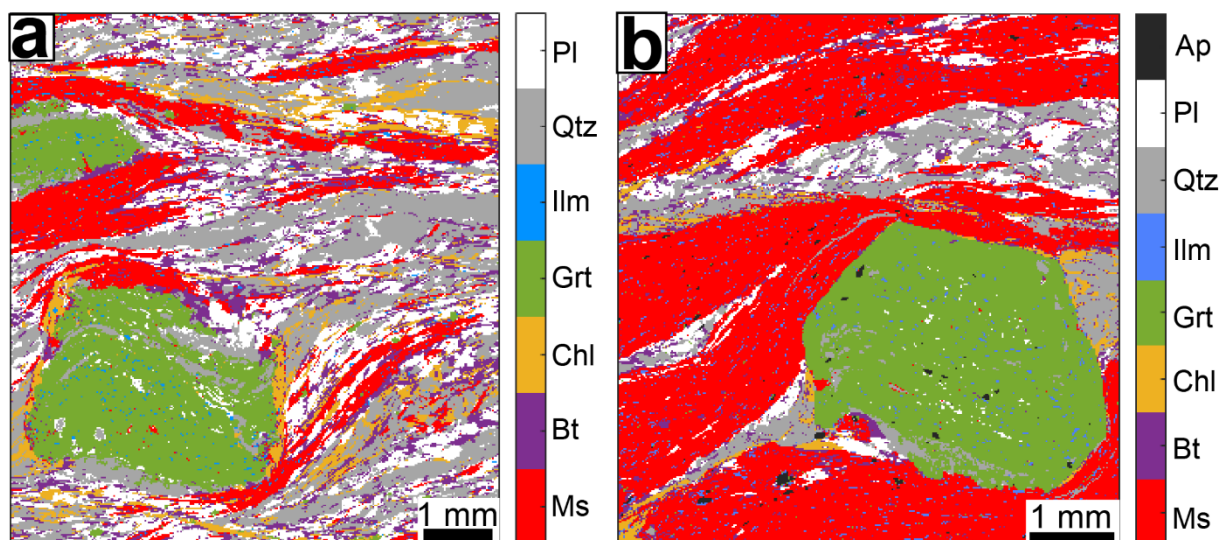
Para os estudos de química mineral foram selecionadas duas (2) seções delgadas (LR-09 e LR-54) para análise na Microsonda Eletrônica (EPMA). Ambas as seções delgadas foram anteriormente analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para melhor reconhecimento e familiarização com os minerais da associação metamórfica e definição da localização exata das análises pontuais a serem feitas nesta etapa.

Os dados de química mineral analisados para os minerais granada, biotita, clorita, muscovita e plagioclásio foram baseados nos mapas de fases das amostras LR-09 (Figura 23 A) e LR-54 (Figura 23 B) e nos dados de pontos quantitativos resultados das análises químicas em valores das concentrações em porcentagem de massa (peso) para óxidos e cátions, apretnados no Apêndice III. A Tabela 06 expressa dados das análises mais representativas. Especificamente para os porfiroblastos de granada realizaram-se perfis composicionais através da análise pontual entre borda, região intermediária e núcleo dos cristais.

A fórmula química dos minerais foi obtida a partir das análises químicas da EPMA e o tratamento destes dados ocorreu com o auxílio do *software* “AX_62” de Tim Holland. A descrição das fases minerais e os resultados são apresentados nos itens a seguir.

Figura 23. Mapa de fases do biotita xisto Santo Antônio, no qual foram baseadas as análises de química mineral.

A. amostra LR-09. **B.** Amostra LR-54.



4.2.1. Grupo das Granadas

Na rocha Biotita xisto Santo Antônio da *Nappe* de Luminárias, as granadas ocorrem como porfiroblastos euédricos ou subédricos de até 3,5 mm de diâmetro, com trilhas de inclusão (quartzo, ilmenita, rutilo e subordinadamente muscovita) demarcando foliação interna. É comum notar cristais de granada levemente rotacionados em relação à foliação externa, bem marcada pela trilha de inclusão tanto no núcleo quanto borda do porfiroblasto.

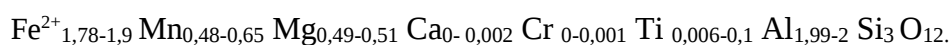
Para estudos de química mineral na granada foram realizadas, no total, 49 análises pontuais, sendo 24 pontos na lâmina LR-09 e 25 pontos na LR-54. Os dados de concentração analisados são apresentados nas Tabelas 07, 08 e 09 do Apêndice III.

A fórmula estrutural da granada é representada por $A_3B_2(SiO_4)_3$, sendo *A* e *B* referentes aos sítios catiônicos de coordenação 6 e 8. O sítio *A* é preenchido por Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} e Ca^{2+} . Já o sítio *B* é preenchido por Fe^{3+} , Mn^{3+} , Al^{3+} , Ti^{3+} e Cr^{3+} .

O preenchimento desses sítios leva à formação de sete membros finais, e as análises de granada são geralmente recalculadas em termos de composição desses membros finais: $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ (piropo), $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ (almandina), $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ (espessartita), $Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$ (uvarovita), $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ (grossulária) e $Ca_3Fe^{3+}_2Si_3O_{12}$ (andradita).

Os tipos piropo, almandina e espessartita são ricos em alumínio (Al) e ausentes em cálcio (Ca) dentro do sítio catiônico *A*, conhecidas como séries das pirlaspitas. Já os membros grossulária, uvarovita e andradita são da série das ugranditas (*A*= Ca).

Com os dados de química mineral para granada obtidos por EPMA, pode-se fazer o cálculo da fórmula mineral a partir das porcentagens em peso dos óxidos (vide tabela 05), onde os cátions das fórmulas estruturais foram calculados na base de 12 oxigênios. A fórmula mineral obtida foi:

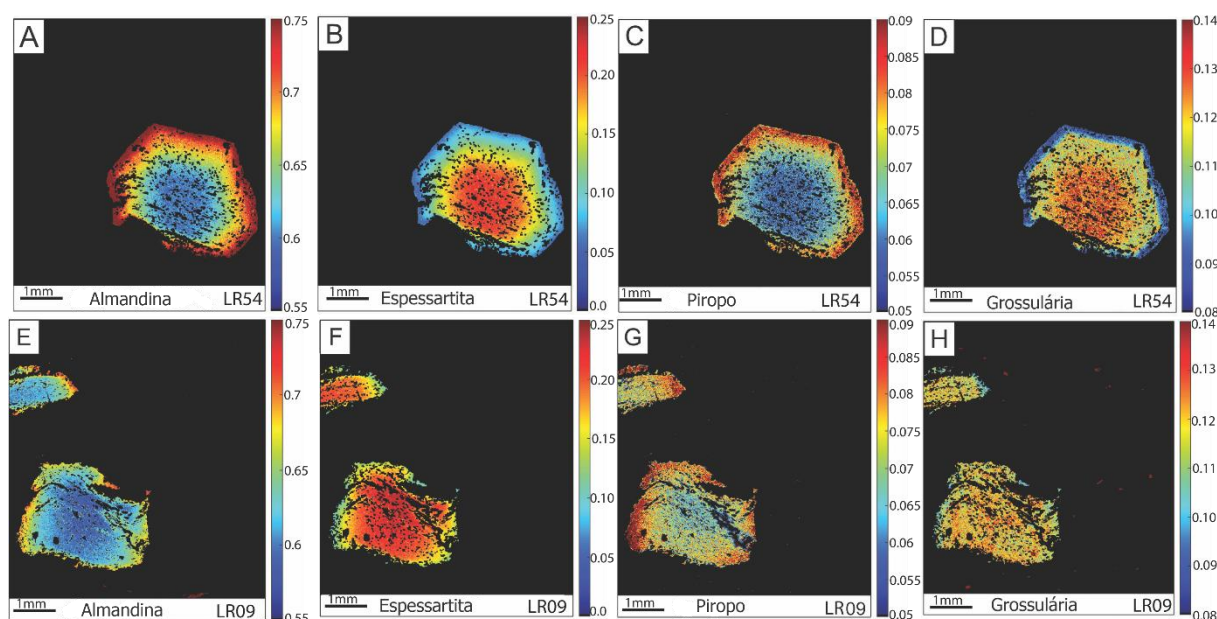


Desse modo, os cristais de granada da porção norte da *Nappe* de Luminárias (Unidade Santo Antônio) ocorrem como porfiroblastos com variação química entre centro e borda. Nos mapas de composição química da granada nas lâminas LR-54 e LR-09 apresentados na Figura 24, é possível perceber que este zoneamento ocorre para os membros almandina e espessartita, com variação das suas concentrações na borda e núcleo dos cristais. O mesmo zoneamento é mais suave para os tipos piropo e grossulária.

Observa-se que os teores de almandina (Fe) são maiores nas bordas (Alm₇₀₋₇₅) e decrescem em direção ao núcleo (Alm₅₅₋₆₆) (Figuras 24 A e E). Há maior concentração de espessartita (Mn) no centro/núcleo (Sps₁₅₋₂₅) e sua concentração vai diminuindo para as bordas

(Sps₁₀) (Figuras 24 B e F). Os membros piropo (Mg) e grossulária (Ca) apresentam fraco zoneamento. Para o membro final piropo, há concentração (Prp₉) na borda e variação de (Prp₆₋₇) no núcleo dos cristais (Figuras 23 C e G). Grossulária varia do núcleo para borda (Figuras 24 D e H), respectivamente com (Grs₁₄₋₉). Em suma, os teores de Fe e Mg são maiores nas bordas, enquanto que os de Ca e Mn são maiores no centro dos cristais

Figura 24. Química mineral da granada no biotita xisto da porção norte da *Nappe* de Luminárias (Unidade Santo Antônio). A a D. mapa de composição de cristal de granada para lâmina LR-54. E a H. mapa de composição de cristal de granada para lâmina LR-09.



4.2.2. Grupo das Micas

Os filossilicatos são os minerais mais abundantes – maior proporção volumétrica – no biotita xisto da Unidade Santo Antônio da *Nappe* de Luminárias. O grupo das micas é o termo usado para designar um importante grupo de minerais (total de 27) pertencentes ao grupo dos filossilicatos. Na rocha do presente estudo, ocorrem principalmente muscovita e biotita.

4.2.2.1. Biotita

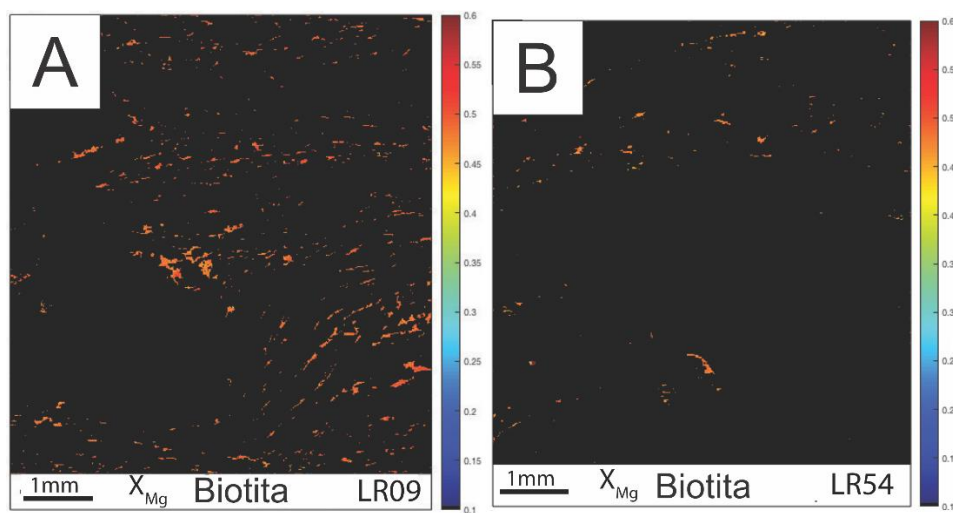
Os cristais de biotita analisados apresentam coloração marrom escuro, são subédricos a anédricos, com tamanhos que variam de 0,2 mm a 0,8 mm e geralmente associados à muscovita e clorita da matriz na rocha, seguindo a orientação preferencial da foliação. Para estudos de química mineral em biotita foram realizadas, no total, 36 análises pontuais em microsonda, sendo 19 e 17 pontos respectivamente, para as seções delgadas LR-09 e LR-54. Os dados de concentração analisados são apresentados nas Tabelas 10 e 11 do Apêndice III.

A fórmula estrutural geral da biotita é: $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$. As fórmulas calculadas pelos dados de análise química da biotita foram feitas na base de 11 oxigênios, obtendo-se para biotita xisto da Unidade Santo Antônio a fórmula química média:



Pela análise de EPMA e pelo mapa composicional (Figura 25) observa-se que as concentrações de magnésio (X_{Mg}) tanto para amostra LR-09 quanto LR-54 estão em torno de 0.5 a 0.6, valores altos que correspondem à biotita dentre as micas presentes na matriz. Não foram analisados cristais de biotita em granada pois este mineral não compõe associação que faz parte da trilha de inclusões no porfiroblasto.

Figura 25. Química mineral de biotita no biotita xisto da porção norte da *Nappe* de Luminárias (Unidade Santo Antônio). **A.** Mapa de composição de cristais de biotita para lâmina LR-09. **B.** Mapa de composição de cristais de biotita para lâmina LR-54.



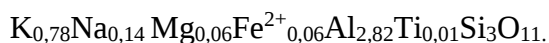
4.2.2.2. Muscovita

A muscovita é o filossilicato mais abundante na rocha da área de estudo. Apresentam-se como cristais subhédricos, incolores e de forma lamelar, com dimensões que variam de 0,8mm a 2 mm. Ocorrem associados à biotita e clorita da matriz na rocha, seguindo a orientação preferencial da foliação. No estudo de química mineral da muscovita, foram feitas 46 análises pontuais no total, sendo 28 destas distribuídas pela seção delgada LR-09, e 18 na LR-54. Os dados de concentração analisados são apresentados nas Tabelas 12 e 13 do Apêndice III.

A fórmula estrutural da muscovita é: $AR_{2-3}T_4O_{10}X_2$. Sendo o sítio A, o cátion entre-camadas e preenchido por K, Na, Ca, Ba, Cs e NH_4 . O sítio R (sítio com coordenação octaedral) é ocupado por Al, Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Li, Ti, Mn^{2+} , Mn^{3+} , Zn, Cr V e Na. T representa os cátions

tetraedrais ocupados por Si, Al, Fe^{3+} , Be e B. O é o sítio correspondente ao oxigênio e X é o ânion não ligado aos tetraedros (OH, F, Cl, O e S).

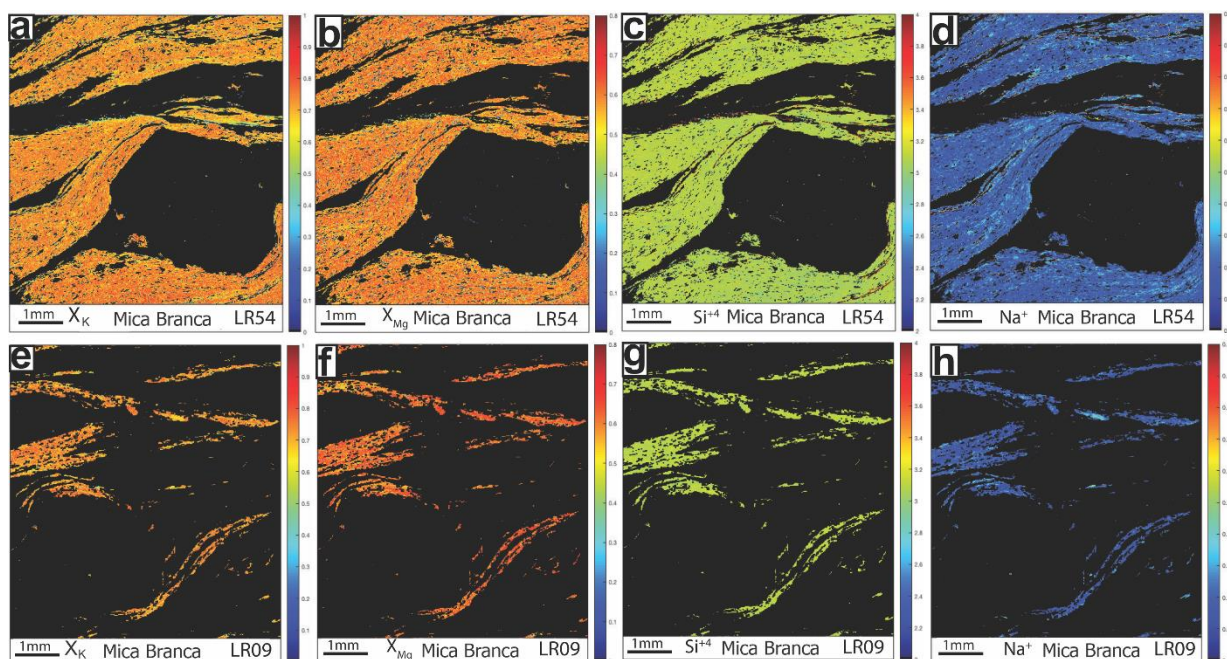
Com os dados de química mineral para muscovita obtidos por EPMA, pode-se fazer o cálculo da fórmula mineral a partir das porcentagens em peso dos óxidos (vide tabela 05), onde os cátions das fórmulas estruturais foram calculados na base de 11 oxigênios. Desse modo, a fórmula química média dos cristais de muscovita analisados é:



Através de mapas composicionais das concentrações de magnésio, sílica e sódio para a muscovita (Figura 26), ela é enquadrada como mica branca. Muscovita, sericita, fengita e paragonita são comumente designadas micas brancas (micas dioctaédricas) (BUCHER & GRAPES, 2011), pela transparência ou coloração mais clara que micas pretas (biotita, por exemplo).

Como resultado, para a amostra LR-54, a mica branca apresenta proporções dos cátions: Mg (0,6 a.p.f.u.), Si^{4+} (0,5 a.p.f.u.) e Na^+ (0,1 a 0,15 a.p.f.u.). Na amostra LR-09, os valores variam um pouco mais: Mg (0,6 a 0,7 a.p.f.u.), Si^{4+} (0,3 a 0,32 a.p.f.u.) e Na^+ (0,05 a 0,1 a.p.f.u.).

Figura 26. Química mineral de muscovita no biotita xisto da porção norte da *Nappe* de Luminárias (Unidade Santo Antônio). **A. a D.** Mapa composicional da muscovita com valores em porcentagem de X_{Mg} , sílica e sódio para amostra LR-54. **E. a H.** Mapa composicional da muscovita com valores em porcentagem de X_{Mg} , sílica e sódio para amostra LR-09.



4.2.3. Grupo das Cloritas

O grupo das cloritas é um derivado dos filossilicatos. Vale ressaltar que “clorita” não é nome de uma espécie mineral, mas sim um grupo que compreende cerca de onze (11) espécies minerais (KLEIN & DUTROW 2012).

Os cristais de clorita em biotita xisto da Unidade Santo Antônio apresentam coloração variando de amarelo castanho à verde. Possuem hábito planar, formas subedrais a anedrais, de dimensões medianas de até 1 mm de comprimento dispersos pela matriz e associados com as micas; ou ainda, na forma de cristais grandes (até 2.3 mm de diâmetro) bordejando porfiroblastos de granada.

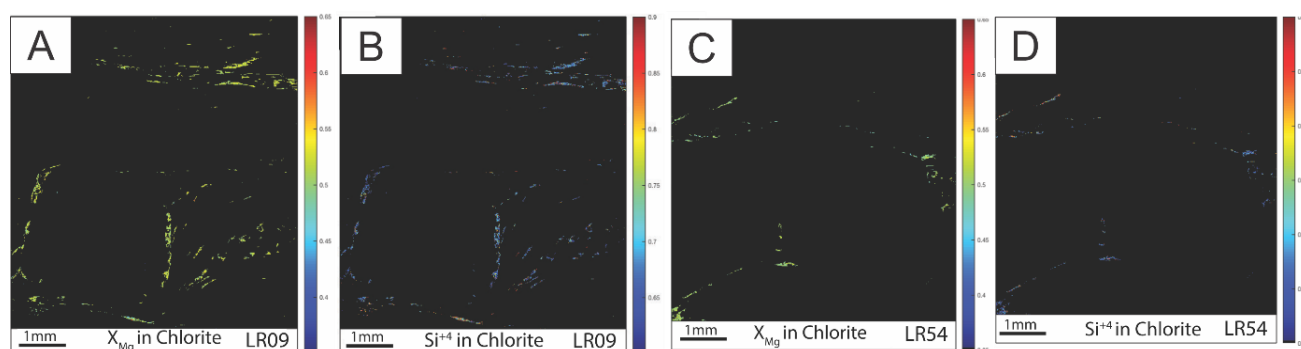
Para o estudo de química mineral da clorita foram feitas 21 análises pontuais no total, sendo 7 destas distribuídas pela seção delgada LR-09, e 14 na LR-54. Os dados de concentração analisados são apresentados nas Tabelas 14 e 15 do Apêndice III.

A fórmula estrutural geral do grupo das cloritas é: $A_{5-6}Z_4O_{10}(OH)_8$, em que A compreende o sítio catiônico que pode ser preenchido por Al, Si, Fe^{3+} , Li, Mg, Mn, Ni. O sítio catiônico Z, por sua vez, compreende os cátions Al, Si, Fe^{3+} . Devido à extensa solução sólida existente, alguns nomes foram dados aos membros, tais como: chamosita $[(Fe^{2+}, Mg, Fe^{3+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH, O)_8]$, clinoclora $[(Mg, Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8]$, pennantita $[Mn_5Al(Si, Al)_8O_{10}(OH)_8]$, clorita $[(Mg, Al, Fe)_{12}[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_{16}]$ e sudoíta $Mg_2Al_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$. Com os dados de química mineral para clorita obtidos por EPMA, pode-se fazer o cálculo da fórmula mineral na base de 14 oxigênios. Desse modo, a fórmula química média dos cristais analisados é:



O mapa composicional da clorita (Figura 27) apresenta teores de magnésio (X_{Mg}) que não ultrapassam 0.5 a 0.55 para ambas as amostras.

Figura 27. Química mineral de clorita no biotita xisto da porção norte da *Nappe* de Luminárias (Unidade Santo Antônio).. **A. e B.** Mapa composicional com valores em porcentagem de X_{Mg} e sílica (LR-09). **C. e D.** Mapa composicional com valores em porcentagem de X_{Mg} e sílica (LR-54).



4.2.4. Plagioclásio

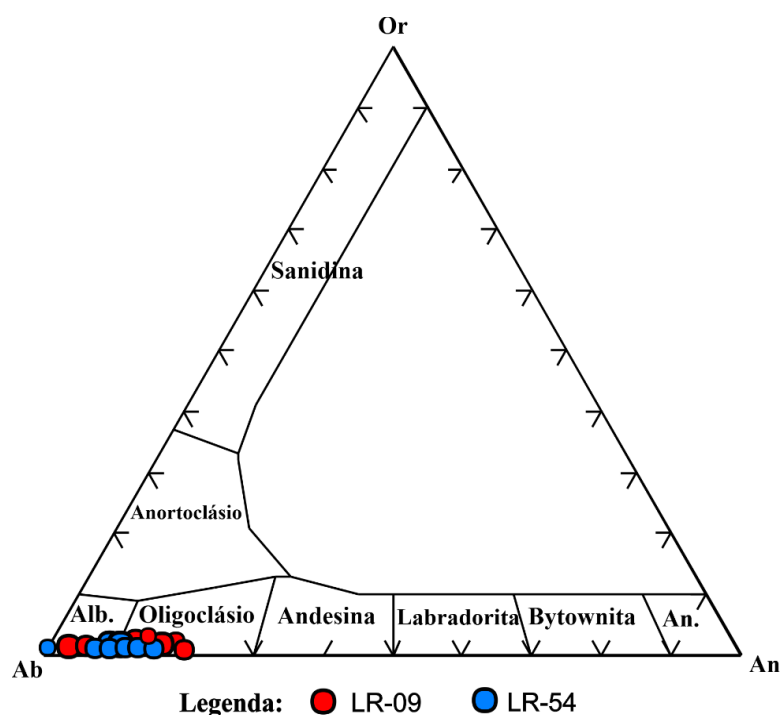
Os plagioclásios são agrupados como uma série dentro do grupo dos feldspatos (tectossilicatos). À altas temperaturas, se forma uma série completa de solução sólida desde albita (Ab) pura ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) até anortita (An) pura ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). A composição química de feldspatos pode ser representada em um diagrama ternário, que apresenta em seus vértices os membros finais anortita (An), albita (Ab) e feldspato potássico - ortoclásio (Or).

Nas rochas xistosas da Unidade Santo Antônio, os cristais de plagioclásio analisados são subédricos a anédricos, com dimensões que variam de 0,6 mm a 1.3 mm, ocorrem em alta proporção volumétrica e bem distribuídos na matriz em contato com quartzo e micas, principalmente.

Para estudo de química mineral em plagioclásio foram realizados, na EPMA, 142 pontos distribuídos entre as amostras de biotita xisto, sendo 70 na seção delgada LR-09 e 72 na LR-54. Dados mais representativos são expostos na Tabela 06, e um compilado de todos os resultados analisados são apresentados nas Tabelas 16 e 17 do Apêndice III.

Tais dados foram tratados no *software* AX_62 de Tim Holland, de modo a se obter a correlação entre porcentagem de CaO, Na_2O e K_2O , possibilitando o mesmo de ser plotado no Diagrama Ternário de classificação dos feldspatos (Figura 28), com os membros finais ortoclásio-albita-anortita. Resultados obtidos neste trabalho indicam que os plagioclásios presentes apresentam composição variando entre albita ($\text{Ab}_{0,85-0,9}$) e oligoclásio.

Figura 28. Diagrama Ternário de Classificação de Feldspatos com membros finais Or-Ab-An. Análises pontuais feitas em 138 cristais de plagioclásio (LR-09 e LR-54).



4.3. Termobarometria (*average PT*):

Para a determinação das condições de pressão e temperatura à que as rochas do presente estudo foram formadas, fez-se uso de cálculos termobarométricos através do *software* THERMOCALC 3.40 na função *average P-T* (Powell & Holland, 1994) com uso de banco de dados tc-ds62 (HOLLAND & POWELL, 2011).

Cálculos termobarométricos foram realizados em duas amostras (LR-09 e LR-54) de Biotia Xisto Santo Antônio (porção norte da *Nappe* de Luminárias). Para tal, é necessário ter dados da composição química dos minerais em equilíbrio (previamente já conhecida por estudo petrográfico e de química mineral) para obtenção das condições médias de temperatura e pressão, com as suas respectivas incertezas.

Para os cálculos, utilizou-se os seguintes minerais: granada, biotita, clorita, muscovita, plagioclásio, ilmenita, quartzo e água; sendo que as análises minerais foram agrupadas de acordo as associações minerais de diferentes momentos da trajetória metamórfica: metamorfismo progressivo, pico e regressivo. As respectivas paragêneses são apresentadas a seguir:

- i) Metamorfismo progressivo: plagioclásio (albita/oligoclásio) + granada (núcleo) + biotita, (Ilm+Qtz+Ms+H₂O) em excesso;
- ii) Pico metamórfico: plagioclásio (albita/oligoclásio) + granada (borda) + biotita + muscovita, (Ilm+Qtz+Ms+H₂O) em excesso;
- iii) Metamorfismo regressivo: clorita + plagioclásio + biotita + muscovita, (Ilm+Qtz+Ms+H₂O) em excesso.

Os cálculos de *average PT* foram feitos com base nas análises pontuais na granada das duas amostras, como se observa na Figura 29.

Não se obteve resultado para as condições de metamorfismo progressivo, por insuficiência dos dados para cálculo das reações pela paragênese estabelecida Bt+Grt(núcleo)+Ms+Pl+Ilm+Ms+H₂O+Qtz. O mesmo ocorreu para o metamorfismo regressivo, ao dar entrada com a paragênese clorita + plagioclásio + biotita + muscovita, (Ilm+Qtz+Ms+H₂O) em excesso.

No entanto, obteve-se resultados satisfatórios para as condições de pico metamórfico para ambas as amostras. O cálculo da *average PT* com entrada da paragênese Bt+Grt(porção intermediária e borda)+Ms+Pl, com Ilm+Ms+H₂O+Qtz em excesso, que deu as seguintes condições: 717°C (±67°C) e 7.2kbar (±3.1kbar) para LR-09 e 739°C (±93°C) e 5.7kbar (±3.9kbar) para LR-54.

O Apêndice IV apresenta, detalhadamente os gráficos e respectivas tabelas com os valores para cada análise pontual de pico metamórfico. Aqui são apresentados, sucintamente (Tabela 18, 19 e Figura 30) os resultados obtidos:

Figura 29. Imagens de BSE analisados por EPMA. **A.** e **B.** cristais de granada da amostra LR-09. **C.** cristal de granada amostra LR-54.

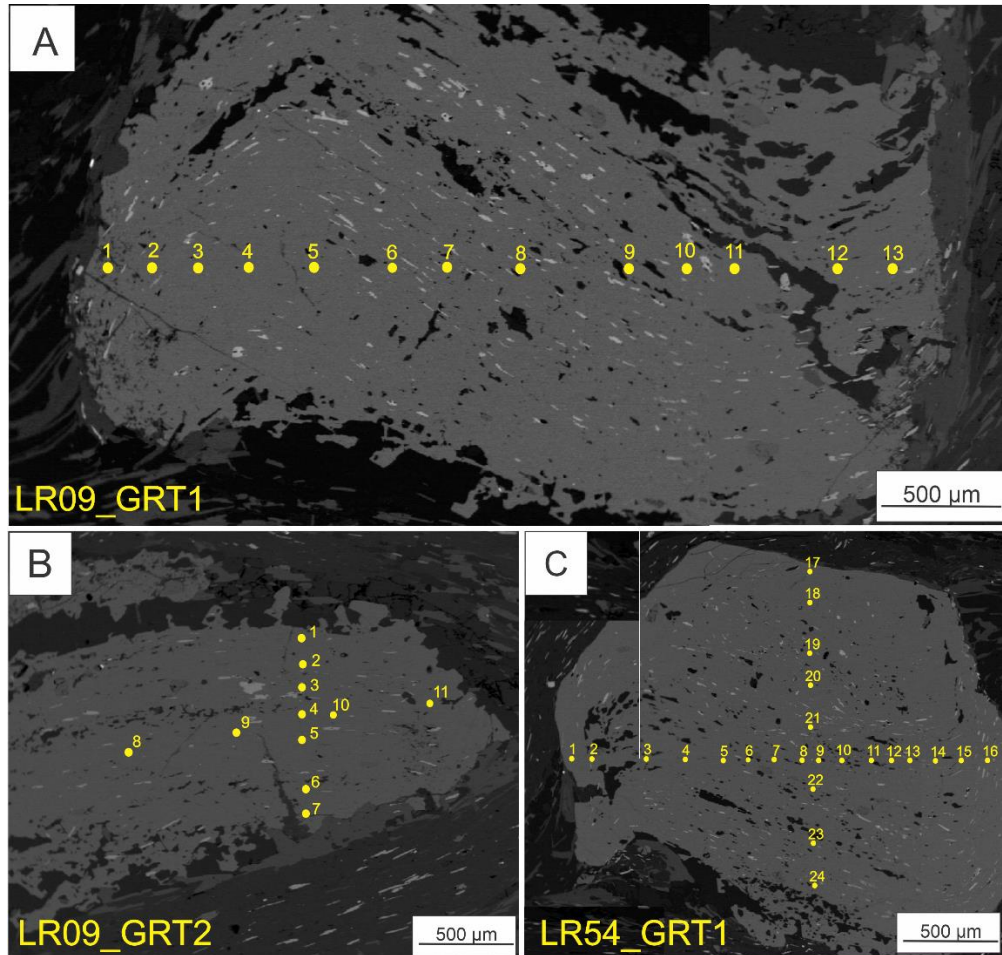


Tabela 18. Condições de P e T para pico metamórfico analisadas para amostra LR-09. Cálculos pelo *software*

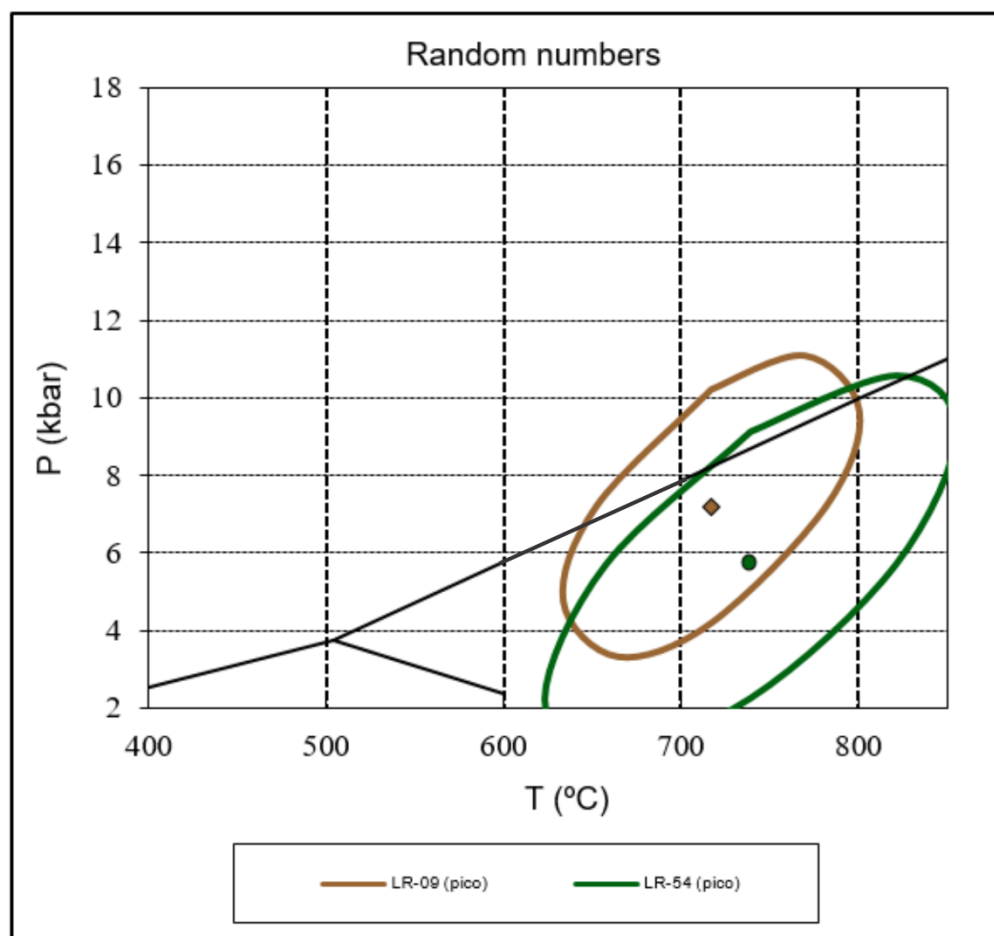
THERMOCALC.

Análises	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
LR09_GRT1_1	725	67	7,3	3	0,632
LR09_GRT1_2	725	67	7,3	3,1	0,627
LR09_GRT1_3	747	92	7,5	4,1	0,65
LR09_GRT1_4	715	70	7,2	3,2	0,626
LR09_GRT1_5	707	73	7,2	3,4	0,626
LR09_GRT1_11	707	68	7	3,1	0,634
LR09_GRT1_12	715	69	7,2	3,2	0,628
LR09_GRT1_13	719	68	7,3	3,1	0,628
LR09_GRT2_1	717	67	7,2	3,1	0,631
LR09_GRT2_2	715	68	7,2	3,1	0,629
LR09_GRT2_3	715	69	7,2	3,2	0,628
LR09_GRT2_6	705	68	7	3,1	0,633
LR09_GRT2_7	710	68	7,1	3,1	0,633
LR09_GRT2_11	720	67	7,1	3	0,634

Tabela 19. Condições de P e T para pico metamórfico analisadas para amostra LR-54. Cálculos pelo *software* THERMOCALC.

Análises	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
LR54_GRT1_1	746	91	6	3,9	0,698
LR54_GRT1_2	739	93	5,7	3,9	0,71
LR54_GRT1_3	715	69	7,2	3,2	0,628
LR54_GRT1_14	747	92	6,4	4,1	0,675
LR54_GRT1_15	746	90	6,1	3,9	0,689
LR54_GRT1_16	707	68	7	3,1	0,634
LR54_GRT1_17	745	91	5,9	3,9	0,699
LR54_GRT1_18	749	91	6,3	4	0,678
LR54_GRT1_23	749	91	6,3	4	0,678
LR54_GRT1_24	732	100	6,4	4,5	0,67

Figura 30. Gráfico representativo dos dados de pico metamórfico por *average PT* das amostras LR-09 e LR-54. av=average, sd=desvio padrão e corr=correlação, temperatura (°C) e pressão (Kbar). As linhas pretas são correspondentes ao diagrama de fases para aluminossilicatos (cinaita, sillimanita, andaluzita), extraído de Holdaway & Mukhopadhyay (1993).



Series	Sample	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
1	LR-09 (pico)	717	67	7,2	3,1	0,631
2	LR-54 (pico)	739	93	5,7	3,9	0,71

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Discussão do metamorfismo e comparação com a literatura

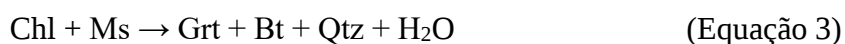
O Biotita xisto Santo Antônio corresponde a um litotipo de rocha mineralogicamente formada por biotita, clorita, muscovita, plagioclásio (albita/oligoclásio) com granada e lentes de quartzo, além de ilmenita, apatita, zircão, rutilo e monazita como minerais acessórios.

Os aspectos mineralógicos e texturais estudados foram essenciais para a caracterização das paragêneses minerais. A termobarometria usando o método *average PT* do THERMOCALC foi eficiente para a caracterização das condições de P e T para a rocha em questão. Amostra LR-09 atinge 717 ($\pm 67^\circ\text{C}$) e 7.2 kbar (± 3.1 kbar) no pico metamórfico, e a LR-54 atinge 739 ($\pm 93^\circ\text{C}$) e 7.5 kbar (± 3.9) kbar; dados que coincidem com informações de condições de P e T padrão para minerais na fácies anfibolito superior.

Apesar da associação mineral quartzo + albita/oligoclásio + granada + biotita + muscovita + clorita + H_2O presente na rocha indicar paragênese típica das condições de metamorfismo Barroviano em fácies xisto verde superior, zona da granada; os resultados obtidos por termobarometria indicam pico do metamorfismo em fácies anfibolito.

Segundo Bucher & Grapes (2011), na zona da granada, além da mineralogia típica $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} + \text{Ab}$, os opacos ilmenita ou magnetita podem estar presentes junto com minerais acessórios apatita, turmalina e zircão; o que é muito parecido com a mineralogia descrita para as rochas do presente estudo.

Desse modo, pode-se inferir que o metamorfismo progressivo se iniciou durante fácies xisto verde, pela cristalização dos minerais clorita, muscovita, granada, biotita e albita. Segundo dados de Winter (2001) e Bucher & Grapes (2011), a formação da granada a partir da quebra da clorita se dá segundo a equação (3):



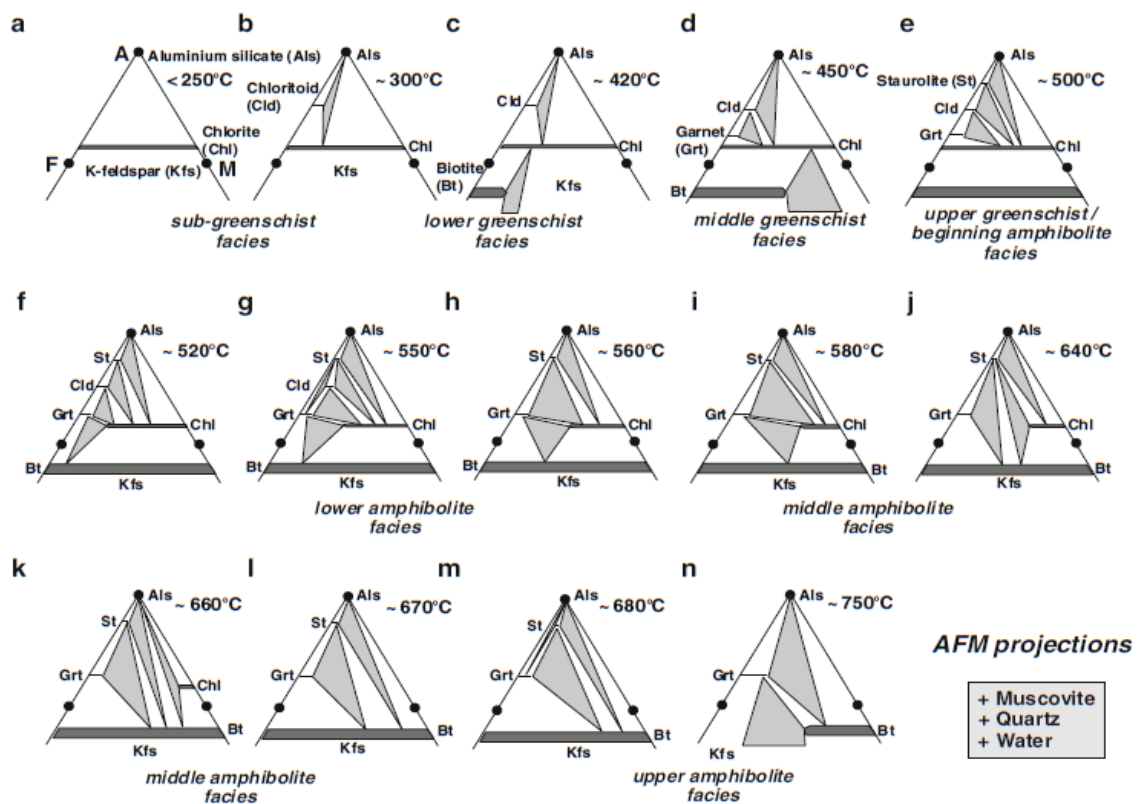
Segundo Bucher & Frey (2002) e Bucher & Grapes (2011), próximo a 400°C há o início da cristalização da biotita, formada a partir de feldspato potássico e clorita. A reação tem condições de equilíbrio em 420°C e cerca de 3.5 kbar no sistema KFMASH puro.

O conjunto de minerais FK e Chl (em baixo grau) é substituído por Bt e Chl em um intervalo de cerca de 40°C , como é possível observar nas projeções do diagrama AFM para metapelitos (Figura 31 a-e). Nas condições de fácies xisto verde mostradas no diagrama, feldspato potássico e clorita são estáveis a aproximadamente 300°C (b). Em (c) e (d) alguns

pontos intermediários mostram as posições do campo trifásico e, em (e), toda a faixa de X_{Fe} é coberto pela associação Chl – Bt (na presença de excesso de Ms e Qtz).

A granada aparece nos metapelitos a temperaturas em torno de 450°C (Figura 31 d). Bucher & Grapes (2011) afirmam que, inicialmente, as granadas incorporam preferencialmente manganês (Mn) na forma do componente espessartita (Sps) à baixas temperaturas. Portanto, a granada ferromagnesiana aparece em temperaturas significativamente mais baixas do que a granada almandina (Alm). Além disso, granadas nos metapelitos também contêm sempre pequenas quantidades de cálcio (Ca) que diminui ainda mais a temperatura da primeira aparição de granada no metamorfismo progressivo.

Figura 31. Projeções AFM de sequência de associação mineral em rochas metapelíticas (sistema KFMASH) durante o metamorfismo progressivo



Fonte. Extraído de Bucher & Grapes (2011), modificado de Bucher (2002).

Tais informações dão base para a interpretação dos resultados de química mineral dos porfiroblastos de granada. As altas concentrações de espessartita (Mn) no núcleo dos cristais indica que primeiro se formou granada rica em manganês, a temperaturas mais baixas. À medida que os cristais vão crescendo (metamorfismo progressivo), as concentrações de outros elementos (Fe) e (Mg) vão sendo incorporados; de modo que as concentrações dos membros finais almandina (Fe) e piropo (Mg) são representativas nas bordas dos porfiroblastos, indicando o pico metamórfico de temperatura.

Apesar do resultado dos cálculos termobarométricos indicar que o pico metamórfico se dá em fácies anfibolito superior, com temperaturas que variam num intervalo de 715 a 740°C e pressão entre 5.7 e 7.3 kbar; a composição química da rocha não é favorável à formação dos minerais característicos de paragênese clássica dessa fácies metamórfica. Por isso, não houve cristalização de cloritóide, estaurolita, cianita, sillimanita, entre outros.

Além das paragêneses metamórficas descritas acima para metamorfismo progressivo e pico metamórfico, foram observadas também associações minerais de retrometamorfismo. Cristais de clorita presentes nas bordas da granada são indícios de que uma sobrecresce a outra. A substituição das bordas da granada pela clorita é representativa de processo retrometamórfico.

Ou seja, a clorita se forma a baixas temperaturas (estável a 300°C), em fácies xisto verde inferior, (zona da clorita). O metamorfismo atinge seu ápice em fácies anfibolito superior, e por fim, inicia-se fase de retrometamorfismo com intercrescimento e substituição da granada por clorita (inverso da Equação 3), novamente em fácies xisto verde inferior.

Cabe aqui um paralelo com a literatura. No contexto pré-cambriano de formação das rochas da *Nappe* de Luminárias, o metamorfismo regional que afetou os metassedimentos e o embasamento é considerado do tipo barrovio (também denominado de metamorfismo de pressão intermediária), segundo estudos de Ribeiro e Heilbron (1982), Trown et al (1983), Heilbron (1985) e Trouw et al (1986). Tais autores ressaltam que o metamorfismo é caracterizado por mudança (aumento do gradiente metamórfico) de norte para sul da *Nappe*, desde a fácies xisto verde até anfibolito alto.

O mapa metamórfico de Ribeiro e Heilbron (1982) (vide Figura 14) subdivide a *Nappe* de Luminárias em quatro associações minerais, de norte para sul: Grt, Grt+St, Grt+St+Ky e Grt+St+Ky+Sill. Ou seja, estão metamorfizadas em fácies xisto verde (zona da granada) no extremo norte - caracterizado pela própria granada; ao norte metamorfizadas na transição da fácies xisto verde (zona da granada) para fácies anfibolito (zona da estaurolita), caracterizada pelo aparecimento de estaurolita; ao centro contém cianita (fácies anfibolito) e as do sul, por sua vez, contêm cianita e sillimanita são agrupadas no metamorfismo de mais alto grau, fácies anfibolito superior, zona da sillimanita – muscovita.

No entanto, trabalhos recentes de Fumes *et al.* (2017, 2019) indicam condições de pressão do pico de metamorfismo mais altas do que as típicas de metamorfismo barrovio (pressão intermediária) descritas por Ribeiro e Heilbron (1982), Trown et al (1983), Heilbron (1985) e Trouw et al (1986).

De acordo com as pseudosseções calculadas em Fumes (2017) e Fumes *et al.* (2019), a associação mineral representativa de pico metamórfico da porção central da *Nappe* (St + Bt +

Grt + Rt) é estável de 590 a 685°C e de 9 a 12 kbar. Fumes *et al.* (2017) apresentam dados da porção sul da *Nappe* de Luminárias em condições de pressão mais elevadas, que alcançam $11,8 \pm 2,8$ kbar com $608 \pm 47^\circ\text{C}$. Isto implica que as rochas metassedimentares estudadas alcançaram condições profundas da crosta, no limite entre as fácies anfibolito, granulito e eclogito (FUMES *et al.*, 2017).

Fumes *et al.* (2019) apresentam novos dados, em que a associação de pico que representa a porção sul (St + Ky + Grt + Rt) ocorre em um campo limitado e é estável de 585 a 690°C e de 9 a 16.5 kbar, que corresponde ao anfibolito de alta pressão em transição para fácies eclogito. Condições de alta pressão também foram obtidas por Silva (2010) na *Klippe* de Carrancas, a nordeste da *Nappe* de Luminárias. O autor calculou as condições de pico de P-T de $10 \pm 1,7$ kbar e $577 \pm 8^\circ\text{C}$ no norte, e $12,9 \pm 1$ kbar e $608,5 \pm 19,5^\circ\text{C}$ no sul.

Para a porção norte, condições de fácies anfibolito inferior de alta pressão são limitadas pela associação de pico (Cl + Ky + St + Rt) (FUMES *et al.*, 2019). Como os resultados de cálculos por pseudosseção para as outras porções da *nappe* (FUMES *et al.*, 2019) confirmam que as condições metamórficas diminuem para o norte, os autores supracitados fizeram uma estimativa de pressão (9 kbar) para calcular as temperaturas de zircão (Zr) em rutilo para a porção norte. Os resultados obtidos foram $580 \pm 4^\circ\text{C}$.

Desse modo, os dados expostos sobre o metamorfismo das rochas xistosas da Unidade Biotita xisto Santo Antônio, pertencentes ao norte da *nappe*, divergem das informações apresentadas na literatura. Dados de Fumes *et al.* (2019) indicam metamorfismo em fácies anfibolito inferior para as rochas da porção norte da *nappe*, com temperaturas de $580 \pm 4^\circ\text{C}$ para uma pressão pré-estabelecida de 9 kbar (e compatível com associação mineral de pico (Chl + Ky + St + Rt), dados parecidos com o de Silva (2010). Resultados do presente trabalho, indicam metamorfismo sob fácies anfibolito superior, com dados de temperatura e pressão (715 a 740°C e entre 5.7 e 7.3 kbar) (vide Figuras 29 e 30) acima do que o exposto pelos autores supracitados.

Os dados expostos também não convergem com as interpretações de gradiente metamórfico discutido em Ribeiro e Heilbron (1982), Trown *et al.* (1983), Heilbron (1985) e Trouw *et al.* (1986), porque, apesar da associação mineral quartzo + albita/oligoclásio + granada + biotita + muscovita + clorita + H₂O ser condizente com metamorfismo em fácies xisto verde (zona da granada), a composição química da rocha não tem alumínio suficiente para satisfazer as condições de cristalização de aluminossilicatos importantes (cianita, sillimanita) e demais minerais que compõem a paragênese clássica de fácies anfibolito.

5.2. Discussão de microtectônica/estrutural e paralelo com a literatura

Com relação ao estudo petrográfico, as seguintes observações devem ser ressaltadas. A rocha possui estrutura anisotrópica, podendo exibir domínios bem mais foliados e orientados, em consequência do maior grau de deformação. A estrutura é laminada e bandada, dada pelos leitos de diferentes composições, de modo que a textura varia de lepidoblástica a granular. Nos domínios onde a anisotropia é mais desenvolvida, a textura é granoblástica equigranular devido aos cristais de quartzo e plagioclásio de médias dimensões em contato lobular entre si, ou ainda às lentes de quartzo formando bandas de cristais recristalizados e de dimensões maiores que os da matriz.

Cristais micaceos inequidimensionais perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando também textura lepidoblástica, com arranjos planares paralelos ou sub-paralelos dispostos com orientação planar caracterizando a foliação principal, a xistosidade. Porfiroblastos de granada com trilhas de inclusão de ilmenita, apatita, rutilo e demais acessórios foram relevantes na caracterização do estudo microtectônico.

Quanto ao estudo microtectônico e sua relação com as fases de deformação descritos na literatura, pode-se afirmar que na área de estudo, são reconhecidas ao menos três fases de deformação dúctil D_1 , D_2 e D_3 . As fases D_1 e D_2 são interpretadas como produtos de uma deformação progressiva em colisão de continentes, assim como estruturas similares na Klippe Carrancas (TROUW *et al.*, 2008).

Trouw *et al.* (1982) afirmam que na deformação D_1 desenvolve-se uma clivagem penetrativa S_1 em condições metamórficas do início da fácies xisto verde e há crescimento mineral sin-deformacional de muscovita, clorita, cloritóide e biotita. De acordo com Trouw *et al.* (1983) a fase deformacional D_2 coincide com o auge do metamorfismo, e o desenvolvimento de minerais metamórficos de condições $P-T$ mais elevadas, como granada, estauroлита, cianita e sillimanita, além de muscovita e biotita. Na fase deformacional D_3 , há crescimento de minerais metamórficos de temperaturas mais baixas, tardi a pós deformacionais, como clorita, muscovita e cloritóide.

Para o Biotita xisto Santo Antônio, pode-se associar a formação dos minerais clorita, muscovita, biotita, quartzo e albita ao evento deformacional D_1 aliado ao metamorfismo progressivo em fácies xisto verde. Geração de granada associada ao pico metamórfico e ao evento D_2 , e por fim clorita retrometamórfica gerada em evento D_3 .

Observa-se na matriz uma foliação predominante S_n (ou S_2) formada a partir de um evento D_n principal que gerou a xistosidade da rocha. Antes do evento D_2 , houve o evento D_1 que gerou a foliação S_1 . O bandamento composicional (S_0) era paralelo ao S_1 e a superposição

de eventos mascarou os possíveis registros da foliação S_1 . A presença de S_i sigmodal nos porfiroblastos de granada correspondem a S_1 preservado, e também se vê S_1 nas charneiras de microdobras D_2 .

Houve um evento pós D_n - denominado D_3 - de geração de dobras suaves simétricas com antifformas e sinformas, cuja foliação plano axial é perpendicular à foliação predominante S_n (S_2), de modo a crenular a xistosidade. Ou seja, o S_n está curvo (dobrado), mas não houve geração de uma segunda foliação S_3 referente a uma clivagem de crenulação. A Figura 32 ilustra modelo esquemático da xistosidade predominante S_n (estágio I) sendo crenulada durante o evento D_3 . O estágio em que se encontra a rocha é, predominantemente, o estágio II, em que a foliação S_n está levemente crenulada. Pela análise da Figura 32, também é possível indicar crenulação D_2 referente ao estágio VI num contexto geral da rocha, e o estágio V, mais local.

Vale ressaltar que a orientação da foliação interna S_i nos porfiroblastos de granada se equipara com o estágio III apresentado na Figura 32. A presença de dobras isoclinais em veios espessos de quartzo e nas bandas micáceas com plano axial paralelo a xistosidade S_n são texturas de desenvolvimento de uma nova xistosidade, e aqui são comparados com o estágio V da Figura 32.

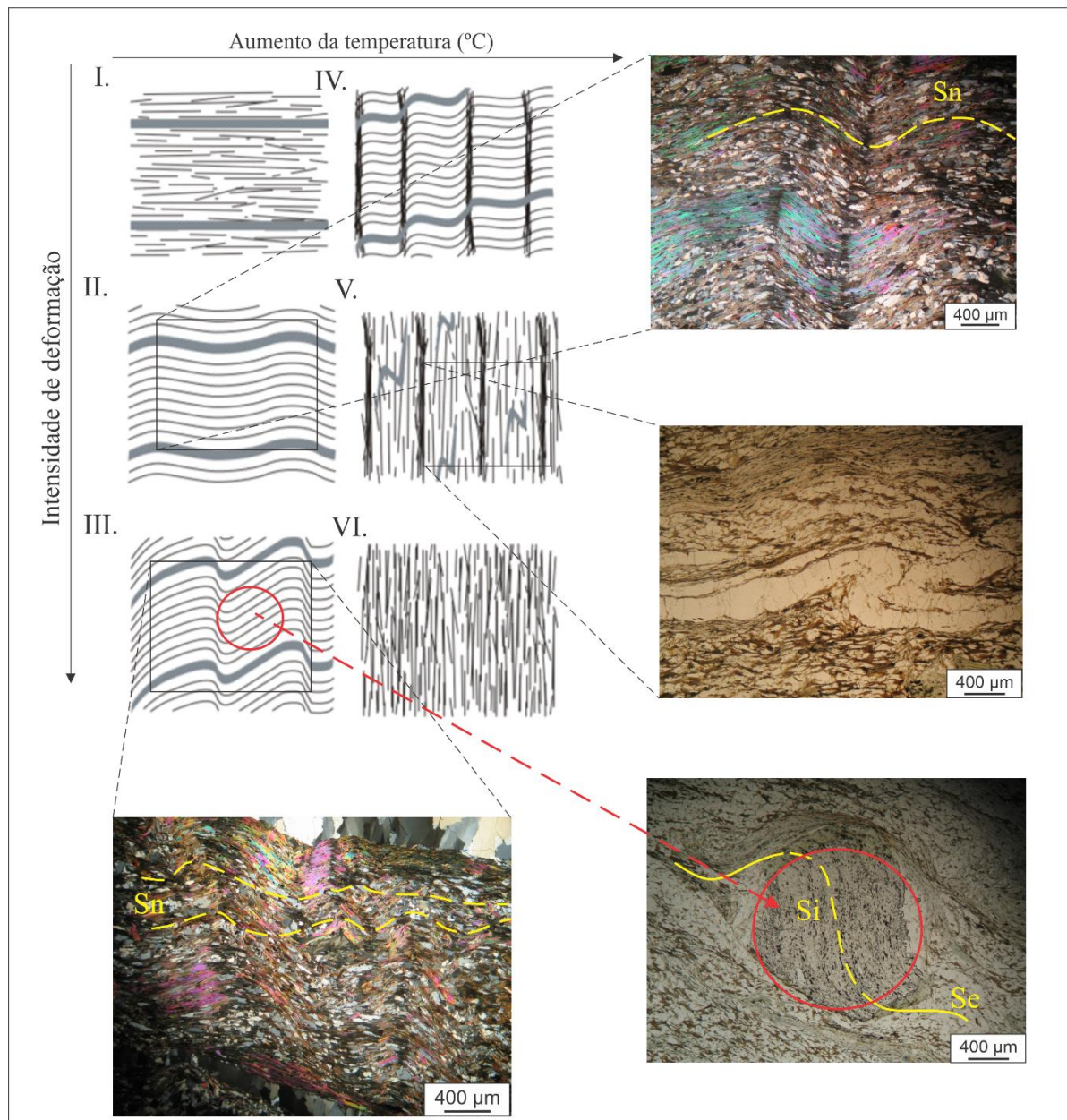
As micas possuem orientação preferencial, compondo domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n (ou D_2). Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

Os agregados de clorita sobrecrecendo as bordas dos porfiroblastos de granada são gerados por evento pós- D_2 e $S_{in} - D_3$ e são interpretados como fase de metamorfismo regressivo; e por isso não se enquadra na associação de pico metamórfico.

O crescimento da granada ocorreu durante um evento tectônico D_2 como é evidenciado pela foliação interna do porfiroblasto, marcada por trilhas de inclusões sigmoidais que indicam o sobrecrecimento de estágios iniciais de crenulação D_2 . Análises no padrão de inclusão de quartzo, apatita e ilmenita nos cristais de granada permitem observar uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima as bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin- D_2 visto que cresceu durante o evento D_n (gravando internamente a foliação predominante S_1) e também no intervalo dos eventos D_2 e D_3 , de modo que as trilhas de inclusões registram tanto a xistosidade (do evento D_1) quanto o início da crenulação D_2 .

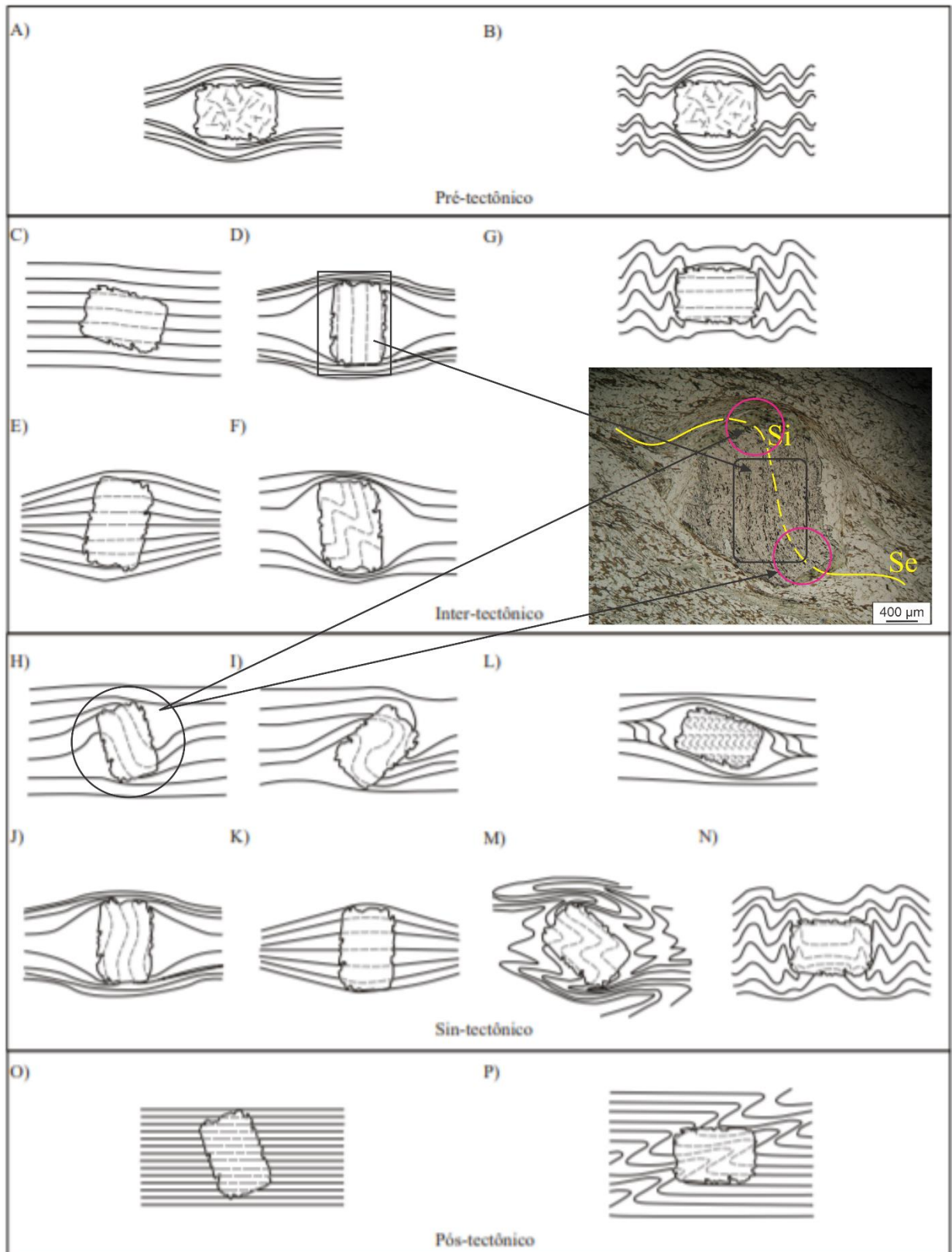
A Figura 33 ilustra desenho esquemático de como se comportam as relações de inclusões em porfiroblastos de acordo com eventos Pré, sin, inter e pós tectônicos. Mostra-se também, fotomicrografia de uma análise petrográfica dos padrões de inclusão no porfiroblasto, para uma comparação mais fiel das relações entre foliação interna e externa e, consequentemente, alusão ao tipo de fase tectônica predominante.

Figura 32. Estágios de desenvolvimento de nova xistosidade a partir de clivagem de crenulação em foliação S_1 . Notar que a foliação predominante S_n da rocha encontrava-se no estágio I, em situação pré crenulação. Com desenvolvimento de nova fase de deformação D_3 , a foliação S_n foi crenulada, equiparando-se o estágio II e, localmente, preservado o estágio III. Estágios mais avançados são observados nas bandas quartzosas dobradas isoclinalmente (estágio V). No entanto, a rocha não atinge fase de geração de clivagem de crenulação e, portanto, sem uma nova xistosidade, ou foliação plano axial (ou clivagem ardosiana). Fotomicrografias amostra LR-08.



Fonte. Extraído de Zanardo & Navarro (2005), adaptado de Bell & Rubenach (1983).

Figura 33. Diagrama esquemático com as relações de inclusões em porfiroblastos, classificação das foliações e interpretações cinemáticas. Notar que a granada porfiroblástica apresenta condições de foliação interna (S_i) que a classifica com S_{in-D_2} , a foliação externa é equivalente a S_2 (S_n), e a porção retilínea da inclusão no núcleo pode indicar que o crescimento do porfiroblasto iniciou antes de D_2 , ou seja, Inter D_1-D_2 .



Fonte. Extraído de Zwart (1962) e Passchier & Trouw (1996).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O gradiente metamórfico da *Nappe* de Luminárias foi intensamente discutido nos trabalhos de Trouw *et al.* (1980), Ribeiro & Heilbron (1982), Peternel *et al.* (2005), Trouw *et al.* (2000), Silva (2010), Fumes (2017), Fumes *et al.* (2017, 2019). O presente trabalho focou, especificamente, no estudo das condições de P e T para as rochas xistosas da Unidade Santo Antônio da porção norte da *nappe*. Para tal, baseou-se na associação mineral de pico metamórfico e modelagem metamórfica por cálculos termobarométricos em duas amostras de biotita xisto da Unidade Santo Antônio, através de cálculos de *average PT*.

Para os autores Trouw *et al.* (1980, 1983), Ribeiro & Heilbron (1982) as rochas da *nappe* apresentam metamorfismo de pressão intermediária (Barroviano) e um gradiente de P e T progressivo em direção ao sul. No entanto, condições de pressão do pico de metamorfismo registradas em rochas da *nappe* indicam que o equilíbrio ocorreu em condições que são mais altas do que as condições típicas de metamorfismo barroviano (FUMES *et al.*, 2019).

Fumes *et al.* (2019) apresentam dados mais recentes acerca do gradiente metamórfico para as rochas da *nappe*. Na porção norte, a condição metamórfica de pico é de 580 ± 4 °C e ca. 9 kbar, representativo de fácies anfibólito inferior de alta pressão. Na porção central, é 600 ± 15 °C e 11 ± 3 kbar (fácies de anfibólitos de média pressão); e na porção sul, é 630 ± 13 °C e 14 ± 6 kbar (fácies granulito de alta pressão).

De acordo com resultados de química mineral e cálculos termobarométricos apresentados neste trabalho, assume-se que as rochas da porção norte da *nappe* (Unidade Santo Antônio) atingiram pico metamórfico sob condições da fácies anfibolito superior devido às condições de P-T variando entre 715 °C e 740 °C, e entre 5.7 kbar e 7.2 kbar. Tais condições registradas nas rochas estudadas são superiores àquelas sugeridas nos outros trabalhos para a área de estudos, e divergem das informações presentes na literatura clássica para as rochas da *Nappe* de Luminárias e para a Megassequência Andrelândia, no geral. Também não foi possível apresentar resultados quanto às trajetórias metamórficas registradas para as rochas da Unidade Santo Antônio, devido à insuficiência de dados para caracterização das condições de P e T para metamorfismo progressivo e retro.

Devido a este fato, conclui-se e sugere-se que estudos mais detalhados (modelagem por pseudosseção, isopletras minerais, geotermômetro Ti em quartzo, e concentrações de elementos traço no rutilo, por exemplo) devem ser realizados para as rochas xistosas da Unidade Santo Antônio, a fim de aprofundar as discussões e correlaciona-las com as interpretações da literatura.

Além disso, sugerem-se estudos aprofundados com zircão detritico, assinaturas isotópicas de Sm/Nd, valores de índice de intemperismo químico e razões K/Na; a fim de indicar correlação com as interpretações do ambiente deposicional da Unidade Santo Antônio, como unidade de metagrauvaca relacionadas a uma bacia orogênica do tipo foreland (sin-colisional), instalada na borda da placa Sanfranciscana (WESTIN & CAMPOS NETO, 2013).

As análises de química mineral, expostas neste trabalho, demonstraram variações composicionais significativas nos cristais de granada, em que os teores de Fe (almandina) e Mg (piropo) são maiores nas bordas, enquanto que os de Ca (grossulária) e Mn (espessartita) são maiores no centro dos cristais. Isso demonstra forte zoneamento da borda para o núcleo, representativo de variação composicional da granada a medida que o metamorfismo progride, até atingir seu ápice (pico).

Mudanças de fases metamórficas coincidem com eventos deformacionais. Relações microtectônicas mostram que a foliação principal (Sn) é uma xistosidade consolidada durante evento Dn (ou D₂) – compatível com metamorfismo progressivo e pico - com início de estágio de crenulação devido à superposição de deformação posterior (terceira fase, D_{n+1} ou D₃). A fase retrometamórfica é compatível na literatura, com evento deformacional D₃. Os resultados e discussões quanto ao estudo microtectônico e sua relação com a geologia estrutural da região são satisfatórios para compreensão do mesmo, e são compatíveis com os dados da literatura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, Fernando F. *et al.* The Araçuaí Belt. In: **São Francisco Craton, Eastern Brazil**. Springer, Cham, 2017. p. 255-276.
- Almeida F.F.M. & Hasui Y. 1984. **O Pré-Cambriano do Brasil**. Edgard Blücher, São Paulo. p.259-268
- Almeida F.F.M. 1967. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Boletim 241. DNPM - Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, Boletim, nº 241, 36 p.
- Almeida F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 48 (Supl.), p. 15-26.
- Almeida F.F.M. 1981. O cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: **I Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais**. Salvador, 1981. SBG-Núcleo Bahia, Salvador, Anais. p.45-63
- Almeida F.F.M., Brito Neves B.B., Carneiro C.D.R. 2000. **The origin and evolution of the South American Platform**. Earth Science Reviews. p.77-111
- Almeida, F.F.M. de O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira Geociências.**, n.7, p.349-364. 1977
- Almeida, J. C. H. **Mapeamento Geológico da Folha Luminárias (MG 1/50000) com Ênfase na Análise Estrutural dos Metassedimentos do Ciclo Depositional Andrelândia**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Rio de Janeiro, 1992, 102f. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1992. p.128-129
- Andreis, R. R.; Ribeiro, A.; Paciullo, F. V. P. Ciclos deposicionais no Proterozóico das folhas Barbacena e Divinópolis (setor sul), 1:250.000, Minas Gerais: base para a interpretação da evolução das bacias sedimentares. In: I Simpósio de Geologia do Sudeste - **Resumos...**, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, 1989. P.101-102
- Azevedo, L.G. 1962. Tipos de vegetação do sul de Minas e campos da Mantiqueira (Brasil). **An. Acad. Bras. Cienc.** 34(2):225-234.
- Baptista, M. C. *et al.* **Aspectos gerais do meio físico**. Machado, MF, Silva, SF Geodiversidade do estado de Minas Gerais, v. 1, 2010. p.9-45
- Belém J, Pedrosa-Soares AC, Noce CM, Silva, LC, Armstrong R, Fleck A, Gradim Ct, Queiroga G N (2011) **Bacia precursora versus bacias orogênicas: exemplos do Grupo Andrelândia com base em datações U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão e análises litoquímicas**.
- Bell, T. H.; Rubenach, M. J. Sequential porphyroblast growth and crenulation cleavage development during progressive deformation. **Tectonophysics**, v. 92, n. 1-3, p. 171-194, 1983.
- Bittencourt B.R. 2010. **Caracterização da Zona de Cisalhamento Três Corações - As Cidades de Luminárias e São Gonçalo do Sapucaí, Sul de Minas Gerais**. Tese de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Brito Neves B.B., Campos-Neto M.C., Fuck R. 1999. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan-African cycle and orogenic collage. **Episodes**, 22(3):155-166.
- Bucher K., Frey M. 1994. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. Springer Verlag, Berlin.p.388

Bucher, K; Frey, M. **Petrogenesis of metamorphic rocks**. Springer Science & Business Media, 2002.

Bucher, K; Grapes, R. **Petrogenesis of metamorphic rocks**. Springer Science & Business Media, 2011.p.471-490

Campos Neto MC, Caby R (2004) Lower crust extrusion and terrane accretion in the Neoproterozoic *Nappes* of southeast Brazil. **Tectonics**, 19, 669–687

Campos Neto, M. C. & Caby, R. Terrane Accretion And Upward Extrusion Of High-Pressure Granulites In The Neoproterozoic *Nappes* Of Southeast Brazil: Petrologic And Structural Constraints. **Tectonics**, v.19, n. 4, p. 669-687, 2000

Campos Neto, M. C.; Cioffi, C. R.; Moraes, R.; Motta, R. G.; Siga JR., O.; Basei, M. A. S. Structural and metamorphic control on the exhumation of high-P granulites: the Carvalhos Klippe example, from the oriental Andrelândia *Nappe* System, southern portion of the Brasília Orogen, Brazil. **Precambrian Research**, v. 180, p. 125–142, 2010.

Campos Neto, M. C.; Janasi, V. A.; Basei, M. A. S.; Siga Jr., O. Sistema de *Nappes* Andrelândia, setor oriental: litoestratigrafia e posição estratigráfica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4-suplemento, p. 47–60, 2007.

Campos Neto, M. D. C. *et al.* Migração de orógenos e superposição de orogêneses: Um esboço da colagem Brasiliana no sul do Cráton do São Francisco, SE-Brasil. **Geol. USP Série Científica**, v. 4, n. 1, p. 13–40, 2004.

Campos Neto, M. D. C.; Caby, R. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the *Nappe* system south of the Sao Francisco Craton, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 97, n. 1-2, p. 3–26, 1999

Campos Neto, M.C. *et al.* Orogen migration and tectonic setting of the Andrelândia *Nappes* system: an Ediacaran western Gondwana collage, south of São Francisco craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 32, n. 4, p. 393-406, 2011.

Campos-Neto M.C. 2000. Orogenic Systems from Southwestern Gondwana: An approach to BrasilianoPanAfrican Cycle and Orogenic Collage in Southeastern Brazil. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.). **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro, 31º International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 335-365.

Coelho M.B., Trouw R.A.J., Araújo C.E.G., Vinagre R., Mendes J.C., Sato K. 2017. Constraining timing and P-T conditions of continental collision and late overprinting in the Southern Brasília Orogen (SE-Brazil): U-Pb zircon ages and geothermobarometry of the Andrelândia *Nappe* System. **Precambrian Research**, p.134-167.

Costa, C. M. R., Hermann, G., & Martins, C. S. Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação. In **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. Fundação Biodiversitas. 1998.

Dardenne, M. A. The Brazilian Fold Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, E.J., Campos, D.A (Eds). **Tectonic Evolution of South America**. 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro, 2000, p. 231- 263.

Do Couto Carvalho, V; DA SILVA, Marcelo Alexandre C.; Oliveira, Douglas Veloso. Potencialidades espeleoturísticas da área cárstica do Município de Luminárias. **Caderno Virtual de Turismo**, v. 7, n. 2, p. 23-34, 2007.

Drummond, G. M., Martins, C. S., Machado, A. M., Sebaio, F. A., & ANTONINI, Y. O. **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas. 2005. p.23-65

Ebert, H. **Aspectos da Geologia da Região de São João del Rei e a bifurcação entre Paraibíades e Araxaiades**. São Paulo, SP: SBG-SP, 1984.

Ebert, H. Beitrag sur Gliederung des Praakambriums in Minas Gerais. **Geol. Rundschau**, v. 45. p.471-521

Ebert, H. Os Paraibides entre São João del Rei, Minas Gerais e Itapira, São Paulo, e a Bifurcação entre Paraibides e Araxaides. In: **XXV Congresso Brasileiro de Geologia**. [S.l.: s.n.], 1971. p.177-178

Ebert, H. Pesquisas na parte Sudeste de Minas Gerais e no Nordeste. In: **Relatório Anual do Diretor**. Rio de Janeiro, 1955. p.79-89

Ebert, H. Relatório de atividades. In: **Relatório Anual do Diretor da Div. Geol. Min.** Rio de Janeiro, 1956.

Eiten, G. 1982. The cerrado vegetation of Brazil. **Bot. Review**. 38(2):201-341.

Fuck R.A., Pimentel M.M., Silva L.J.H.D. 1994. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: Sbg, Congr. Bras. Geol., 38, 1994 Balneário de Camboriú, SC. **Boletim de Resumos Expandidos**, Balneário de Camboriú, SC: SBG, v. 1, p.215-216

Fuck, Reinhardt A. *et al.* **The northern Brasília belt**. In: São Francisco Craton, Eastern Brazil. Springer, Cham, 2017. p. 205-220.

Fumes R.A., Luvizotto G.L., Moraes R., Ferraz E.R.M. 2017. Petrografia, Química Mineral e Geotermobarometria dos Metapelitos do Grupo Carrancas na Nappe de Luminárias (MG). **Geociências**. p.15-35

Fumes, R. A., Luvizotto, G. L., Moraes, R., Heilbron, M., & Vlach, S. R. F. (2019). Metamorphic modeling and petrochronology of metapelitic rocks from Luminárias Nappe, southern Brasília belt (SE Brazil). **Brazilian Journal of Geology**, 49(2),

Fumes, R.A. **Modelagem metamórfica e geotermobarometria de elementos traço em metapelitos e quartzitos: exemplo de Nappe de Luminárias-MG**. Tese. (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 2017.

Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Brasileiro. Companhia Mineradora de Minas Gerais - COMIG; Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Governo de Minas Gerais. Volume I, Capítulo 4: 84-110.

Guia do Turismo Brasil: Roteiro de Estâncias Turísticas. Disponível em: <<https://www.guiadoturismobrasil.com/cidade/MG/1053/luminarias>>

Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos-Neto M., Silva L.C., Trouw R.A.J., Janasi V.C. 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (eds.). **Geologia do Continente Sul-Americano**. Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p. 203-234.

Heilbron M., Ribeiro A., Valeriano C.M., Paciullo F.V., Almeida J.C.H, Trouw R.J.A., Tupinambá M., Eirado Silva L.G. 2017. The Ribeira belt. In: Heilbron M., Cordani U.G.,

Alkmim F.F. (eds.). São Francisco craton, eastern Brazil. Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. **Regional Geology Reviews**, Springer International Publishing Co., p. 277-302.

Heilbron, M. *et al.* Correlation of Neoproterozoic terrane between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. **Geological Society**, London, Special Publications, v. 294, p. 211–237, 2008.

Heilbron, M. *et al.* Província Mantiqueira. In: **Geologia do Continente sul-americano**. Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. [S.l.: s.n.], 2004. p. 203–235.

Heilbron, M. **Evolução metamórfo-estrutural na área entre Itutinga e Madre de Deus de Minas, MG**. 151 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — UFRJ, 1984.

Heilbron, M. O metamorfismo da área de Itutinga – Madre de Deus de Minas, MG. In: III Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte: SBG-MG, 1985.

Heilbron, M. **O segmento central da Faixa Ribeira: síntese geológica e ensaio de evolução geotectônica**. Rio de Janeiro, 1995.

Holdaway, M. J.; Mukhopadhyay, B. A reevaluation of the stability relations of andalusite: thermochemical data and phase diagram for the aluminum silicates. **American Mineralogist**, v. 78, n. 3-4.

Holland, T. J. B., & Powell, R. (2011). An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. **Journal of Metamorphic Geology**, 29(3), 333-383.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE. 1975. **Folha Topográfica – Luminárias. São Paulo**

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1975. **Folha Topográfica – Luminárias. São Paulo**: IBGE.

IBGE. **Panorâma e Pesquisas. Cidade de Luminárias - MG**. 2017. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/luminarias> > Acesso em 10 julho 2019.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Comitês de Bacias Hidrográficas de Minas Gerais. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH**. Disponível em: < <http://comites.igam.mg.gov.br/> >. Acessado em: 5 agos. 2019.

Klein, C., & Dutrow, B. (2012). Manual de Ciências dos Minerais (23ª edição). Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. Editora Bookman, Porto Alegre, Brasil.

Kretz, Ralph. Symbols for rock-forming minerals. **American Mineralogist**, v. 68, n. 1-2, p. 277-279, 1983.

Lanari P, Bovay T, Airaghi L, Centrella S (2019) Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser. **Geol Soc London**, Spec Publ 478:39–63

Lanari P, Vidal O, De Andrade V, *et al* (2014) XMapTools: A MATLAB©-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry. **Comput Geosci**. 62:227–240. doi: 10.1016/j.cageo.2013.08.010

- Machado, N. & Gauthier, G. 1996. Determination of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages on zircon and monazite by laserablation ICPMS and application to a study of sedimentary provenance and metamorphism in southeastern Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 60, 5063–5073.
- Machado, N., Valladares, C., Heilbron, M. & Valeriano, C. M. U-Pb geochronology of the central Ribeira Belt (Brazil) and implications for the evolution of the Brazilian Orogeny. **Precambrian Research**, v. 79, p. 347-361, 1996
- Mantovani, M.S.M. & Brito Neves, B.B. De. The Paranapanema Lithospheric Block: Its Importance Proterozoic (Rodinia, Gondwana) Supercontinent Theories. **Gondwana Research**, V.8, N.3, 2005
- Marini O. J., Fuck R.A., Danni J.C., Dardenne M.A. 1981. A Evolução Geotectônica da Faixa Brasília e do seu Embasamento. In: Simp. Sobre O Cráton São Francisco e Suas Faixas Marginais, 1, 1981, Salvador, Ba. **Anais...**, Salvador, Ba: Sbg, 1981, P. 100-105
- Martins, C. S. **Caracterização física e fitogeográfica de Minas Gerais**. Lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção da flora de Minas Gerais. (MP Mendonça & LV Lins, orgs.). Fundação Biodiversitas, Belo Horizonte, 35-43. 2000
- Oliveira-Filho, A.T. & Fluminhan-Filho, M. 1999. **Ecologia da vegetação do Parque Florestal Quedas do Rio Bonito**. Cerne. 5(2):51-64.
- Paciullo F.V.P., Ribeiro A., Andreis R.R., Trouw R.A.J. 2000. The Andrelândia Basin, a Neoproterozoic intraplate continental margin, southern Brasília Belt, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(1):200-202.
- Paciullo F.V.P., Trouw R.A.J., Ribeiro A. 2003. Geologia da Folha Andrelândia. In: A.C. Pedrosa-Soares, C.M. Noce, R.A.J Trouw, M. Heilbron (orgs.). **Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro**, Projeto Sul de Minas, 1:84-120.
- Paciullo, F. V. P. *et al.* Sedimentary, igneous and thermo-tectonic events in the folded belts at the southern border of the São Francisco craton. In: **Abstracts of the International Conference on Precambrian and Craton Tectonics/ 14 th International Conference on Basement tectonics**. [S.l.: s.n.], 1998.
- Paciullo, F. V. P.; Ribeiro, A. **Mapa Geológico-Folha Nepumoceno**. In: CONTRATO - CPRM - UFRJ 067/P2/2005. [S.l.: s.n.], 2008.
- Paciullo, F. V. P.; Ribeiro, A.; Andreis, R. R. Reconstrução de uma bacia fragmentada: o caso do Ciclo Depositional Andrelândia. Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, II, Salvador, **Anais...**, Salvador, SBG, p. 224-226, 1993.
- Paciullo, F.V.P. **Estratigrafia e paleoambientes nas sucessões metassedimentares proterozóicas das serras do Lenheiro e São José, São João del Rei, Sul de Minas Gerais**. 167 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- Paciullo, F.V.P. *et al.* Contribuição à geologia do sul de Minas Gerais edição das folhas 1: 50.000 Itumirim, Itutinga, Madre de Deus, Luminárias, Minduri e Andrelândia. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 19, p. 123-142, 1996.
- PASSCHIER, C. W.; TROUW, R. A. J. 1996. **Microtectonics**.
- Peternel, R.; Trouw, R. A. J.; Schmitt, R. D. S. Interferência Entre Duas Faixas Móveis Neoproterozoicas: O Caso Das Faixas Brasília e Ribeira No Sudeste Do Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 35, n. 3, p. 297–310, 2005.

Pinto C.P. & Silva M.A. 2014. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000**. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, CODEMIG e Serviço Geológico do Brasil, CPRM.

Powell, R., Holland, T. J. B. H., & Worley, B. (1998). Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. **Journal of metamorphic Geology**, 16(4), 577-588.

POWELL, R.; HOLLAND, T. J. B. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. **Journal of metamorphic Geology**, v. 6, n. 2, p. 173–204, 1988.

Powell, Roger; Holland, Tim. Optimal geothermometry and geobarometry. **American Mineralogist**, v. 79, n. 1-2, p. 120-133, 1994.

Queiroz, R.; Souza, A.G.; Santana, P.; Antunes, F.Z. & Fontes, M. **Zoneamento Agroclimático de Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Secretaria da Agricultura. 1980.

Quéméneur, J. J. G. *et al.* **Mapa Geológico-Folha Lavras**. 1:100.000. In: Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro. [S.l.: s.n.], 2003.

RIBEIRO, A. *et al.* Evolução Policíclica Proterozóica no Sul do Cráton de São Francisco: Análise da Região de São João del Rei e Andrelândia, MG. In: **Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia**. [S.l.: s.n.], 1990. P.2605-2614

Ribeiro, A.; Heilbron, M. Estratigrafia e Metamorfismo dos Grupos Carrancas e Adrelândia, Sul de Minas Gerais. In: **Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia**. [S.l.:s.n.], 1982. p. 177–186.

Rodrigues, A.C.P., 2000. **Rochas metamórficas máficas e ultramáficas do greenstone belt Barbacena na região de Itutinga, MG**. Dissert. Mestrado, IG-Unicamp. Área de Metalogênese.

Rodrigues, L. A., Carvalho, D. A., Gomes, L. J., & Botrel, R. T. Espécies vegetais nativas usadas pela população local em Luminárias, MG. **Boletim Agropecuário**, 52, 1-34. 2002.

Saadi, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais (tensões intraplacas, descontinuidades crustais e morfogênese)**. 1991. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1991.

Santos, PS (2011) **Geocronologia, área fonte e ambiente tectônico da Unidade Santo Antônio - Megassequência Andrelândia, MG**. 2011. Msc dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Shmitt, R. S. **A Orogenia Búzios – Um evento tectono-metamórfico cambroordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, faixa Ribeira, sudeste do Brasil**. 2001, 273 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

Silva M.P. 2010. **Modelamento Metamórfico de Rochas das Fácies Xisto-Verde e Anfibolito com o Uso de Pseudosseções: Exemplo das Rochas da Klippe Carrancas, Sul de Minas Gerais**. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Spear, Frank S.; KOHN, Matthew J.; CHENEY, John T. **P-T paths from anatectic pelites**. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 134, n. 1, p. 17-32, 1999.

Teixeira, A. W. (2015). **Depósitos orogênicos e bacia extensional: o embasamento metassedimentar e a cobertura da margem passiva no orógeno Brasília meridional** (Dissertação de doutorado, Universidade de São Paulo).

Trouw R.A.J. et al (2000) The central segment of the Ribeira belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), **Tectonic Evolution of South America**, 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil,

Trouw R.A.J.; Paciullo, F.V.P.; Ribeiro, A.; Bittar, S. & Almeida, J.C.H. 2003. **Geologia da Folha Caxambu**. In: Predrosa-Soares, A.C.; Noce, C.M.; Trouw, R.A.J. & Heilbron, M. (eds).

Trouw, R. A. J. & Castro, E. M. O. (2008). **Geologia da folha Varginha SF. 23-VD-VI**.

Trouw, R. A. J. *et al*. Análise de deformação numa área a SE de Lavras, Minas Gerais. **Congresso Brasileiro de Geologia** v. 32. 1962

Trouw, R. A. J. *et al*. Os grupos São João Del Rei, Carrancas e Andrelândia, interpretados como a continuação dos grupos Araxá e Canastra. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. 1984.

Trouw, R. A. J.; Paciullo, F. V. P.; Ribeiro, A. A Faixa Alto Rio Grande Reinterpretada como Zona de Interferência entre a Faixa Brasília e a Faixa Ribeira. In: **XXXVIII Congresso Brasileiro de Geologia**. [S.l.]: SBG, 1994.

Trouw, R. A. J.; Paciullo, F. V. P.; Ribeiro, A. Tectonic significance of Neoproterozoic high pressure granulites in southern Minas Gerais. In: 14 International Conference on Basement Tectonics, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: 1998.

Trouw, R. A. J.; Ribeiro, A.; Paciullo, F. V. P. Contribuição à geologia da Folha Barbacena-1: 250.000. In: **Congresso Brasileiro Geologia**. 1986.

Trouw, R. A.; Ribeiro, A.; Paciullo, F. V. P. Evolução Estrutural e Metamórfica de uma área a SE de Lavras - Minas Gerais. In: **Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia**, Balneário de Camboriú, Santa Catarina. Balneário de Camburiú: [s.n.], 1980.

Trouw, R.A.J., Peternel, R., Medeiros, F.F.F., Trouw, C.C. & Rodrigues, L.H.O. The Neoproterozoic Caxambu Shear Zone, Mg. In: 9º Nacional De Estudos Tectonicos, 2003, Ouro Preto, MG. **Livro de Resumos, Ouro Preto**, MG: SBG, 2003.

Trouw, R.A.J.; Peternel, R.; Ribeiro, A.; Heilbron, M.; Vinagre, R.; Duffles, P.; Trouw, C.A new interpretation for the interference zone between the southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. **Journal of South American Earth Science**. 2013.

Trouw, R.A.J.; Ribeiro, A. e Paciullo, F.V.P. 1983. Geologia estrutural dos Grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia, Sul de Minas Gerais. In: **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 55(1).

Valeriano CM, Machado N, Simonetti A, Valladares CS, Seer HJ, Simoes LS (2004) U–Pb Geochronology of the Southern Brasília Belt (SE Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of Western Gondwana. **Precambrian Research**.

Valeriano D.M.V., C. **The southern Brasília belt**. In: São Francisco Craton, Eastern Brazil. Springer, Cham, 2017. p. 189-203.

Valeriano, C. M., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A. E Seer, H. J.. A Evolução Tectônica Da Faixa Brasília. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro. C. D. R., Brito-Neves, B. B. (Eds.) **Geologia Do Continente Sul - Americano**: Evolução da Obra de Fernando Flavio Marques de Almeida. São Paulo, 2004.

Valeriano, C. M., Pimentel, M., Heilbron, M., Trouw R.A.J. & Almeida, J.C.H. Tectonic evolution of the Brasília Belt Central Brazil, early assembly of Gondwana. In: Pankhurst, R.J; Trouw, R.A.J.; Brito Neves, B.B; De Wit, M.J..(Org.).West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. **Journal of geological Society of London**, special publication, v. 294.

Valladares CS, Machado N, Heilbron M, Duarte BP, Gauthier, G (2008) Sedimentary Provenance in the Central Ribeira belt based on Laser-Ablation ICPMS 207Pb/206Pb Zircon Ages. **Gondwana Research**, v. 13, p. 516/GR-00196–526

Valladares CS, Machado N, Heilbron M, Gauthier G. 2004. Ages of detrital zircon from siliciclastic successions of the Brasília Belt, southern border of the São Francisco craton, Brazil: implications for the evolution of Proterozoic basins. **Gondwana Research**.

Westin A., Campos Neto M.C., Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B., Delavault H. 2019. The Neoproterozoic southern passive margin of the São Francisco craton: Insights on the pre-amalgamation of West Gondwana from U-Pb and Hf-Nd isotopes. **Precambrian Research**, 320:454-471.

Westin, A. *et al.* A paleoproterozoic intra-arc basin associated with a juvenile source in the southern brasilian orogen: Application of u–pb and hf–nd isotopic analyses to provenance studies of complex areas. **Precambrian Research**, v. 276. 2016.

Westin, A.; Campos Neto, M. D. C. Provenance and tectonic setting of the external *Nappe* of the Southern Brasília Orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, Elsevier Ltd, v. 48, p. 220–239, 2013. ISSN 08959811.

White, R. W. et al. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 32, n. 3, p. 261–286, 2014. ISSN 15251314. Citado 3 vezes nas páginas 20, 25 e 100.

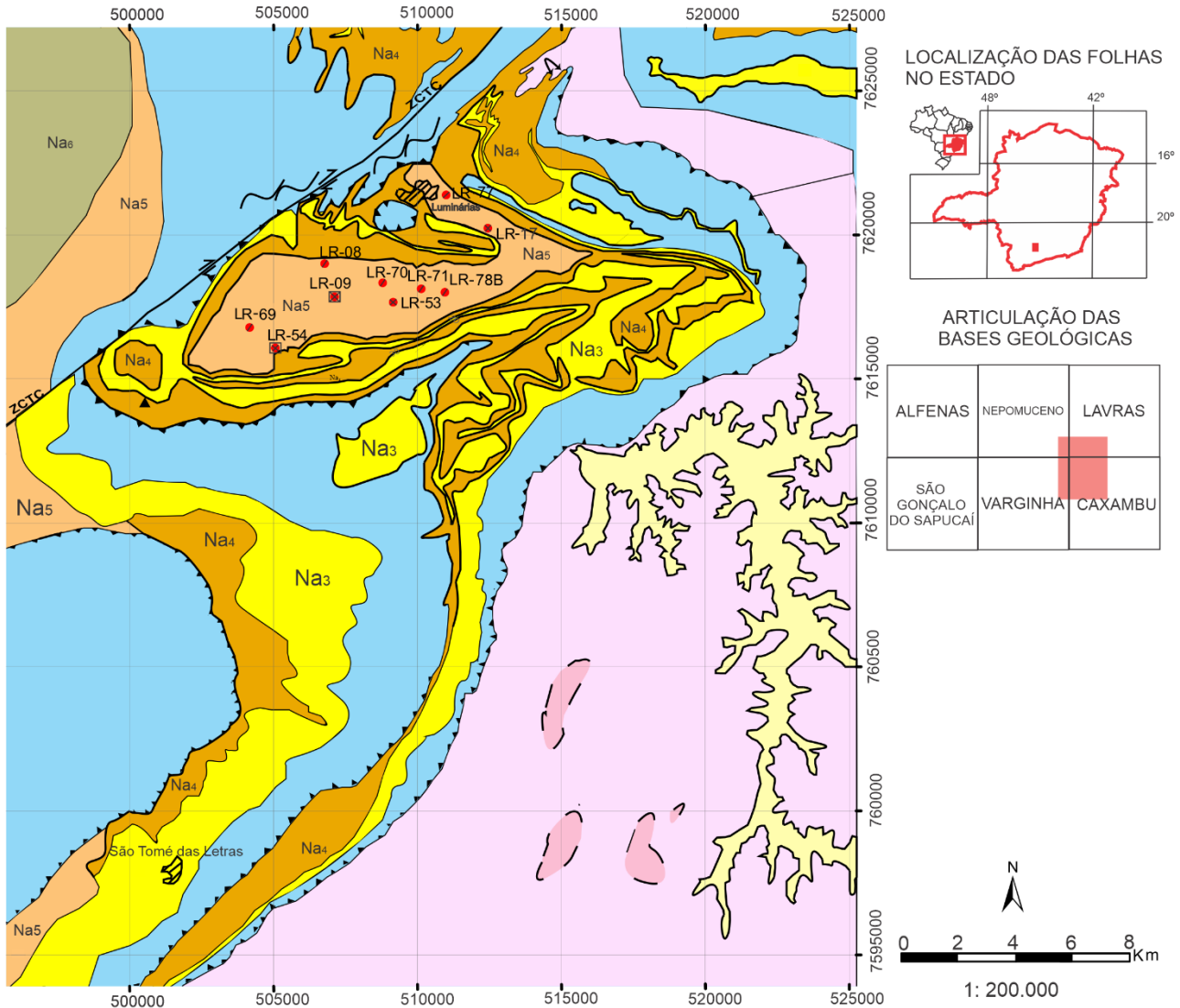
Will, T. M., & Will, T. M. (1998). **Phase equilibria in metamorphic rocks: Thermodynamic background and petrological applications**. (Vol. 71). Berlin Heidelberg New York: Springer.

Winter, John D. **An introduction to igneous and metamorphic petrology**. New Jersey: Prentice hall, 2001.

Zanardo & Navarro. (2005). **Análise Petrográfica de Rochas Metamórficas**. IGCE, Unesp Rio Claro. Apostila didática não publicada.

Zwart, H. J. On the determination of polymetamorphic mineral associations, and its application to the Bosost area (Central Pyrenees). **Geologische Rundschau**, v. 52, n. 1, p. 38-65, 1962.

APÊNDICE I – MAPA GEOLÓGICO E DE PONTOS



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
Éon	Era
Fanerozoico	Cenozoico
	Sedimentos fluviais quaternários
Proterozoico	Neoproterozoico
	MEGASEQUÊNCIA ANDRELÂNDIA
	Sequência Serra do Turvo
	Na6 Biotita gnaiss e xisto feldspático com intercalação de muscovita xisto e quartzito
Proterozoico	Na5 Biotita xisto/gnaiss - Unidade Santo Antônio
	Na4 Filito/xisto cinzento com intercalação de quartzito
	Sequência Carrancas
	Na3 Quartzito com muscovita esverdeada
Proterozoico	Paleoproterozoico
	Complexo São Vicente
	Biotita gnaiss bandado e intercalação de filito/xisto cinzento, quartzito, biotita xisto, anfibolitos e rochas ultramáficas
	Metagranitoides indivisos
Arqueano e/ou Paleop.	
	Ortognaiss migmatíticos com intercalação de anfibolitos, paragneiss bandados, quartzitos manganíferos, rochas calcissilicatadas e rochas metaultamáficas

LEGENDA DE PONTOS
● Ponto descrito
● Ponto com análise petrográfica e microtectônica
● Ponto com imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
● Ponto com análise química mineral por Microsonda Eletrônica (EPMA)

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS
~ Zona de Cisalhamento Três Corações (ZCTC)
— Contato litológico
↔ Zona Transcorrente com sentido de movimento indicado
— Falha de empurrão

CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS
■ Áreas Urbanas

unesp
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS CAMPUS DE RIO CLARO
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) Datum Córrego Alegre Zona 23S
MAPA DE PONTOS E GEOLÓGICO APÊNDICE I
Caracterização Metamórfica de Biotita Xisto da Formação Santo Antônio da região de Luminárias - MG.
Autoria das Folhas: - Caxambu: Trouw <i>et al.</i> , 2003 - Lavras: Queméneur <i>et al.</i> , 2003 - Nepomuceno: Peternel e Castro, 2008 - Varginha: Paciullo e Ribeiro, 2008
Aluna: Lara Agostini Patto Orientadora: Doutoranda Regiane Andrade Fumes Coorientador: Prof. Dr. George Luiz Luvizotto
Local / Data: Rio Claro (SP) - dezembro 2019

**APÊNDICE II – FICHAS DE
DESCRIÇÃO DE LÂMINAS
DELGADAS**

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 08

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação principal, a xistosidade. Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita). Há também uma crenulação bem marcada, formando dobras suaves que curvam a foliação principal.

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micaceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepidoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas. Presença de porfiroblastos de granada.

3. Composição Modal

- I. Quartzo: 35%
- II. Biotita: 30%
- III. Muscovita: 20%
- IV. Plagioclásio: 3%
- V. Clorita: 8%
- VI. Opacos: <1%
- VII. Granada: 4%
- VIII. Apatita: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de 0.1 mm até 0.6 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional D_n, há uma foliação principal S_n bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional e D_{n+1} de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação S_n. Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.3 mm até 1.3mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Distribuídos pela matriz da rocha, há cristais de plagioclásio com geminação polissintética (Lei da Albita) ocorrendo em contato retilíneo com cristais de quartzo, micas e clorita; e de tamanhos variados, podendo chegar a até 0.6 mm.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n. Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal S_n relacionada ao evento D_n é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S_n. Pode-se considerar que houve um evento D_{n-1} anterior que gerou a foliação S₁, não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento D_{n+1} que gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de

crenulação. Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação principal S_n .

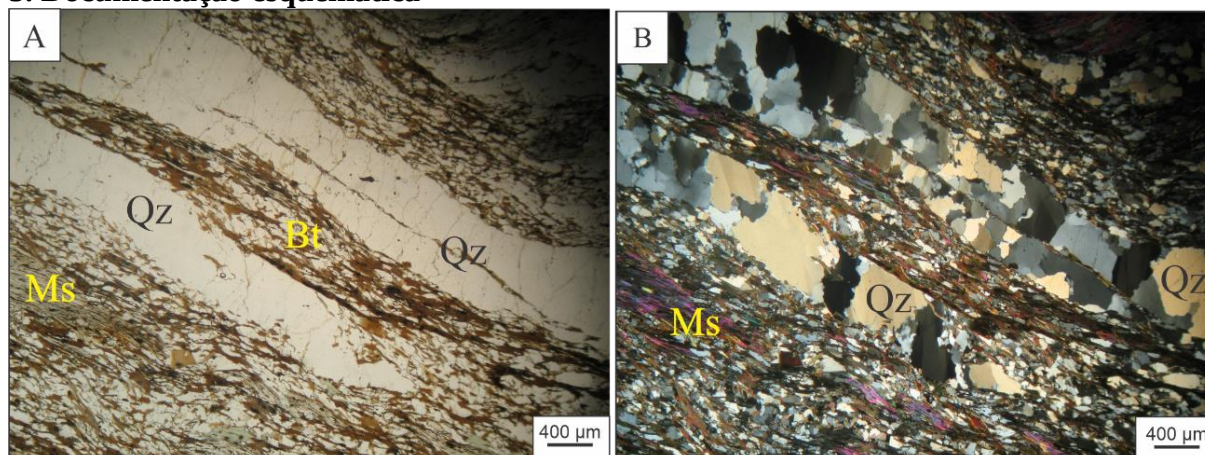
Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 1 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar; e há cristais grandes (até 1.8 mm de diâmetro) intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna do porfiroblasto, neste caso, semelhante à foliação externa S_e . Nas bordas do porfiroblasto há mudanças na orientação preferencial da S_i , com possível deflexão desta.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 4 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin- D_n e Inter- D_{n+1} , visto que durante o intervalo dos eventos D_n e D_{n+1} houve crescimento da granada, tendo suas trilhas de inclusão (quartzo e opacos) registrado tanto a xistossidade (do evento D_n) quanto a crenulação (do evento D_{n+1}).

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. e de É de extrema importância na identificação da orientação da foliação interna ao porfiroblasto, quando comparada à foliação externa.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR-08: matriz marcada por bandas quartzosas e bandas micáceas. A deformação que causou a foliação principal S_n (predominante) recrystalizou os cristais de quartzo. Notar extinção ondulante (aumento 2.5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – Nappe Luminárias – Unidade Santo Antônio

AMOSTRA LR – 09

MICROSCOPIA**1. Estrutura (foliação e lineação)**

Foliação secundária e contínua: xistosidade, bem marcada pelos minerais: placóides (micas), quartzo, opacos.

2. Textura

Poiquilo-lepdoblástica, devido a presença de minerais placóides arranjados paralelamente ou sub-paralelamente e aos porfiroblastos de granada com inclusões de opacos e quartzo, portanto uma textura poiquiloblástica. Neste caso, vale salientar a textura helicítica; em que as inclusões estão orientadas desenhando dobras e aspectos de foliações anteriores.

3. Composição Modal

I. Quartzo: 31%

II. Biotita: 28%

III. Muscovita: 25%

IV. Plagioclásio: 3%

V. Clorita: 5%

VI. Granada: 5%

VII. Opaco (ilmenita): 2%

VIII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo é o mineral mais abundante, ocorrendo na forma de cristais anedrais de tamanho milimétrico médio de 0,3 a 0,4 mm em bandas grosseiras de aglomerados do mineral. Ocorre também distribuída pela matriz, com variados tamanhos (até 0,2 mm) e contato irregulares e lobulados entre si. Cristais de plagioclásio com geminação polissintética (Lei da Albita) ocorrem na matriz da rocha em contato ora lobulado e serrilhado, ora retilíneo com os cristais de quartzo e micas.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n .

Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 0.8 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar. Há também cristais grandes (até 1.8 mm de diâmetro) intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna ao porfiroblasto ser semelhante à foliação externa S_e ; porém com mudanças na orientação próximo às bordas, com possível deflexão desta.

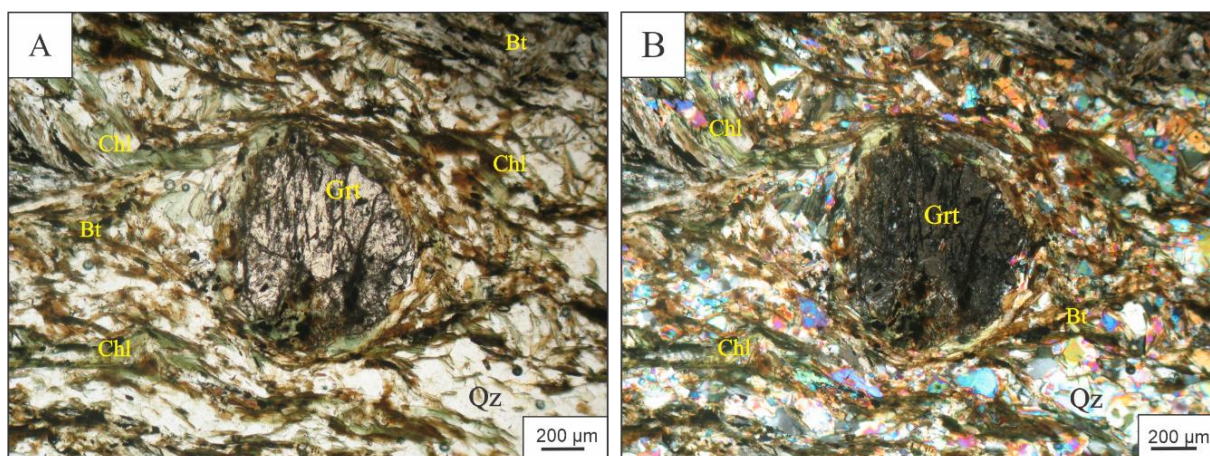
Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 1 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,06 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da

orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais, e de relevante importância na identificação da orientação da foliação interna ao porfiroblasto, quando comparada à foliação externa.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia lâmina LR-09 A: Porfiroblasto de granada (0,03 mm) envolto pela matriz (quartzo, biotita e muscovita) e com clorita sobrecrecendo suas bordas, como um mineral de alteração metamórfica (aumento 5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – Nappe Luminárias – Unidade Santo Antônio

AMOSTRA LR – 17

MICROSCOPIA**Estrutura (foliação e lineação)**

Foliação secundária e contínua: xistosidade. Há sombras de pressão nos porfiroblastos de granada. Lineação mineral bem marcada pelos minerais: placoides (micas), quartzo, opacos e pela sombra de pressão. Há crenulação gerada por fase de Dn+1 de evento deformacional, dobrando e crenulando o Sn da xistosidade.

2. Textura

Predomina textura lepdoblástica, devido a presença de minerais placóides arranjados paralelamente ou sub-paralelamente. Secundariamente classifica-se como poiquiloblástica helicítica devido aos porfiroblastos de granada com inclusões de opacos e quartzo.

3. Composição Modal

- I. Quartzo: 30%
- II. Biotita: 30%
- III. Muscovita: 27%
- IV. Clorita: 4%
- V. Granada: 3 %
- VI. Opaco (ilmenita) 4%
- VII. Plagioclásio: 2%
- VIII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo é o mineral mais abundante, ocorrendo na forma de cristais anedrais de variados tamanhos (comum de até 0,3 mm). Encontra-se bem distribuído na rocha compondo a matriz juntamente com os minerais micáceos. Ocorre também na forma de banda espessa cortando um porfiroblasto de granada fraturado.

Distribuído pela matriz da rocha, há cristais de feldspato potássico com geminação polissintética (Lei da Albita) ocorrendo em contato retilíneo com cristais de quartzo, micas e clorita; e de tamanhos variados, podendo chegar a até 0.6 mm.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, de maneira homogênea e bem distribuídos na totalidade da rocha. Apresenta orientação dos seus cristais de modo a configurar uma textura lepdoblástica com uma foliação Sn marcante e predominante na matriz externa aos porfiroblastos, típico de uma xistosidade.

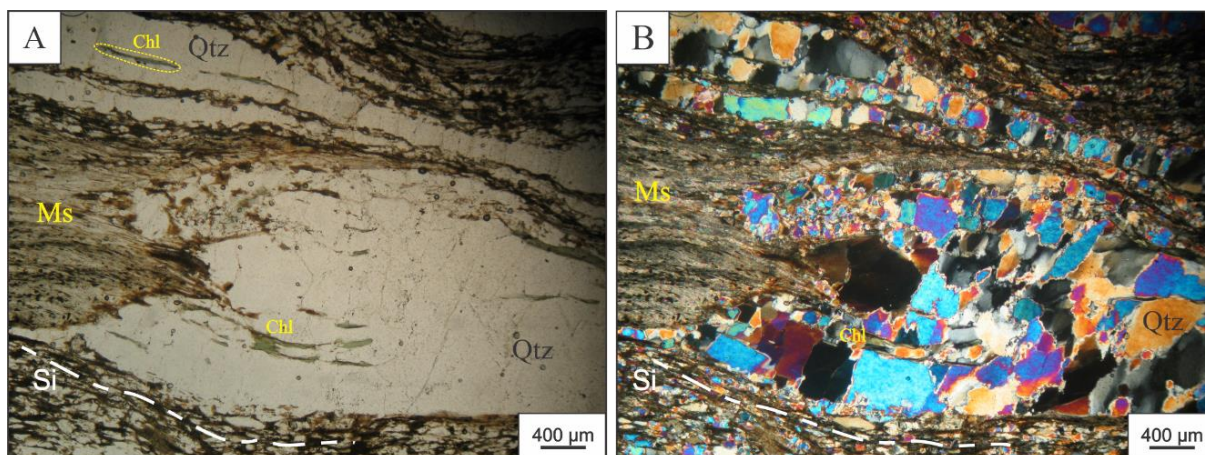
Há presença do mineral clorita, característico pela forma agregada dos cristais da mica e pela cor de interferência típica e anômala, bem como pela birrefringência mais baixa que das micas. Ocorre pouco frequente na lâmina, marcada por menos de <1% de sua totalidade.

Poiquiloblastos de granada de até 4 mm de diâmetro ocorrem pontualmente, perfazendo menos de 1% da totalidade da rocha. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo (em alguns casos apresenta-se incluso na forma de banda grosseira) e opacos. Há orientação dos cristais de mica, opacos e de quartzo em seu entorno de acordo com a orientação preferencial da foliação externa. O padrão de inclusão nas granadas revela uma gênese sin-tectônica.

Dispersos heterogeneamente na rocha como mineral traço, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais, e de relevante importância na identificação da orientação da foliação interna ao porfiroblasto, quando comparada à foliação externa.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

8. Documentação esquemática



Fotomicrografia LR-17: notar os veios lenticulares que quartzo recristalizados paralelos à sub-paralelos à foliação principal Sn que ferou a xistosidade. Aglomerados maiores de quartzo podem chegar a até 7 mm.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 53

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

Foliação secundária e contínua: xistosidade. Há sombras de pressão nos porfiroblastos de granada. Lineação mineral bem marcada pelos minerais: placóides (micas), quartzo, opacos e pela sombra de pressão.

2.2 Textura

Textura equigranular e lepdoblástica, devido a presença de minerais placóides arranjados paralelamente ou sub-paralelamente. Porfiroblastos de granada com inclusões de opacos e quartzo caracterizam, portanto, uma textura poiquiloblástica. Neste caso, vale salientar a textura helicítica; em que as inclusões estão orientadas desenhando dobras e aspectos de foliações anteriores.

2.3 Composição Modal

- I. Quartzo: 38%
- II. Biotita: 25%
- III. Muscovita: 20%
- IV. Plagioclásio: 4%
- V. Clorita: 5%
- VI. Granada: 4%
- VII. Apatita: <1%
- VIII. Opacos: 4%

2.4 Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo é o mineral mais abundante, ocorrendo na forma de cristais anedrais de tamanho milimétrico médio de 0,1 mm. Apresenta extinção ondulante e contato irregulares e lobulados entre si. Cristais anedrais de plagioclásio com macla polissintética são observáveis distribuídos na matriz da rocha, em contato com quartzo e biotita.

Os cristais das micas biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, após os grãos de quartzo, de maneira homogênea. Apresenta dimensões variadas (cristais pequenos de 0,2 mm a intermediários de 0,8 mm), com cristais alongados em uma direção preferencial na matriz configurando uma xistosidade marcada pela foliação externa. Se predominante, também conhecida como *Sn*. As bandas de micas dobradas apresentam plano axial da dobra paralelo à foliação predominante *Sn*, indicando que é resultado de um evento deformacional *Dn*. Na região de charneira destas dobras apertadas, os agregados de mica sofreram recristalização de modo a reorientar os cristais em ângulos opostos, formando arco poligonal. Próximo aos poiquiloblastos de granada, a orientação preferencial da foliação *Sn* se torna curva, envolvendo-os.

Há presença do mineral clorita, característico pela forma agregada dos cristais da mica e pela cor de interferência típica e anômala, bem como pela birrefringência mais baixa que das micas. A clorita ocorre bem distribuída pela matriz junto às micas e quartzo, e também como mineral de alteração sobrecrecendo nas bordas próximo aos contatos com os poiquiloblastos de granada.

Poiquiloblastos de granada de 1,6 mm até 2 mm de diâmetro ocorrem pontualmente, perfazendo 3% da totalidade da rocha. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm. Há orientação dos cristais de biotita, muscovita,

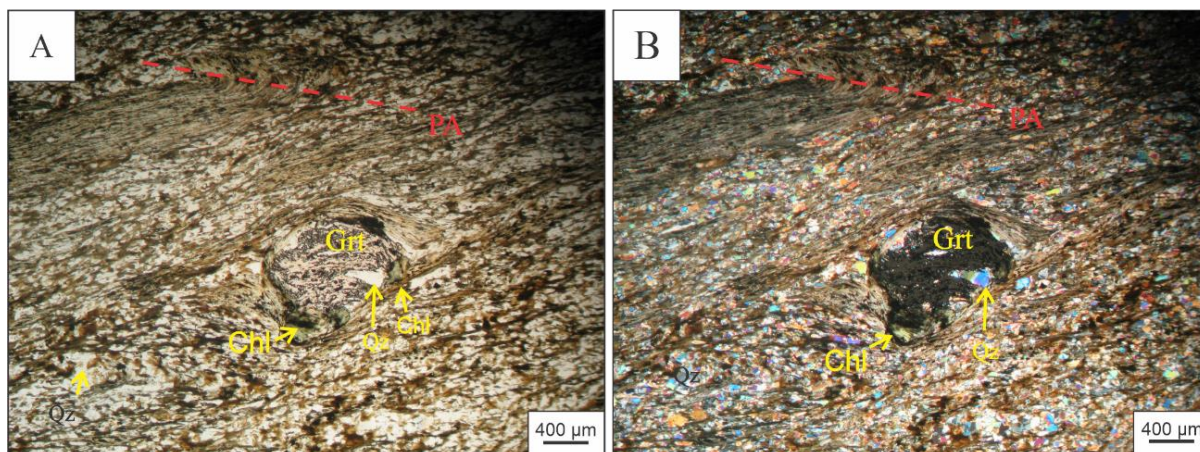
plagioclásio e de quartzo em seu entorno de acordo com a orientação preferencial da xistosidade, configurando sombra de pressão. Dentro dos porfiroblastos de granada, observa-se trilha de inclusão de quartzo e de opacos com uma orientação interna (Si) diferente da orientação da foliação predominante externa Se. Tal orientação das inclusões revela a fase tectônica das granadas, sin-tectônicas ao evento deformacional Dn.

Como mineral traço, há presença de apatita distribuída esparsamente pela matriz. É um mineral incolor em seção basal, relevo moderado positivo, cor de interferência baixa – cinza de primeira ordem - e birrefringência baixa. Com hábito tendendo a pseudo-hexagonal, ora mais arredondado.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR-53: Porfiroblasto de granada envolta pela matriz fina e pelo mineral metamórfico, clorita. Notar crenulação da porção micácea da matriz, onde o plano axial da dobra (PA) é perpendicular à direção preferencial da foliação Sn. (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

7. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio

AMOSTRA LR – 54B

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A estrutura é tipomorfa, formada a partir de eventos metamórficos na rocha. A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação bem marcada com clivagem de crenulação.

Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita).

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micaceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepdoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas.

2.3 Composição Modal

I. Quartzo: 31%

II. Biotita: 30%

III. Muscovita: 20%

IV. Plagioclásio: 3%

V. Clorita: 6%

VI. Opaco (ilmenita): 7%

VII. Granada: 3%

VIII. Apatita e demais acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de 0.9 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional D_n, há uma foliação principal S_n bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional e D_{n+1} de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação S_n. Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.5 mm até 1.8mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Distribuído pela matriz da rocha, há cristais de plagioclásio com geminação polissintética (Lei da Albita) ocorrendo em contato retilíneo com cristais de quartzo, micas e clorita; e de tamanhos variados, podendo chegar a até 0.6 mm.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n. Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal S_n relacionada ao evento D_n é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S₂. Pode-se considerar que houve um evento D_{n-1} anterior que gerou a foliação S₁, não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento D_{n+1} que

gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de crenulação. Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendiculares à foliação principal S_n/S_2 .

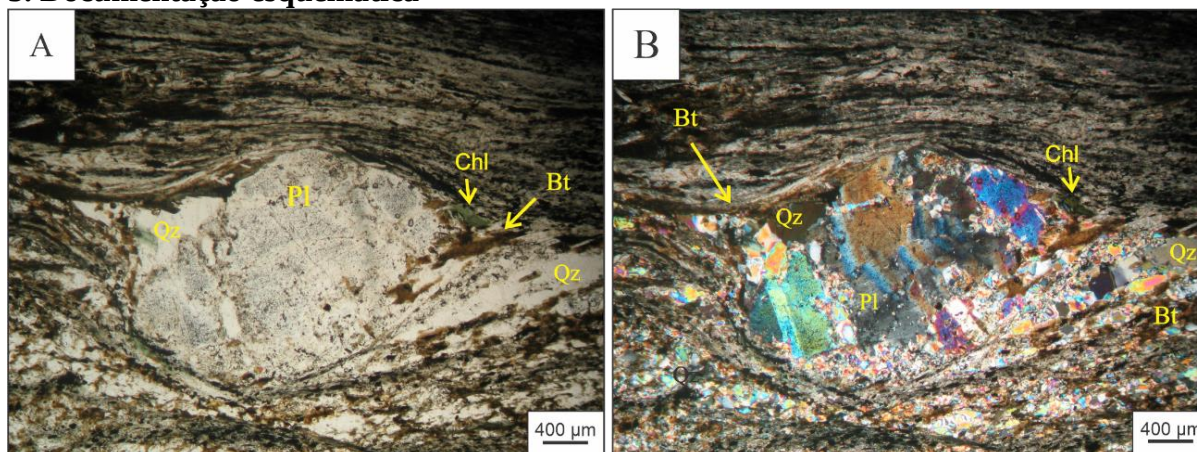
Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 1 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar; e há cristais grandes (até 2.3 mm de diâmetro) intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna ao porfiroblasto ser semelhante à foliação externa S_e ; porém com mudanças na orientação próximo às bordas, com possível deflexão desta.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 5.2 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,08 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR- 54 B: Agregados de quartzo e plagioclásio envoltos pela matriz. Notar que há sombra de pressão em suas laterais, o que permitiu a cristalização de quartzo neste local que recebeu menor pressão durante a deformação (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 69 B

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação secundária e contínua, a xistosidade.

Esta é marcante pelos minerais planares (micas e clorita), sendo uma estrutura penetrativa na rocha por abranger homogeneamente extensa porção areal e superficial. A rocha sofreu deformação dúctil, observável pela presença de dobra isoclinal na foliação principal Sn, marcada pelos cristais de biotita, quartzo e muscovita. Lineação mineral de estiramento é comum.

2. Textura

Textura inequidimensional dos cristais que tendem a se dispor de acordo com a direção preferencial dos esforços atuantes durante a formação ou recristalização da rocha. Predomina textura lepidoblástica, devido a presença de minerais planares arranjados paralelamente ou sub-paralelamente e textura poiquiloblastica helicítica (quando as inclusões estão orientadas desenhando dobras e aspectos de foliações anteriores).

3. Composição Modal

I. Quartzo: 43%

II. Biotita: 21%

III. Muscovita: 20%

IV. Clorita: 8%

V. Granada: 2%

VI. Ilmenita: 6%

VII. Acessórios: 1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo é o mineral mais abundante, ocorrendo na forma de cristais anedrais de tamanho milimétrico pequenos de 0,1 mm, até cristais medianos de 1, 3 mm. Apresenta extinção ondulante e contato retilíneos entre si. Ora ocorrem como bandas grosseiras orientadas de acordo com a foliação principal da matriz, ora como agregados pequenos e recristalizados dispersos em meio à uma maior concentração micácea. O quartzo é também inclusão nas granadas, juntamente com opacos.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares. Apresenta dimensões variadas (cristais pequenos de 0,2 mm a intermediários de 0,8 mm), com cristais alongados em uma direção preferencial na matriz. Há orientação preferencial destes cristais junto aos de quartzo envoltas aos porfiroblastos de granada. O contato dos cristais é retilíneo com os de quartzo.

Associado às micas, há presença do mineral clorita, distribuído homogeneamente e com alta frequência pela lâmina. É característico pela forma agregada dos cristais da mica e pela cor de interferência típica e anômala, bem como pela birrefringência mais baixa que das micas. A clorita é pós tectônica, acompanhando a foliação gerada após o evento deformacional que é registrada na matriz.

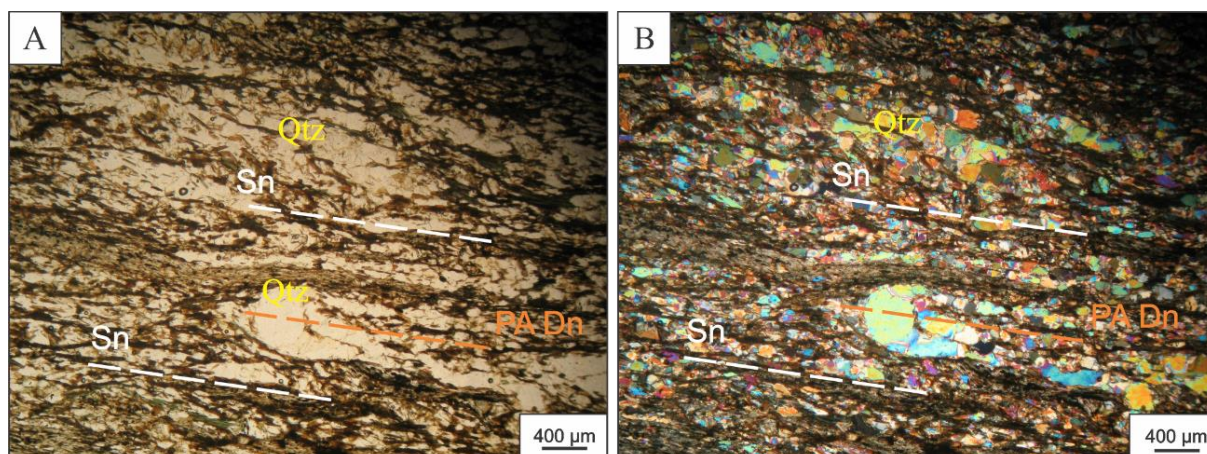
Porfiroblastos de granada de até 3.5 mm de diâmetro ocorrem pontualmente, perfazendo menos de 2% da totalidade da rocha. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de

inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i diferente da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), configurando portanto, um porfiroblasto inter-tectônico formado no intervalo de dois ou mais eventos deformacionais distintos; tendo uma foliação primária S_1 gravada dentro do porfiroblastos, e uma segunda foliação S_2 gravada na matriz. A orientação dos cristais de biotita, muscovita, clorita e de quartzo no entorno das granadas indica a orientação preferencial de uma segunda foliação (S_2) externa S_e ao porfiroblasto.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR – 69 B: veios de quartzo dobrados em meio às bandas micáceas da matriz. Notar que o plano axial da dobra isoclinal Sin-Dn é paralelo à foliação predominante Sn (gerada pelo evento Dn) da matriz (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 70

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação bem marcada com clivagem de crenulação.

Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita).

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micáceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepdoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas.

3. Composição Modal

I. Quartzo: 30%

II. Biotita: 30%

III. Muscovita: 20%

IV. Clorita: 8%

V. Opacos: 7%

VI. Granada: 4%

VII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de até 1.2 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional D_n , há uma foliação principal S_n bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional D_{n+1} de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação S_n . Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.01 mm até 0.8 mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n . Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal S_n relacionada ao evento D_n é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S_2 . Pode-se considerar que houve um evento D_{n-1} anterior que gerou a foliação S_1 , não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento D_{n+1} que gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de crenulação. Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação principal S_n/S_2 .

Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 1.4 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar;

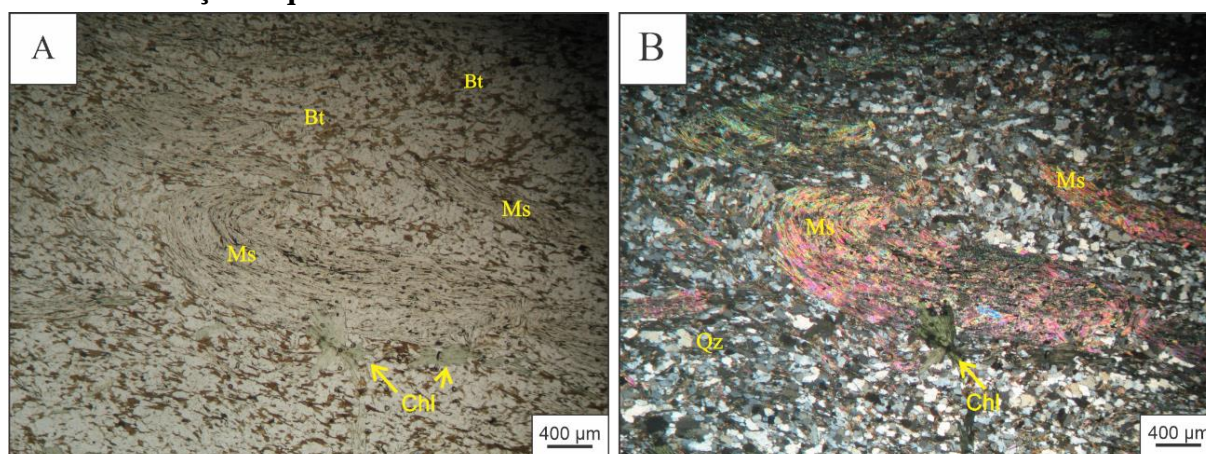
e há cristais grandes intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna ao porfiroblasto ser semelhante à foliação externa S_e ; porém com mudanças na orientação próximo às bordas, com possível deflexão desta.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 5 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,04 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR – 70: matriz predominantemente de quartzo e biotita, com cristais grandes e bem desenvolvidos de muscovita. Notar cristal de clorita verde clara com hábito acicular próximo à muscovita; e dobra isoclinal com plano axial paralelo à foliação S_n . (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 71

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A estrutura é tipomorfa, formada a partir de eventos metamórficos na rocha. A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação bem marcada com clivagem de crenulação.

Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita).

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micaceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepdoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas.

3. Composição Modal

I. Quartzo: 29%

II. Biotita: 30%

III. Muscovita: 25%

IV. Clorita: 8%

V. Opacos: 5%

VII. Granada: 3%

VII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de 0.05 mm até 0.6 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional Dn, há uma foliação principal Sn bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional e Dn+1 de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação Sn. Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.6 mm até 1.5mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante Sn na matriz, relacionada a fase principal de deformação Dn. Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal Sn relacionada ao evento Dn é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S2. Pode-se considerar que houve um evento Dn-1 anterior que gerou a foliação S1, não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento Dn+1 que gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de crenulação. Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação principal Sn.

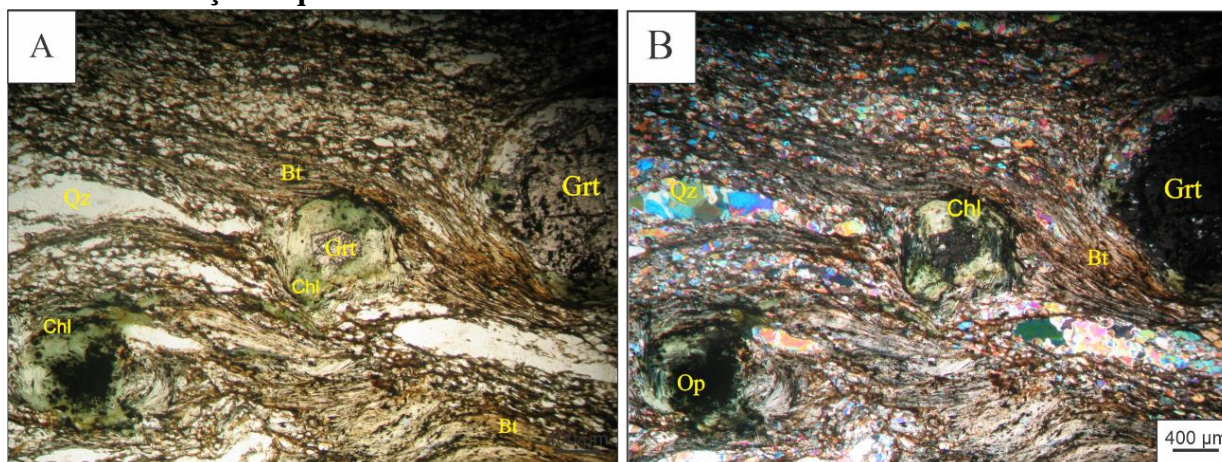
Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 1 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar; e há cristais grandes intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna do porfiroblasto ser semelhante à foliação externa S_e ; porém com mudanças na orientação próximo às bordas, com possível deflexão desta.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 4 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

5. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR-71: porfiroblastos de granada ao centro da imagem já muito consumido pela clorita. Outro porfiroblasto ao canto direito da imagem, mais bem preservado; e opacos envoltos por clorita. Notar matriz micácea e quartzosa com intercalação de lentes de quartzo recristalizado (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – *Nappe* Luminárias – Unidade Santo Antônio
AMOSTRA LR – 77

MICROSCOPIA

1. Estrutura (foliação e lineação)

A estrutura é tipomorfa, formada a partir de eventos metamórficos na rocha. A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação bem marcada com clivagem de crenulação.

Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita).

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micaceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepdoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas.

3. Composição Modal

I. Quartzo: 29%

II. Biotita: 33%

III. Muscovita: 22%

IV. Plagioclásio: 2%

V. Clorita: 7%

VI. Opacos: 5%

VII. Granada: 2%

VIII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de 0.1 mm até 0.6 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional D_n , há uma foliação principal S_n bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional e D_{n+1} de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação S_n . Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.3 mm até 1.3 mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Cristais anédricos de plagioclásio com geminação polissintética (Lei da Albita) ocorrem em contato retilíneo com cristais de quartzo, micas e clorita; e de tamanhos variados, podendo chegar a até 0.5 mm.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante S_n na matriz, relacionada a fase principal de deformação D_n . Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal S_n relacionada ao evento D_n é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S_2 . Pode-se considerar que houve um evento D_{n-1} anterior que gerou a foliação S_1 , não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento D_{n+1} que gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de crenulação.

Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendiculars à foliação principal S_n/S_2 .

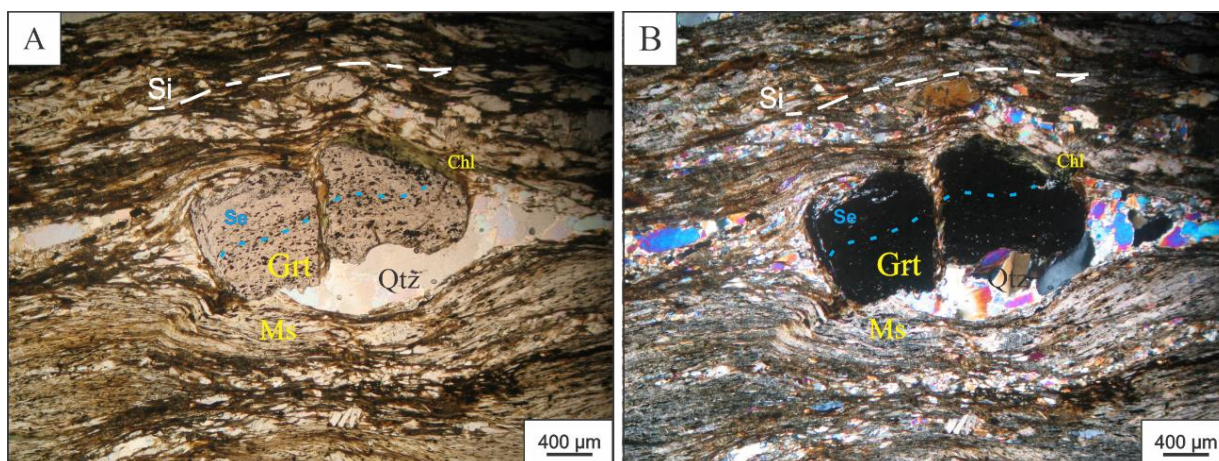
Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina como cristais medianos de até 0,05 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar; e há cristais grandes (até 1.1mm de diâmetro) intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos que, segundo tal padrão de inclusão, definem-se por sin-tectônicos. O crescimento mineral durante um evento tectônico é notadamente marcado pela foliação interna ao porfiroblasto ser semelhante à foliação externa S_e ; porém com mudanças na orientação próximo às bordas, com possível deflexão desta.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 4 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

9. Documentação esquemática



Fotomicrografia da lâmina LR-77: Notar porfiroblastos de granada com trilha de inclusão de opacos marcando o registro da foliação S_n , de modo a considerar-se que a foliação interna (S_i) é igual a externa (S_e). (aumento 2,5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

Microscopia de Rocha Metamórfica – Nappe Luminárias – Unidade Santo Antônio

AMOSTRA LR – 78B

MICROSCOPIA**1. Estrutura (foliação e lineação)**

A estrutura é tipomorfa, formada a partir de eventos metamórficos na rocha. A disposição geométrica dos minerais com orientação planar é caracterizada por uma foliação bem marcada com clivagem de crenulação.

Esta estrutura penetrativa na rocha é marcante pelos minerais planares das micas (muscovita e biotita).

2. Textura

Textura equidimensional dos cristais micaceos planares que perfazem quase a totalidade da rocha, caracterizando textura lepdoblástica com arranjos planares paralelamente ou sub-paralelamente dispostos em bandas contínuas.

3. Composição Modal

I. Quartzo: 30%

II. Biotita: 32%

III. Muscovita: 26%

IV. Plagioclásio: 2%

V. Clorita: 4%

VI. Opacos: 5%

VII. Granada: 1%

VII. Acessórios: <1%

4. Descrição dos minerais, relações mútuas e evolução

O quartzo ocorre concentrado em bandas grosseiras (grãos de 0.2 mm até 0.7 mm) orientadas de acordo com a foliação principal da matriz. Por efeito de ação da fase deformacional Dn, há uma foliação principal Sn bem marcada pelas bandas quartzosas. Há locais pontuais que esta xistosidade predominante sofreu ação de novo evento deformacional e Dn+1 de modo a crenular tais bandas, gerando dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação Sn. Quando não estão concentrados em bandas, os cristais de quartzo ocorrem também, muito disperso por toda a matriz da rocha, de tamanhos variados (0.1 mm até 1.5mm). O quartzo é também inclusão nas granadas e cloritas, juntamente com opacos.

Distribuído pela matriz da rocha, há cristais anédricos de plagioclásio com geminação/macla polissintética ocorrendo em contato retilíneo com cristais de quartzo, micas e clorita; e de tamanhos variados, podendo chegar a até 1 mm.

Os cristais da mica biotita e muscovita são os que ocorrem mais frequentemente na rocha, na forma de bandas contínuas, penetrativas e irregulares por toda a matriz da rocha. Segunda esta orientação preferencial, observam-se domínios de xistosidade bem marcada por uma foliação predominante Sn na matriz, relacionada a fase principal de deformação Dn. Há também entre esta foliação, cristais de mica e quartzo orientados de modo a criar um arco poligonal em meio a uma banda mais micácea, o que indica a recristalização das micas que estavam anteriormente dobradas isoclinalmente.

A foliação principal Sn relacionada ao evento Dn é marcada por dobras isoclinais, cujo plano axial se orienta paralelamente à foliação S2. Pode-se considerar que houve um evento Dn-1

anterior que gerou a foliação S_1 , não mais perceptível na lâmina. E por fim um evento D_{n+1} que gera crenulação das bandas micáceas e quartzosas, porém, sem criar clivagem de crenulação. Neste caso, a crenulação gerada tem dobras abertas com plano axial perpendicular à foliação principal S_n/S_2 .

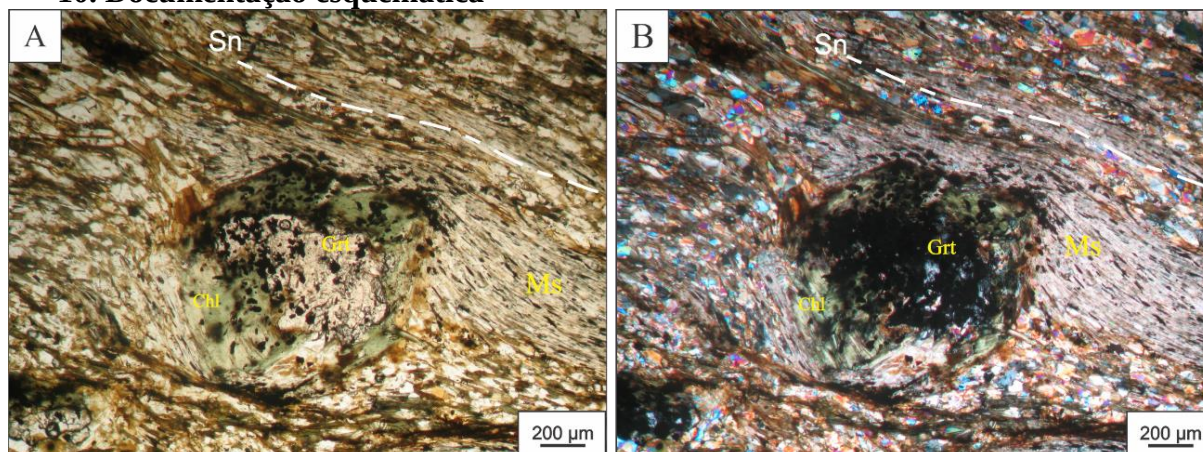
Há presença do mineral clorita, distribuído heterogeneamente pela lâmina em cristais medianos de até 1 mm de comprimento associados com as micas, apresentado hábito planar; e há cristais grandes (até 1.2 mm de diâmetro) intercrescidos com granada. Tanto a granada quanto a clorita são porfiroblastos com inclusões de quartzo e opacos.

Porfiroblastos de granada com intercrescimento de clorita nas bordas são comuns, chegando a ter até 4 mm de diâmetro. Trata-se de cristais isotrópicos fraturados com inclusões de cristais de quartzo menores que 0,1 mm, e inclusões de opacos. Analisando o padrão de inclusão de quartzo e opacos nas granadas, observa-se uma foliação interna S_i semelhante da foliação externa S_e na matriz (micácea e quartzosa), porém com deflexão e variação da orientação da foliação mais próxima às bordas do mineral, configurando portanto, um porfiroblasto sin-tectônico.

Dispersos heterogeneamente na rocha, ocorrem cristais tabulares de ilmenita (mineral opaco) em contato retilíneo com os demais minerais na matriz e como inclusão em porfiroblastos de clorita e granada, indicando a qual evento tectônico estas se formaram. A orientação preferencial dos opacos é um auxiliador na identificação das fases deformacionais (pré, inter, sin e pós tectônica) dos porfiroblastos.

Por fim, apatita, monazita, zircão e rutilo são minerais acessórios que ocorrem dispersos pela matriz em contato retilíneo com as micas, principalmente; ou ainda, como inclusões nos porfiroblastos de granada.

10. Documentação esquemática



Fotomicrografia LR-78B: Notar a substituição de granada por clorita. Processo se inicia na borda do porfiroblasto e vai consumindo em direção ao centro. Presença de trilhas de inclusão são caminhos favoráveis à passagem do novo mineral formado (clorita retrometamórfica) (aumento 5x) **A.** polarizadores paralelos. **B.** Polarizadores cruzados.

6. Classificação da rocha

Classificação química: Rocha aluminosa

Nome metamórfico: biotita xisto com granada.

Rocha pretérita: pelito

APÊNDICE III – ANÁLISE DE QUÍMICA MINERAL

Tabela 07. Análise química mineral da EPMA dos cristais de granada (Grt1) da amostra LR-09. Os locais de análise pontual se referem a borda (b) ou núcleo (n). Abreviações minerais segundo Kretz (1983).

Amostra		LR09											
Análise	Grt1_1	Grt1_2	Grt1_3	Grt1_4	Grt1_5	Grt1_6	Grt1_7	Grt1_8	Grt1_9	Grt1_10	Grt1_11	Grt1_12	Grt1_13
Mineral	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Local	b	b	b	n	n	n	n	n	n	n	n	b	b
SiO ₂	37,44	37,32	37,43	37,71	37,39	36,97	37,05	37,31	37,01	37,38	37,06	37,43	37,26
TiO ₂	0,07	0,07	0,1	0,12	0,11	0,19	0,18	0,18	0,12	0,13	0,16	0,13	0,1
Al ₂ O ₃	21,15	21,32	21,1	21,14	21	20,79	21	20,94	20,99	20,88	20,66	20,91	20,89
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03
FeO	30,9	29,55	28,15	27,46	26,53	26,03	25,81	25,85	26,23	26,33	28,33	27,73	28,46
MnO	4,77	5,71	7,13	7,98	8,87	9,49	9,75	9,86	9,29	9,44	8,39	7,84	7,09
MgO	3,5	3,86	4,13	4,23	4,11	4,45	4,16	3,97	4,21	4,23	3,79	4,13	4,03
CaO	0,02	0,02	0,02	0,04	0	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
Na ₂ O	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0,01
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	97,86	97,85	98,09	98,71	98,03	97,99	98,01	98,14	97,88	98,45	98,42	98,21	97,88
Cations													
Si	3,045	3,03	3,032	3,036	3,033	3,007	3,012	3,029	3,012	3,025	3,018	3,034	3,032
Ti	0,004	0,004	0,006	0,007	0,007	0,012	0,011	0,011	0,007	0,008	0,01	0,008	0,006
Al	2,029	2,041	2,015	2,006	2,009	1,994	2,012	2,004	2,014	1,993	1,983	1,998	2,004
Cr	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	2,102	2,007	1,907	1,848	1,8	1,771	1,755	1,754	1,786	1,782	1,929	1,88	1,937
Mn	0,329	0,393	0,489	0,544	0,609	0,654	0,672	0,678	0,64	0,648	0,579	0,538	0,488
Mg	0,424	0,467	0,499	0,508	0,497	0,54	0,504	0,48	0,511	0,51	0,459	0,498	0,489
Ca	0,002	0,002	0,002	0,003	0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002
Na	0	0	0	0	0,001	0,001	0	0,001	0	0	0	0	0,001
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Sum	7,936	7,945	7,953	7,954	7,957	7,983	7,97	7,959	7,973	7,97	7,981	7,959	7,96
X _{Mg}	0,17	0,19	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,21	0,22	0,22	0,19	0,21	0,20
X _{alm}	0,74	0,70	0,66	0,64	0,62	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,65	0,64	0,66
X _{sps}	0,12	0,14	0,17	0,19	0,21	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22	0,20	0,18	0,17
X _{gr}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X _{prp}	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,16	0,17	0,17	0,15	0,17	0,17

Py= Piropo $Py = [Mg / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Al = Almandina $Al = [Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

SP = essartita $SP = [Mn / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Gr = grossularita $Gr = [Ca / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)]$

Razão catiônica para ferro em granada $x (Grt) = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg^{2+})$

Razão catiônica para cálcio em granada $z (Grt) = Ca^{2+} / (Ca^{2+} + Fe^{2+} + Mg^{2+})$.

Tabela 08. Análise química mineral da EPMA do cristal de granada (Grt2) da amostra LR-09. Os locais de análise pontual se referem a borda (b) ou núcleo (n). Abreviações minerais segundo Kretz (1983).

Amostra	LR09										
Análise	Grt2_1	Grt2_2	Grt2_3	Grt2_4	Grt2_5	Grt2_6	Grt2_7	Grt2_8	Grt2_9	Grt2_10	Grt2_11
Mineral	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Local	b	b	n	n	n	b	b	n	n	n	b
SiO ₂	37,49	37,36	36,95	37,15	37,02	37,22	37,34	37,28	36,98	37,19	37,39
TiO ₂	0,11	0,11	0,17	0,12	0,09	0,11	0,08	0,1	0,13	0,1	0,06
Al ₂ O ₃	21	20,94	20,78	21,12	20,82	21	21,06	21,07	20,98	21,04	21,01
Cr ₂ O ₃	0,01	0,02	0,05	0,02	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
FeO	28,81	27,97	27,8	27,52	26,99	27,28	27,38	26,54	26,68	27,52	29,68
MnO	6,75	7,48	7,63	7,92	8,21	8,3	8,19	8,8	8,44	7,71	5,67
MgO	3,67	3,9	4,03	3,98	3,89	3,71	3,73	3,99	4,11	3,83	3,35
CaO	0,03	0	0,01	0	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,03
Na ₂ O	0	0,01	0	0	0,01	0,02	0	0	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	97,87	97,8	97,41	97,82	97,07	97,66	97,81	97,84	97,35	97,41	97,21
Cations											
Si	3,048	3,04	3,023	3,022	3,035	3,035	3,038	3,03	3,021	3,036	3,058
Ti	0,006	0,007	0,011	0,007	0,006	0,007	0,005	0,006	0,008	0,006	0,004
Al	2,013	2,008	2,004	2,026	2,012	2,019	2,02	2,02	2,021	2,024	2,026
Cr	0,001	0,001	0,003	0,001	0,003	0	0,001	0,001	0,001	0	0,001
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	1,959	1,903	1,902	1,873	1,851	1,86	1,863	1,804	1,823	1,878	2,031
Mn	0,465	0,515	0,529	0,546	0,57	0,574	0,565	0,606	0,584	0,533	0,393
Mg	0,445	0,473	0,491	0,482	0,475	0,451	0,452	0,483	0,5	0,466	0,408
Ca	0,003	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,002
Na	0	0,001	0	0	0,001	0,002	0	0,001	0	0,001	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Sum	7,939	7,949	7,963	7,957	7,952	7,95	7,946	7,954	7,96	7,946	7,924
X _{Mg}	0,19	0,20	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22	0,20	0,17
X _{alm}	0,68	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,65	0,62	0,63	0,65	0,72
X _{sps}	0,16	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,19	0,14
X _{gr}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X _{prp}	0,15	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,14

Py= Piropo $Py = [Mg / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Al = Almandina $Al = [Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

SP = espessartita $SP = [Mn / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Gr = grossularita $Gr = [Ca / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)]$

Razão catiônica para ferro em granada $x (Grt) = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg^{2+})$

Razão catiônica para cálcio em granada $z (Grt) = Ca^{2+} / (Ca^{2+} + Fe^{2+} + Mg^{2+})$.

Tabela 09. Análise química mineral da EPMA do cristal de granada da amostra LR-54. Os locais de análise pontual se referem a borda (b) ou núcleo (n). Abreviações minerais segundo Kretz (1983).

Amostra	LR-54												
Análise	Grt1_1	Grt1_2	Grt1_3	Grt1_4	Grt1_5	Grt1_6	Grt1_7	Grt1_8	Grt1_9	Grt1_10	Grt1_11	Grt1_12	Grt1_13
Mineral	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Local	b	b	b	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	37,12	37,35	37,39	37,17	37,13	37,16	37,23	37,01	37,33	37,04	37,49	37,17	37,18
TiO ₂	0,01	0,03	0,14	0,12	0,08	0,16	0,1	0,14	0,13	0,19	0,12	0,08	0,07
Al ₂ O ₃	21,31	21,29	20,8	20,92	20,88	20,96	20,72	20,98	20,89	20,76	20,84	20,88	20,81
Cr ₂ O ₃	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
FeO	33,87	33,34	29,3	28,03	27,61	26,65	26,43	26,52	26,82	26,99	28,17	29	29,72
MnO	2,65	3,06	6,76	7,87	8,72	9,17	9,07	9,06	8,88	8,47	7,72	6,93	5,57
MgO	3,04	2,6	3,96	4,09	3,78	4,33	4,51	4,51	4,34	4,41	4,13	4	3,9
CaO	0,05	0,02	0,02	0	0,02	0	0,02	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01
Na ₂ O	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0,02	0,01	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	98,05	97,71	98,38	98,21	98,24	98,44	98,09	98,25	98,44	97,9	98,49	98,07	97,28
Cations													
Si	3,028	3,053	3,033	3,019	3,021	3,01	3,023	3,002	3,021	3,015	3,034	3,024	3,041
Ti	0	0,002	0,009	0,007	0,005	0,01	0,006	0,009	0,008	0,011	0,007	0,005	0,004
Al	2,05	2,052	1,989	2,004	2,003	2,001	1,983	2,007	1,993	1,992	1,988	2,002	2,007
Cr	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	2,311	2,28	1,988	1,904	1,879	1,806	1,795	1,799	1,815	1,838	1,907	1,973	2,034
Mn	0,183	0,212	0,465	0,541	0,601	0,63	0,624	0,623	0,609	0,584	0,53	0,477	0,386
Mg	0,37	0,317	0,479	0,495	0,459	0,523	0,546	0,545	0,524	0,535	0,498	0,485	0,475
Ca	0,004	0,001	0,002	0	0,002	0	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0	0,001
Na	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0,003	0,002	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Sum	7,947	7,92	7,964	7,971	7,971	7,98	7,979	7,986	7,975	7,978	7,965	7,969	7,95
X _{Mg}	0,14	0,12	0,19	0,21	0,20	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,21	0,20	0,19
X _{alm}	0,81	0,81	0,68	0,65	0,64	0,61	0,61	0,61	0,62	0,62	0,65	0,67	0,70
X _{sps}	0,06	0,08	0,16	0,18	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,18	0,16	0,13
X _{gr}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X _{prp}	0,13	0,11	0,16	0,17	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16

Py= Piropo $Py = [Mg / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Al = Almandina $Al = [Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

SP = espessartita $SP = [Mn / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Gr = grossularita $Gr = [Ca / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)]$

Razão catiônica para ferro em granada $x (Grt) = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg^{2+})$

Razão catiônica para cálcio em granada $z (Grt) = Ca^{2+} / (Ca^{2+} + Fe^{2+} + Mg^{2+})$.

Tabela 09 – Continuação

Amostra		LR-54										
Análise	Grt1_14	Grt1_15	Grt1_16	Grt1_17	Grt1_18	Grt1_19	Grt1_20	Grt1_21	Grt1_22	Grt1_23	Grt1_24	Grt1_25
Mineral	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Local	b	b	b	b	b	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	37,33	37,09	37,16	37,26	37,45	37,26	37,04	37,21	37,14	37,18	37,3	37,1
TiO ₂	0,08	0,03	0,03	0,02	0,04	0,08	0,11	0,23	0,18	0,19	0,17	0,06
Al ₂ O ₃	20,94	20,73	20,78	21,04	21,13	20,91	20,94	20,78	20,8	20,93	20,9	21,09
Cr ₂ O ₃	0	0,03	0,03	0,01	0	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,04
FeO	30,38	32,09	33,35	33,26	31,44	29,8	27,62	26,29	26,34	26,74	26,86	31,33
MnO	4,96	3,72	2,72	2,79	4,21	6,09	8,28	9,09	8,93	8,96	8,75	4,18
MgO	3,97	3,38	3,1	2,93	3,86	3,74	4,32	4,14	4,67	4,39	4,55	4,16
CaO	0	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0	0	0,01	0	0	0,01
Na ₂ O	0,01	0	0,01	0,01	0	0	0,01	0	0	0	0,01	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	97,68	97,1	97,22	97,36	98,16	97,9	98,35	97,78	98,09	98,4	98,59	97,99
Cations												
Si	3,04	3,049	3,054	3,055	3,037	3,035	3,006	3,029	3,013	3,011	3,013	3,016
Ti	0,005	0,002	0,002	0,002	0,003	0,005	0,007	0,014	0,011	0,011	0,01	0,004
Al	2,011	2,009	2,013	2,034	2,02	2,008	2,004	1,994	1,989	1,998	1,991	2,022
Cr	0	0,002	0,002	0,001	0	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,003	0,003
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	2,069	2,206	2,292	2,28	2,132	2,03	1,874	1,79	1,787	1,811	1,815	2,13
Mn	0,342	0,259	0,19	0,194	0,289	0,42	0,569	0,627	0,614	0,614	0,599	0,288
Mg	0,482	0,414	0,38	0,358	0,467	0,454	0,523	0,502	0,565	0,53	0,548	0,504
Ca	0	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0	0	0,001	0	0	0,001
Na	0,001	0	0,001	0,001	0	0	0,001	0	0	0	0,001	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Sum	7,951	7,944	7,937	7,927	7,95	7,955	7,985	7,959	7,981	7,978	7,98	7,968
X _{Mg}	0,19	0,16	0,14	0,14	0,18	0,18	0,22	0,22	0,24	0,23	0,23	0,19
X _{alm}	0,72	0,77	0,80	0,80	0,74	0,70	0,63	0,61	0,60	0,61	0,61	0,73
X _{sps}	0,12	0,09	0,07	0,07	0,10	0,14	0,19	0,21	0,21	0,21	0,20	0,10
X _{gr}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X _{prp}	0,17	0,14	0,13	0,13	0,16	0,16	0,18	0,17	0,19	0,18	0,19	0,17

Py= Piropo $Py = [Mg / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Al = Almandina $Al = [Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

SP = essartita $SP = [Mn / (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)]$

Gr = grossularita $Gr = [Ca / (Fe^{2+} + Mn + Mg + Ca)]$

Razão catiônica para ferro em granada $x (Grt) = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg^{2+})$

Razão catiônica para cálcio em granada $z (Grt) = Ca^{2+} / (Ca^{2+} + Fe^{2+} + Mg^{2+})$.

Tabela 10. Análise química mineral da EPMA de biotita da amostra LR-09

Amostra	LR-09																		
Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Mineral	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt
SiO ₂	35,8	35,1	34,8	35,8	35,9	35,6	35,6	35,7	35,5	35,4	35,8	34,3	35,3	35,6	35,6	35,4	35,1	35,3	34,4
TiO ₂	1,55	1,31	1,4	1,75	1,6	1,8	1,54	1,74	1,64	1,72	1,82	1,52	1,59	1,61	1,59	1,51	1,59	1,59	1,08
Al ₂ O ₃	17,9	18,2	18,1	18,1	18	17,8	18,6	18,3	18,6	18,9	18,9	17,9	17,6	18,2	18,2	18,4	18,1	18,3	18,7
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,26	0	0	0	0	0	0	2,62
FeO	18,4	18,5	18,9	18,7	18,8	18,4	18,3	18,6	18,3	17,8	18,2	17	19	18,3	18,6	18,6	18,8	18,3	16,6
MnO	0,13	0,12	0,07	0,11	0,1	0,1	0,12	0,11	0,06	0,09	0,09	0,09	0,12	0,1	0,12	0,11	0,11	0,13	0,09
MgO	9,9	9,6	9,44	9,53	9,72	9,63	9,68	9,84	9,62	8,95	9,32	10,1	9,77	9,85	9,68	9,93	9,76	9,73	10
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0,05	0,07	0,09	0,07	0,04	0,06	0,09	0,07	0,05	0,07	0,06	0,06	0,06	0,09	0,03	0,06	0,07	0,04	0,05
K ₂ O	8,84	8,69	8,51	8,7	8,84	8,7	8,83	8,81	8,71	8,37	8,76	8,04	8,62	8,69	8,63	8,84	8,73	8,73	7,96
Total	92,6	91,6	91,4	92,7	93	92,1	92,8	93,1	92,4	91,3	92,9	91,2	92,1	92,4	92,5	92,8	92,2	92,1	91,5
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2,78	2,76	2,75	2,78	2,78	2,78	2,76	2,76	2,76	2,77	2,76	2,7	2,77	2,77	2,77	2,75	2,75	2,76	2,69
Ti	0,09	0,08	0,08	0,1	0,09	0,11	0,09	0,1	0,1	0,1	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,06
Al	1,64	1,69	1,69	1,65	1,65	1,64	1,7	1,66	1,7	1,74	1,72	1,66	1,63	1,67	1,67	1,69	1,67	1,69	1,73
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0	0	0	0	0	0	0,16
Fe ₂	1,2	1,22	1,25	1,22	1,22	1,2	1,19	1,21	1,19	1,17	1,18	1,12	1,25	1,19	1,21	1,2	1,23	1,2	1,09
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	1,15	1,13	1,11	1,1	1,12	1,12	1,12	1,13	1,11	1,05	1,07	1,18	1,14	1,14	1,12	1,15	1,14	1,13	1,17
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
K	0,88	0,87	0,86	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,84	0,86	0,81	0,86	0,86	0,86	0,88	0,87	0,87	0,8
Sum	7,75	7,76	7,76	7,73	7,75	7,73	7,75	7,75	7,73	7,68	7,71	7,72	7,76	7,74	7,74	7,77	7,77	7,75	7,7

Tabela 12. Análise química mineral da EPMA de muscovita da amostra LR-09

Amostra	LR-09												
Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mineral	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
Local	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	45,49	45,84	45,64	45,52	45,45	46,03	46,2	45,86	46,25	46,27	45,91	46,19	46,41
TiO ₂	0,25	0,39	0,26	0,27	0,44	0,29	0,34	0,31	0,33	0,36	0,27	0,34	0,36
Al ₂ O ₃	36,23	35,23	35,62	36,44	35,06	35,31	33,45	35,61	34,73	34,7	35,28	35,48	33,88
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0,19	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	1,17	1,09	1,1	0,91	1,4	1,14	1,49	1,08	1,2	1,19	1,2	1,15	1,44
MnO	0	0	0,01	0,02	0	0	0,01	0	0,02	0,01	0	0,01	0,02
MgO	0,63	0,77	0,69	0,61	0,93	0,72	1,2	0,71	0,91	0,88	0,84	0,74	1,16
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	1,55	1,38	1,35	1,4	1,08	0,85	0,68	0,83	0,68	0,68	0,88	0,71	0,64
K ₂ O	8,6	8,59	8,75	8,5	9,24	9,55	9,39	9,42	9,68	9,63	9,39	9,84	9,67
Total	93,92	93,28	93,41	93,86	93,68	93,89	92,77	93,81	93,81	93,71	93,78	94,47	93,58
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Cátions													
Si	3,045	3,085	3,071	3,042	3,065	3,09	3,142	3,077	3,109	3,112	3,085	3,086	3,132
Ti	0,013	0,02	0,013	0,014	0,022	0,015	0,017	0,016	0,017	0,018	0,014	0,017	0,018
Al	2,859	2,795	2,825	2,872	2,787	2,794	2,681	2,817	2,753	2,751	2,794	2,794	2,695
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0,01	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂	0,065	0,061	0,062	0,051	0,079	0,064	0,085	0,061	0,068	0,067	0,068	0,064	0,081
Mn	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0,001	0	0	0,001	0,001
Mg	0,063	0,077	0,069	0,061	0,094	0,072	0,122	0,071	0,091	0,088	0,084	0,073	0,117
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0,202	0,18	0,176	0,182	0,141	0,111	0,09	0,108	0,089	0,088	0,115	0,092	0,083
K	0,734	0,737	0,751	0,724	0,794	0,817	0,815	0,806	0,83	0,827	0,805	0,839	0,832
Sum	6,981	6,956	6,968	6,957	6,986	6,963	6,953	6,956	6,958	6,952	6,965	6,967	6,961

Tabela 12. – *Continuação*

Amostra		LR-09												
Análise	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Mineral	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
Local	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	45,63	46,41	46,15	46,09	46,09	46,72	46,37	45,58	45,64	45,97	45,5	46,34	47,07	46,06
TiO ₂	0,3	0,35	0,38	0,42	0,36	0,41	0,37	0,34	0,34	0,32	0,3	0,39	0,39	0,39
Al ₂ O ₃	35,87	34,29	34,41	34,74	34,32	33,98	34,53	34,93	35,42	35,36	35,58	33,44	33,38	33,94
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	1,14	1,33	1,25	1,32	1,3	1,38	1,25	1,19	1,11	1,04	1,13	1,47	1,67	1,33
MnO	0,01	0,02	0	0,01	0,02	0	0,02	0	0,02	0	0,01	0	0,02	0,01
MgO	0,69	1,04	0,92	0,98	1,07	1,11	0,98	0,78	0,62	0,77	0,67	1,24	1,23	1,07
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	1,01	0,48	0,82	0,87	0,81	0,47	0,94	0,55	0,8	1,28	0,84	0,71	0,67	0,69
K ₂ O	9,39	9,99	9,59	9,25	9,4	9,95	9,01	9,53	9,43	8,72	9,38	9,57	9,41	9,45
Total	94,04	93,9	93,52	93,68	93,38	94,03	93,46	92,9	93,39	93,47	93,41	93,17	93,84	92,93
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Cátions														
Si	3,059	3,123	3,113	3,1	3,112	3,138	3,119	3,091	3,078	3,087	3,068	3,141	3,164	3,125
Ti	0,015	0,018	0,02	0,021	0,018	0,021	0,019	0,017	0,017	0,016	0,015	0,02	0,02	0,02
Al	2,835	2,72	2,737	2,754	2,732	2,691	2,738	2,792	2,816	2,8	2,829	2,672	2,645	2,715
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂	0,064	0,075	0,07	0,074	0,074	0,078	0,07	0,068	0,063	0,059	0,064	0,083	0,094	0,075
Mn	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0	0	0,001	0
Mg	0,069	0,104	0,092	0,099	0,107	0,112	0,098	0,079	0,063	0,077	0,067	0,126	0,123	0,108
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0,131	0,062	0,107	0,114	0,106	0,061	0,122	0,072	0,105	0,166	0,11	0,093	0,088	0,09
K	0,803	0,857	0,825	0,794	0,81	0,853	0,773	0,825	0,811	0,747	0,807	0,828	0,807	0,818
Sum	6,977	6,96	6,965	6,956	6,962	6,953	6,941	6,944	6,955	6,953	6,961	6,964	6,942	6,952

Tabela 13. Análise química mineral da EPMA de muscovita da amostra LR-54

Amostra	LR-54																	
Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Mineral	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms
Local	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	46,52	46,19	46,37	45,97	46,54	46,22	45,43	45,77	46,14	46,15	45,87	45,82	46,27	45,73	46,41	46,23	46,25	45,88
TiO ₂	0,21	0,29	0,31	0,27	0,3	0,29	0,3	0,31	0,28	0,28	0,3	0,31	0,28	0,28	0,32	0,44	0,32	0,26
Al ₂ O ₃	35,54	35,67	35,31	35,02	35,52	35,25	36	35,84	35,28	35,93	35,32	34,9	35,54	35,78	35,59	34,48	34,8	35,62
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	1,17	1,17	1,28	1,22	1,23	1,22	1,07	1,07	1,21	1,06	1,15	1,18	1,05	1,03	1,1	1,32	1,18	1,1
MnO	0,02	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0,01	0,01	0	0
MgO	0,66	0,67	0,78	0,81	0,74	0,79	0,55	0,7	0,73	0,59	0,71	0,79	0,6	0,62	0,7	0,83	0,81	0,64
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na ₂ O	0,89	0,83	0,68	0,83	1,16	1,12	1,4	1,37	0,8	1,35	0,88	0,71	0,88	0,89	1,22	1,05	1,12	1,11
K ₂ O	9,27	9,41	9,76	9,56	8,7	9,12	8,83	8,69	9,51	8,93	9,21	9,57	9,05	9,51	8,95	9,13	8,97	9,07
Total	94,28	94,23	94,49	93,69	94,19	94	93,58	93,75	93,94	94,3	93,44	93,3	93,68	93,84	94,29	93,48	93,46	93,69
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Cátions																		
Si	3,102	3,085	3,096	3,094	3,1	3,094	3,053	3,066	3,094	3,076	3,088	3,096	3,099	3,069	3,092	3,115	3,111	3,08
Ti	0,011	0,015	0,016	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,014	0,014	0,015	0,016	0,014	0,014	0,016	0,022	0,016	0,013
Al	2,794	2,809	2,779	2,779	2,789	2,782	2,852	2,831	2,789	2,823	2,803	2,78	2,806	2,832	2,796	2,738	2,76	2,818
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂	0,065	0,066	0,071	0,069	0,069	0,068	0,06	0,06	0,068	0,059	0,065	0,067	0,059	0,058	0,061	0,074	0,067	0,062
Mn	0,001	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0,001	0	0	0
Mg	0,065	0,067	0,078	0,082	0,073	0,079	0,055	0,07	0,073	0,059	0,071	0,079	0,06	0,062	0,069	0,083	0,081	0,064
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0,115	0,108	0,088	0,108	0,149	0,145	0,182	0,178	0,104	0,174	0,115	0,093	0,114	0,115	0,157	0,137	0,146	0,144
K	0,789	0,802	0,831	0,821	0,739	0,779	0,757	0,743	0,814	0,759	0,791	0,825	0,773	0,814	0,761	0,785	0,77	0,777
Sum	6,943	6,951	6,959	6,968	6,935	6,962	6,976	6,963	6,957	6,965	6,949	6,958	6,928	6,966	6,954	6,955	6,952	6,959

Tabela 14. Análise química mineral da EPMA de clorita da amostra LR-09

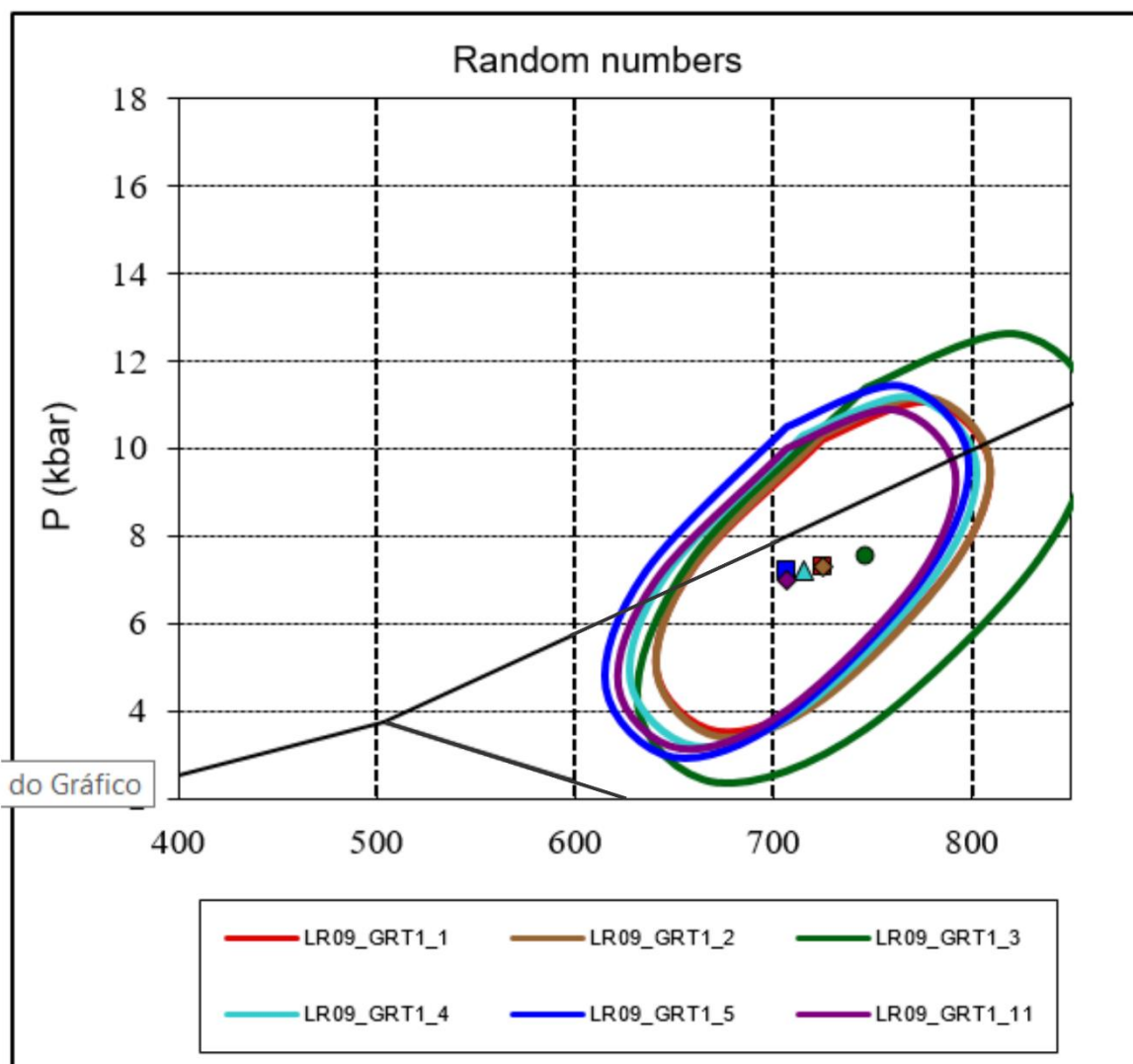
Amostra	LR-09						
Análise	1	2	3	4	5	6	7
Mineral	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
Local	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	24,7	24,48	24,53	24,67	24,7	24,15	24,57
TiO ₂	0,07	0,06	0,05	0,05	0,08	0,06	0,06
Al ₂ O ₃	21,87	22,73	22,37	21,81	22,27	22,13	22,12
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0
FeO	22,99	23,64	23,05	22,98	23,29	23,89	23,84
MnO	0,18	0,18	0,2	0,19	0,17	0,18	0,18
MgO	14,8	14,58	14,61	15,1	14,91	14,01	14,44
CaO	0,01	0,02	0	0,03	0,01	0,01	0,01
Na ₂ O	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,02
K ₂ O	0	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0
Total	84,62	85,71	84,84	84,85	85,46	84,44	85,24
Oxygens	14	14	14	14	14	14	14
Cátions							
Si	2,667	2,618	2,643	2,658	2,644	2,63	2,646
Ti	0,006	0,005	0,004	0,004	0,006	0,005	0,005
Al	2,785	2,865	2,842	2,771	2,811	2,841	2,808
Cr	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂	2,077	2,114	2,077	2,071	2,086	2,176	2,147
Mn	0,016	0,017	0,018	0,017	0,015	0,016	0,016
Mg	2,383	2,323	2,347	2,425	2,379	2,273	2,318
Ca	0,001	0,002	0	0,003	0,001	0,001	0,001
Na	0	0,002	0	0,001	0,001	0,002	0,003
K	0	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0
Sum	9,934	9,947	9,933	9,954	9,946	9,948	9,946

Tabela 15. Análise química mineral da EPMA de clorita da amostra LR-54

Amostra	LR-54													
Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	16
Mineral	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
Local	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO ₂	24,09	23,85	24,33	24,35	24,19	23,97	24,22	24,66	24,12	26,47	24,29	24,38	24,39	24,51
TiO ₂	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,39	0,05	0,03	0,06	0,06
Al ₂ O ₃	23,25	22,81	22,62	22,72	22,94	22,47	22,52	22,85	22,72	21,33	22,57	23,66	21,97	23,3
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	23,68	24,47	24,14	24,09	24,69	24,97	24,45	24,34	24,96	24,01	24,74	24,78	25,16	24,18
MnO	0,06	0,05	0,1	0,09	0,07	0,09	0,1	0,1	0,09	0,08	0,09	0,07	0,08	0,08
MgO	14,23	13,63	13,82	13,54	13,55	13,36	13,65	13,11	13,54	12,37	13,22	12,4	13,09	13,87
CaO	0	0	0,01	0,04	0	0,01	0,01	0	0,01	0	0	0,02	0	0
Na ₂ O	0	0,01	0,02	0	0	0,01	0,02	0	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0
K ₂ O	0	0	0,01	0,03	0,01	0	0,01	0,05	0,01	1,44	0,04	0,04	0,03	0,01
Total	85,35	84,88	85,12	84,92	85,5	84,94	85,03	85,16	85,5	86,12	85,01	85,4	84,79	86
Oxigens	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Cátions														
Si	2,586	2,589	2,627	2,634	2,606	2,608	2,624	2,66	2,605	2,834	2,635	2,626	2,66	2,614
Ti	0,004	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003	0,031	0,004	0,003	0,005	0,005
Al	2,942	2,92	2,88	2,897	2,914	2,883	2,875	2,906	2,892	2,692	2,886	3,005	2,825	2,93
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ₂	2,126	2,222	2,179	2,179	2,225	2,272	2,215	2,195	2,255	2,15	2,244	2,233	2,294	2,157
Mn	0,005	0,005	0,009	0,009	0,006	0,008	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009	0,006	0,008	0,007
Mg	2,276	2,205	2,224	2,183	2,176	2,167	2,204	2,106	2,179	1,974	2,137	1,991	2,128	2,204
Ca	0	0	0,001	0,004	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0	0	0,002	0	0
Na	0	0,002	0,005	0	0	0,002	0,004	0	0,005	0,004	0,001	0,002	0	0
K	0	0	0,001	0,004	0,002	0	0,001	0,007	0,001	0,197	0,006	0,005	0,005	0,001
Sum	9,939	9,947	9,931	9,915	9,933	9,946	9,937	9,887	9,949	9,89	9,921	9,872	9,925	9,917

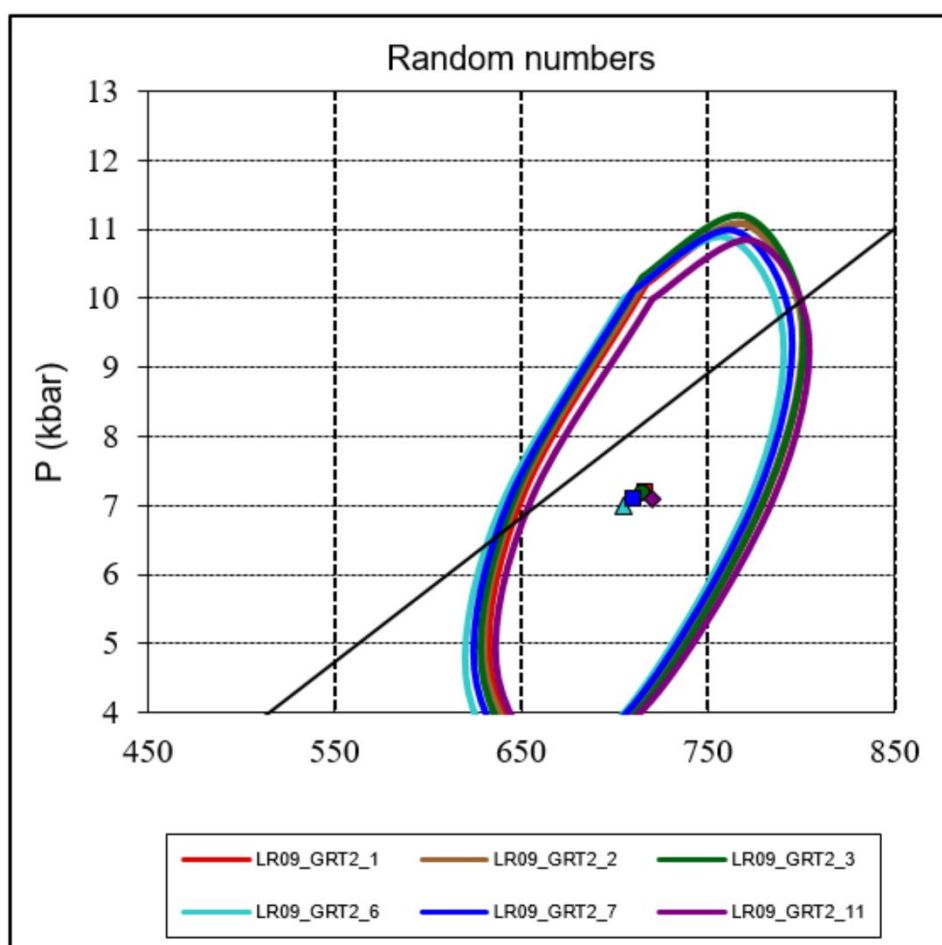
APÊNDICE IV – GRÁFICOS DO THERMOCALC

Grafico 1. Condições de P e T para cristal de granada (GRT1) para amostra LR-09 calculados pelo THERMOCALC.



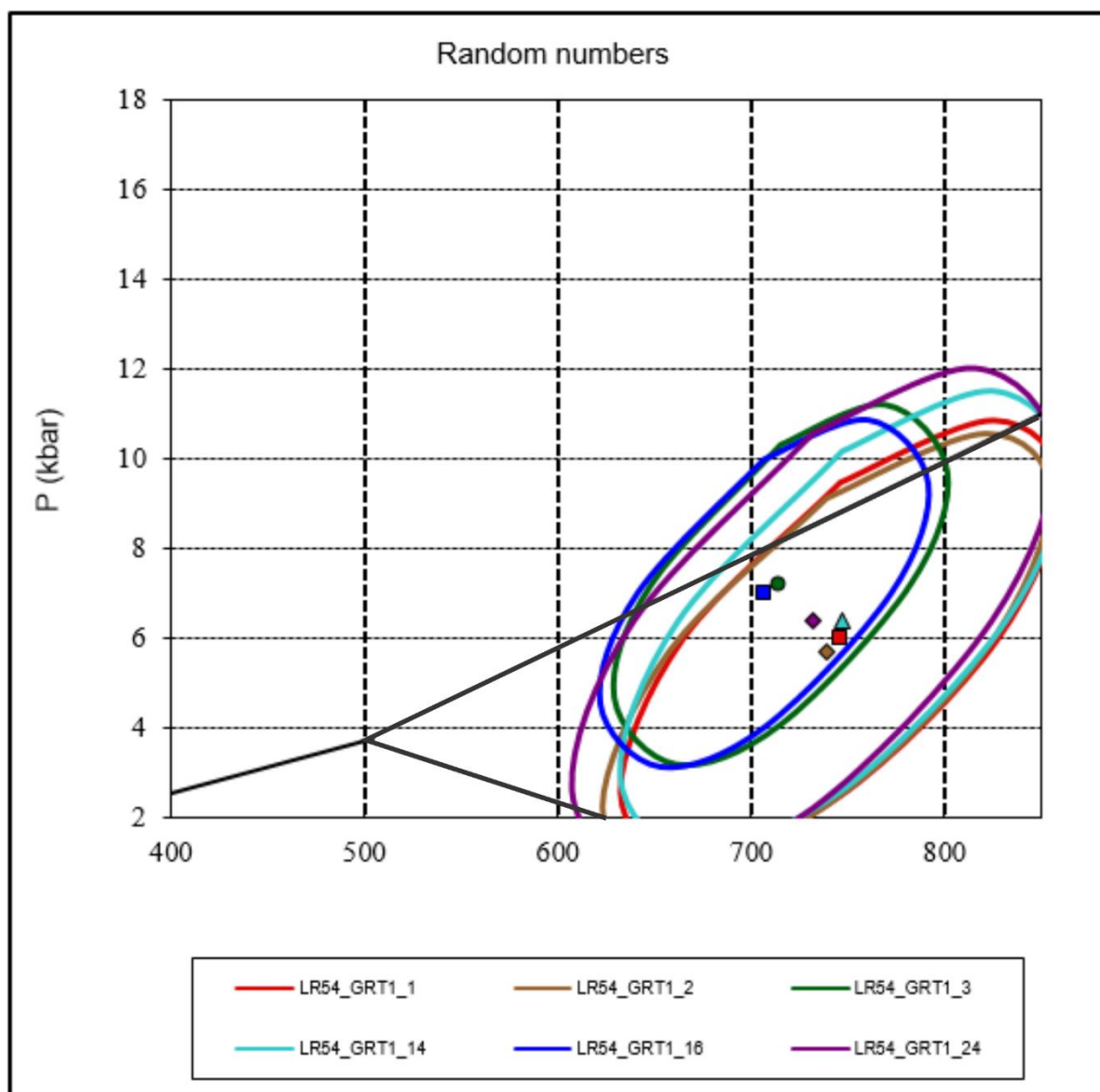
Series	Sample	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
1	LR09_GRT1_1	725	67	7,3	3,0	0,632
2	LR09_GRT1_2	725	67	7,3	3,1	0,627
3	LR09_GRT1_3	747	92	7,5	4,1	0,650
4	LR09_GRT1_4	715	70	7,2	3,2	0,626
5	LR09_GRT1_5	707	73	7,2	3,4	0,626
6	LR09_GRT1_11	707	68	7,0	3,1	0,634
7	LR09_GRT1_12	715	69	7,2	3,2	0,628
8	LR09_GRT1_13	719	68	7,3	3,1	0,628

Grafico 2. Condições de P e T para cristal de granada (GRT2) da amostra LR-09 calculados pelo THERMOCALC.



Sample	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
LR09_GRT2_1	717	67	7,2	3,1	0,631
LR09_GRT2_2	715	68	7,2	3,1	0,629
LR09_GRT2_3	715	69	7,2	3,2	0,628
LR09_GRT2_6	705	68	7,0	3,1	0,633
LR09_GRT2_7	710	68	7,1	3,1	0,633
LR09_GRT2_11	720	67	7,1	3,0	0,634

Grafico 3. Condições de P e T para cristal de granada (GRT1) para amostra LR-54 calculados pelo THERMOCALC.



Series	Sample	avT	sd(T)	avP	sd(P)	corr
1	LR54_GRT1_1	746	91	6	3,9	0,698
2	LR54_GRT1_2	739	93	5,7	3,9	0,71
3	LR54_GRT1_3	715	69	7,2	3,2	0,628
4	LR54_GRT1_14	747	92	6,4	4,1	0,675
5	LR54_GRT1_15	746	90	6,1	3,9	0,689
6	LR54_GRT1_16	707	68	7	3,1	0,634
7	LR54_GRT1_17	745	91	5,9	3,9	0,699
8	LR54_GRT1_18	749	91	6,3	4	0,678
9	LR54_GRT1_23	749	91	6,3	4	0,678
10	LR54_GRT1_24	732	100	6,4	4,5	0,67