

Fabiano Richard Leite Faulstich

**ESTUDO DE MINERAIS PESADOS DOS PEGMATITOS DA
PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DE SÃO JOÃO DEL REI, MINAS GERAIS**

Tese de Doutorado (Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2016



UFRJ

Fabiano Richard Leite Faulstich

**ESTUDO DE MINERAIS PESADOS DOS PEGMATITOS DA
PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DE SÃO JOÃO DEL REI, MINAS GERAIS**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Doutor em Ciências (Geologia).

Área de concentração:

Geologia Regional e Econômica

Orientadores:

Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila - UFRJ

Dr. Reiner Neumann - CETEM

Rio de Janeiro
Novembro/2016

Fabiano Richard Leite Faulstich

**Estudo de Minerais Pesados dos Pegmatitos da
Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas
Gerais/** Fabiano Richard Leite Faulstich - Rio de Janeiro:
UFRJ / IGeo, 2016.

xviii, 200 f. : il., XI anexos; 29,7cm

Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-graduação em Geologia, 2016.

Orientadores: Ciro Alexandre Ávila, Reiner Neumann

1. Geologia. 2. Geologia Regional e Econômica – Tese
de Doutorado. I. Ciro Alexandre Ávila. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Estudo de
Minerais Pesados dos Pegmatitos da Província
Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais.

Fabiano Richard Leite Faulstich

**ESTUDO DE MINERAIS PESADOS DOS PEGMATITOS DA PROVÍNCIA
PEGMATÍTICA DE SÃO JOÃO DEL REI, MINAS GERAIS**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Doutor em Ciências (Geologia).

Área de concentração:
Geologia Regional e Econômica

Orientadores:
Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila – UFRJ
Dr. Reiner Neumann – CETEM

Aprovada em: / /

Por:

Presidente: Profa. Dra. Silvia Regina de Medeiros (PPGL/UFRJ)

Prof. Dr. Everton Marques Bongioio (PPGL/UFRJ)

Prof. Dr. Ronaldo Melo Pereira (UERJ)

Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano (UFOP)

Prof. Dr. Daniel Atencio (USP)

Prof. Dr. Julio Cezar Mendes (PPGL/UFRJ)
membro suplente

UFRJ
Rio de Janeiro
2016

Dedicatória

Três pessoas que contribuíram muito para que eu galgasse mais esse degrau em minha vida pessoal e profissional:

À minha mãe, Prof^a Dr^a Enilde Leite de Jesus Faulstich, pelo exemplo de profissionalismo e de dedicação à pesquisa e ao ensino;

Ao meu saudoso orientador e amigo Marcel Auguste Dardenne, por ter me mostrado como a geologia pode ser apaixonante;

À minha tia Alaydes Leite Pereira (e sua eterna alegria) por ter sido meu ponto de apoio nas diversas vezes que precisei vir ao Rio de Janeiro tratar de assuntos da tese.

Agradecimentos

Ao meu orientador, amigo e agora colega de trabalho, Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila pela paciência, ensinamentos e discussões pertinentes.

Ao meu coorientador e também amigo, Dr. Reiner Neumann, pelos comentários, discussões, sugestões, correções e traduções nesses últimos anos.

À equipe do CETEM, em especial ao Dr. Arnaldo Alcover Neto, coordenador da COAM, pelo acesso as dependências dos laboratórios de caracterização tecnológica e também aos técnicos Josimar Firmino de Lima e Edivaldo da Conceição Silva (Nininho) pelo apoio e confecção das excelentes seções minerais de monocamada.

À pesquisadora em geociências da CPRM, Dr^a Joseneusa Brilhante Rodrigues pela grande ajuda na edição e interpretação dos dados geocronológicos.

Às instituições que possibilitaram este estudo: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro durante o período da tese.

Por fim meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me apoiaram e/ou ajudaram durante estes últimos quatro anos e meio e que não foram citados aqui nominalmente.

Resumo

FAULSTICH, Fabiano Richard Leite. **Estudo de Minerais Pesados dos Pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais**. Rio de Janeiro, 2016, 200 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

A Província Pegmatítica de São João del Rei ocupa uma área de aproximadamente 2500 km² na porção sul do Estado de Minas Gerais e é caracterizada pela presença de um enxame de corpos pegmatitos mineralizados em Sn-Ta-Nb-Li, que cortam tanto as rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, quanto diversos corpos plutônicos paleoproterozoicos. O metagranitoide Ritápolis, com idade de cristalização de 2121 ± 7 Ma, marca o último pulso magmático da região. Foram estudados doze corpos pegmatíticos dessa província, sendo três intrusivos no metadiorito Brumado, três no metagranitoide Ritápolis, dois nos filitos e dois nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e outros dois no ortogneisse Cassiterita. O concentrado de minerais pesados de cada um desses corpos foi caracterizado a partir do estudo por estereomicroscopia ótica, microsonda Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e microsonda eletrônica (ME/WDS). Em termos gerais, a área de estudo encontra-se intensamente intemperizada, ocasionando a alteração dos pegmatitos, a formação de caulinita e a liberação parcial ou total dos minerais acessórios principais, que correspondem a columbita-tantalita, granada, ilmenita, magnetita e zircão, enquanto cassiterita, gahnita, microlita, monazita e xenotímio ocorrem na grande maioria dos corpos, porém em proporções variadas. Andaluzita foi encontrada apenas nos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, enquanto monazita e xenotímio apresentam uma concentração mais elevada nos corpos pegmatíticos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Já os corpos intrusivos no ortogneisse Cassiterita tiveram como maior característica a ausência de cassiterita e de minerais do grupo da columbita-euxenita. Os corpos estudados foram classificados como pertencentes à família LCT (lítio, cério, tântalo), por apresentarem conteúdo de Ta > Nb e pela presença de muscovita, turmalina, granada rica em spessartina, gahnita, andaluzita e fosfatos de ETR (monazita e xenotímio). As idades U/Pb LA-ICPMS obtidas em grãos de zircão, em conjunto com a mineralogia encontrada nos corpos, sugerem a presença de dois grupos de pegmatitos: o primeiro, não mineralizado, ocorre intrusivo no ortogneisse Cassiterita e é mais antigo, apresentando idade de 2489 ± 10 Ma; o segundo, mineralizado em Sn-Ta-Nb, é intrusivo no metadiorito Brumado, no metagranitoide Ritápolis e nos filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e apresenta idades entre 2129 ± 33 Ma e 2121 ± 9 Ma. Essas idades permitem a correlação do segundo grupo de pegmatitos ao metagranitoide Ritápolis, sendo que o enriquecimento desses corpos em elementos de interesse econômico (Sn-Nb-Ta) parece estar associado não somente à fonte dos corpos pegmatíticos, mas também ao seu fracionamento e como resultado da interação com as rochas encaixantes.

Palavras-chave: pegmatitos, minerais pesados, Província Pegmatítica de São João del Rei

Abstract

FAULSTICH, Fabiano Richard Leite. **Estudo de Minerais Pesados dos Pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais**. [Study of Heavy Minerals from Pegmatites of the São João del Rei Pegmatitic Province, Minas Gerais] Rio de Janeiro, 2016, 200 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The São João del Rei Pegmatitic Province occupies an area of approximately 2500 km² in the southern portion of the Minas Gerais state and it is characterized by the presence of a pegmatite swarm mineralized in Sn-Ta-Nb-Li. The pegmatites crosscut the rocks of the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence, and several paleoproterozoic plutonic bodies, among them the Ritápolis metagranitoid, whose crystallization age of 2121 ± 7 Ma marks the last magmatic pulse in this region. Twelve pegmatitic bodies from this province were studied, three intrusive in the Brumado metadiorite, three in the Ritápolis metagranitoid, two in the phyllites and two in the amphibolites from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence, and another two intrusive in the Cassiterita orthogneiss. The heavy mineral concentrate of each pegmatitic body was characterized by optical stereomicroscopy, Raman microprobe, scanning electron microscopy (SEM/EDS) and electron microprobe (EM/WDS). The studied area is intensely weathered, causing the pegmatite's alteration, the formation of kaolinite and the partial or total release of the main accessory minerals, corresponding to columbite-tantalite, garnet, Ilmenite, magnetite and zircon, whereas cassiterite, gahnite, microlite, monazite and xenotime occur in most of the bodies, in varying proportions. Andalusite was found only in the pegmatites that are intrusive into the phyllites from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence, while monazite and xenotime present a higher concentration in the pegmatitic bodies intrusive into amphibolites from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence. On the other hand, the pegmatites intrusive in the Cassiterita orthogneiss are characterised by the absence of cassiterite and columbite-euxenite group minerals. The studied pegmatites were classified as belonging to the LCT family (lithium, caesium, tantalum), due to the $Ta > Nb$ concentration and to the presence of muscovite, tourmaline, spessartine-rich garnet, gahnite, andalusite and REE phosphates (monazite and xenotime). The U/Pb LA-ICPMS ages, obtained from zircon grains, coupled to the bodies' mineralogy, suggest two groups of pegmatites: the first, not mineralized, intrudes the Cassiterita orthogneiss and is older, 2489 ± 10 Ma. The second one, mineralized in Sn-Ta-Nb, intrudes the Brumado metadiorite, the Ritápolis metagranitoid and the phyllites and amphibolites from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence and presents was dated between 2129 ± 33 Ma and 2121 ± 9 Ma. The correlation of the second group of pegmatites to the Ritápolis metagranitoid, and the enrichment of these bodies in economic elements (Sn-Nb-Ta) seems to be associated not only to the source of the pegmatitic bodies, but also to its fractionation, and as a result of the interaction with their host rocks.

Key words: pegmatites, heavy minerals, São João del Rei Pegmatitic Province

Lista de figuras

- Figura 1 – Mapa geológico esquemático da borda meridional do cráton São Francisco (CSF) mostrando as principais unidades que compõe o Cinturão Mineiro (Barbosa *et al.*, 2015 e referências citadas). Mapa de localização mostra o CSF - cinza escuro: rochas do embasamento; branco, cinza claro e pontilhado: coberturas (Alkmim & Martins Neto, 2012). 2
- Figura 2 – Mapa geológico esquemático da região entre as cidades de Nazareno e Coronel Xavier Chaves mostrando a distribuição dos principais corpos pegmatíticos explotados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Modificado de Ávila *et al.* (2003). 3
- Figura 3 – Localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais (retângulo vermelho) e principais vias de acesso. 6
- Figura 4 – Fluxograma resumido das etapas de campo e de laboratório da presente tese para coleta, tratamento e caracterização dos concentrados de minerais pesados dos saprólitos dos pegmatitos estudados. 8
- Figura 5 – Processo de amostragem e concentração em campo das amostras coletadas. A) amostragem de corpo pegmatítico intemperizado (~20 kg), B) material básico para amostragem e concentração em campo, C) deslamagem em leito ativo, D) peneiramento em malha de 2 mm, E) concentração em bateia, F) produto final com os minerais pesados. 11
- Figura 6 – Dois exemplos de espectro Raman obtidos em grãos de apatita e de calcita, com os diferentes grupos vibracionais identificados. Definição das bandas por Aza *et al.* (1997) e Rividi *et al.* (2010), respectivamente. 14
- Figura 7 – Espectro EDS entre 0 e 20 keV de um grão de tantalita onde é possível observar os elementos identificados a partir das suas raia de energia. A imagem no canto superior direito representa o grão analisado e foi obtida através de elétrons retroespalhados. 17
- Figura 8 – Campos P-T esquemáticos das rochas hospedeiras em que ocorrem os pegmatitos da classe abissal (AB), muscovita (MS), muscovita – elementos raros (MSER), elementos raros (ER) e miarolítica (MI). As setas pretas representam tendências regionais de fracionamento dos pegmatitos relativo ao grau metamórfico das rochas hospedeiras (segundo Černý & Ercit, 2005). 25
- Figura 9 – Mapa com a localização geográfica das províncias pegmatíticas do sudeste brasileiro com destaque para a Província Pegmatítica de São João del Rei no estado de Minas Gerais. Subdivisões da Província Pegmatítica Oriental: I - Campo de Itinga - Araçuaí; II - Campo de Governador Valadares (modificado de Pereira *et al.*, 2008a). 33
- Figura 10 – Mapa geológico da borda meridional do cráton São Francisco enfocando o Cinturão Mineiro (Ávila *et al.*, 2014). 34
- Figura 11 – Mapa geológico simplificado do cráton São Francisco (modificado de Alkmim *et al.*, 1993). 35
- Figura 12 – A) Componentes do embasamento do cráton São Francisco (adaptado de Alkmim, 2004); B) Arcabouço paleoproterozoico do Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá; C) Arcabouço paleoproterozoico do Cinturão Mineiro (figuras 12b e 12c adaptadas de Alkmim & Noce, 2006). 36
- Figura 13 – Mapa litológico simplificado da área de estudo compilado de diversas fontes. Pontos de ocorrência de pegmatitos: FA – esta tese; LE – Calegário (inédito); RP – Rocha & Fiuza (2007); SA – Stohler *et al.* (2008) e Soares *et al.* (2009); Outros – folhas São João del Rei e Lavras da CODEMIG, Francesconi (1972) e Francesconi *et al.* (1975). 40
- Figura 14 – Mapa litológico simplificado da área de estudo com ênfase na localização dos corpos pegmatíticos estudados. As referências utilizadas na confecção deste mapa são as mesmas apresentadas na figura anterior. 55
- Figura 15 – Relações de campo observadas entre os pegmatitos e as rochas encaixantes encontradas no ponto FA-01. A) Dique pegmatítico intrudindo rochas metassedimentares da sequência Rio das Mortes. B) Xenólitos das rochas metassedimentares (x) nos diques. C) Diferentes fácies do metagranitoide Ritápolis. D) Dique pegmatítico cortando o metagranitoide. 56

- Figura 16 – Corpos pegmatíticos amostrados. A) Pegmatito do ponto FA-02 intrusivo no metadiorito Brumado. B) Detalhe do pegmatito amostrado no ponto FA-03 com quartzo e muscovita. C) Metadiorito Brumado cortado por diversos veios do metagranitoide Ritápolis formando xenólitos angulosos. D) Metadiorito cortado por pegmatito espesso (imagens C e D, ponto FA-04). 58
- Figura 17 – A) Pegmatito amostrado em corte de estrada no ponto FA-05. Corpo intrusivo no metagranitoide Ritápolis. B) Saprólito do pegmatito amostrado no ponto FA-07. C) Detalhe da textura gráfica (em amostra de mão) encontrada no ponto FA-07. 59
- Figura 18 – A) Pegmatito intrusivo na unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, ponto FA-09. B) Quartzitos que compõem a unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, próximo ao ponto FA-09. C) Pegmatito intrusivo em filitos da unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes amostrado no ponto FA-10. D) Detalhe das placas centimétricas de muscovita encontrados no ponto FA-10. E) Ponto FA-12: pegmatito intrusivo em anfibólitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes onde é possível observar a presença de óxi-hidróxidos de Mn (manchas escuras). 61
- Figura 19 – Pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita amostrados nos pontos FA-13 (A) e FA-14 (B). 62
- Figura 20 – Distribuição normalizada das principais fases minerais encontradas nos pegmatitos estudados. 63
- Figura 21 – Exemplos de grãos de cassiterita dos pegmatitos estudados. Na amostra FA-03 é possível ver um detalhe dos grãos menores de cassiterita que apresentam cor vermelha e são translúcidos em contraste com os grãos maiores que, em geral, apresentam cor preta. A seta azul indica cristais tabulares tetragonais característicos da cassiterita. Grão marcado com círculo vermelho mostra a associação de cassiterita com uma massa amarelada. 76
- Figura 22 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de cassiterita estudados. Em (a) e (b) grãos de cassiterita límpidos e sem inclusões; em (c) grão de cassiterita com diversas inclusões de tantalita-(Fe); em (d) grão de cassiterita intercrescido com columbita-(Mn), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn) (em diferentes proporções) e com material de alteração nas fraturas (plumbomicrolita); em (e) e (f) presença de inclusões subarredondadas de silicatos, além dos minerais de Nb/Ta indicados. 78
- Figura 23 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos dos materiais de alteração encontrados nos grãos de cassiterita. Em (a), caulinita nas bordas e plumbomicrolita (fase mais clara) com tantalita-(Mn) (fase mais escura) preenchendo fraturas do grão; em (b), fraturas no grão de cassiterita com deposição de material rico em Sn com Nb, Ta, Fe, Al e Si (mineral não identificado indicado pelas setas); em (c) e (d), plumbomicrolita em fratura no grão de cassiterita. 79
- Figura 24 – (a) Diagrama ternário $\text{SnO}_2 - (\text{Ta}_2\text{O}_5 + \text{Nb}_2\text{O}_5) - (\text{FeO} + \text{MnO})$ com a distribuição das análises de microsonda eletrônica/WDS de diversos grãos de cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b - e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados pelo tipo de rocha encaixante do pegmatito. Linha tracejada corresponde à substituição $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta} + \text{Nb})^{5+} + (\text{Fe} + \text{Mn})^{2+}$ (Möller *et al.* 1988). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar. 82
- Figura 25 – (a) Diagrama ternário $2\text{Ta}_2\text{O}_5 - 2\text{Nb}_2\text{O}_5 - (\text{FeO} + \text{MnO})$ com a distribuição das análises de microsonda eletrônica/WDS da cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b - e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados por encaixante do pegmatito. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar; X_1 = tantalita - $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$; X_2 = columbita/tantalita - $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$; X_3 = columbita - $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$. 84
- Figura 26 – Mecanismos de substituição do Sn na cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Em (a), substituição $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta} + \text{Nb})^{5+} + (\text{Fe} + \text{Mn})^{2+}$ (Möller *et al.* 1988). Em (b), substituição do Sn por todos os outros cátions presentes ($\sum \text{cátions} - \text{Sn}$). 86

Figura 27 – Razão $(Ta+Nb)/(Fe+Mn)$ dos grãos de cassiterita dos diferentes corpos pegmatíticos estudados na Província Pegmatítica de São João del Rei. A razão = 2 (linha tracejada) indica uma substituição do tipo $Sn^{4+} \leftrightarrow R^{2+} + 2R^{5+}$, ou seja, presença de microinclusões e/ou exsolução de columbita/tantalita na estrutura da cassiterita (Černý <i>et al.</i> 1985; Neiva, 1996).	87
Figura 28 – Diagramas $Ta/(Ta+Nb) \times Mn/(Mn+Fe)$ com as análises de grãos de cassiterita (a) e de inclusões de columbita/tantalita na cassiterita (b) da Província Pegmatítica de São João del Rei. SMVS – sequência metavulcano-sedimentar. Tan – tantalita. Col – columbita.	87
Figura 29 – Exemplos de grãos de gahnita dos pegmatitos estudados com diversas tonalidades de verde. Grãos marcados com um círculo vermelho são octaedros, mas em geral a gahnita ocorre como fragmentos anédricos de cristais.	89
Figura 30 – Imagens de elétrons retroespalhados exemplificando a homogeneidade dos grãos de gahnita e exemplos das inclusões minerais encontradas: esfalerita (Sp), muscovita (Ms), biotita (Bt), albita (Ab) e bismita (Bi). Círculos vermelhos indicam o ponto de análise por MEV/EDS. Destaque para a presença de escassas inclusões nos grãos das imagens A-E e ausência destas no grão da imagem F.	90
Figura 31 – Substituições em <i>apfu</i> observadas nos sítios A e B da gahnita estudada. Em (a) substituição no sítio A entre $(Zn+Mn) \leftrightarrow (Fe^{2+}+Mg)$. Em (b) substituição $Al \leftrightarrow Fe^{3+}$ no sítio B. Dados obtidos por microsonda eletrônica/WDS. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.	91
Figura 32 – Diagrama ternário mostrando a composição dos minerais do grupo do espinélio estudados em termos dos membros finais gahnita (Ghn), espinélio (Spl) e hercinita (Hc) (em mol. %). SMVS: sequência metavulcano-sedimentar.	92
Figura 33 – Diagramas binários em <i>apfu</i> (32 oxigênios) representando as composições de gahnita dos pegmatitos estudados. SMVS: sequência metavulcano-sedimentar.	95
Figura 34 – Espectros Raman de 37 grãos de gahnita de diferentes pegmatitos da região de Ritópolis, com indicação das bandas observadas. Número em parênteses se refere à posição média em cm^{-1} das bandas. Bandas não assinaladas são o resultado da interação do laser com a resina epóxi utilizada na montagem da seção polida.	97
Figura 35 – Exemplos de grãos de ilmenita dos pegmatitos estudados onde é possível de se observar a variação de cores entre o preto e o cinza grafite assim como seu habito tabular achatado. O brilho metálico característico pode ser observado nas amostras FA-07 e FA-12, mas fica mascarado quando a alteração na superfície do grão é mais intensa (FA-05 e FA13). A presença de leucoxênio pode ser observada nos grãos marcados com um círculo vermelho.	98
Figura 36 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. Em (a) e (b) grãos de ilmenita límpidos, sem inclusões ou alteração. Em (c) e (d) exemplos dos principais tipos de inclusões encontradas. Em (e) e (f) presença de material de alteração (óxidos de Ti com Fe) nas bordas dos grãos de ilmenita, além das inclusões minerais.	100
Figura 37 – Imagem de elétrons retroespalhados com exemplos das inclusões interpretadas como processo de exsolução na ilmenita. Em (a) e (b) inclusões subarredondadas de óxido de Fe orientadas em um grão de ilmenita. Nas outras imagens, inclusões tabulares orientadas de óxido de Fe (c), columbita (d, e) e cromita (f) também em grãos de ilmenita.	101
Figura 38 – Imagem de elétrons retroespalhados com diferentes exemplos de alterações encontradas nos grãos de ilmenita estudados. Em (a), início de alteração ao longo de fraturas em um grão; em (b), detalhe de uma fratura radial com início de alteração em suas bordas. Em (c) e (d), exemplo de alteração avançada com a formação de óxido de Fe como produto final.	102
Figura 39 – Gráficos de substituição no sítio A dos grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. (a) Gráfico $Mn \times Fe^{2+}$ (<i>apfu</i>) mostrando a correlação da substituição entre os cátions divalentes Fe e Mn. (b) Gráfico $Mg \times Fe^{2+}$ (<i>apfu</i>) das mesmas amostras caracterizando a falta de correlação entre os cátions Mg e Fe. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.	105

Figura 40 – Gráficos de substituição no sítio *B* dos grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. (a) Gráfico $\text{Fe}^{3+} + \text{Nb}^{5+} \times 2\text{Ti}^{4+}$ (em *apfu*) mostrando a substituição apresentada na equação (1). (b) Gráfico $2\text{Nb}^{5+} \times (\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})^{2+} + 2\text{Ti}^{4+}$ (em *apfu*) mostrando a ocorrência da substituição apresentada na equação (2). Os gráficos menores inseridos apresentam os mesmos dados dos gráficos maiores, porém são realçados os dados que se alinham (pontos pretos) indicando a ocorrência da substituição de cada equação apresentada. Os pontos em vermelho indicam a não concordância com a substituição apresentada pelas equações sugeridas ou teores muito baixos dos elementos de interesse Nb e Fe^{3+} (<0,01 *apfu*). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

106

Figura 41 – Gráficos de ocupação dos sítios *A* e *B* (em *apfu* para 6 oxigênios) na estrutura da ilmenita (ABO_3) presente nos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. O sítio *A* pode ser ocupado por Fe^{2+} , Mn^{2+} e/ou Mg^{2+} e o sítio *B* por Ti^{4+} , Fe^{3+} , Nb^{5+} , V^{3+} e/ou Cr^{3+} . Em (a), todos os dados obtidos em um único gráfico. Gráficos (b) a (f) dados separados segundo a rocha encaixante do pegmatito. Os pontos cinza representam as amostras dos outros corpos para comparação. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

107

Figura 42 – Gráficos de ocupação dos sítios *A* e *B* (em *apfu* para 6 oxigênios) na estrutura da ilmenita. Em (a), todos os resultados plotados em um único gráfico (idem à figura 41a). Em (b), mesmo gráfico identificando as amostras pela presença ou não de Fe^{3+} em sua estrutura, onde é possível observar as duas tendências presentes. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

108

Figura 43 – (a) Diagrama ternário dos membros finais ilmenita (FeTiO_3) – pirofanita (MnTiO_3) – hematita (Fe_2O_3) dos grãos de ilmenita dos pegmatitos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b-e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados por encaixante do pegmatito. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

109

Figura 44 – Exemplos de grãos de granada dos pegmatitos estudados com diferentes tonalidades de rosa (FA-02 a FA-12) e tons de vermelho/laranja (FA-13 e FA-14). A presença da capa de oxidação pode ser observada em grãos escuros indicados por uma seta azul. Cristais podem apresentar formas variadas, sendo comum encontrar grãos cúbicos ou dodecaédricos (círculo vermelho).

111

Figura 45 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de granada estudados e as suas inclusões minerais e alterações mais comuns. Qz – quartzo, Kln – caulinita, Zrn – zircão. Diferença no tom de cinza dos grãos de granada nas diferentes amostras é decorrente do contraste e brilho utilizados no momento da aquisição da imagem.

113

Figura 46 – Imagens de elétrons retroespalhados dos grãos de granada rosa (FA-08A e FA-10A) e incolor (FA-08B e FA-10B). Em (e) grão com leve zonamento composicional e em (f) detalhe de grão com diversas inclusões de quartzo (Qz).

114

Figura 47 – Imagem de elétrons retroespalhados (Ch 1) e imagens de mapeamento químico dos elementos Si, Al, Ca, Mn e Fe de um grão de granada incolor da amostra FA-08B. No mapa do cálcio é possível observar a concentração irregular deste elemento no grão analisado.

116

Figura 48 – Composição química em óxidos (valores médios) de diversos grãos de granada proveniente dos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Abaixo das colunas é indicada a litologia principal na qual os pegmatitos estão encaixados. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

117

Figura 49 – Distribuição dos pares de elementos Mn+Ca x Mg+Fe (em *apfu*) mostrando uma alta correlação da substituição acoplada na composição química dos diversos grãos de granada dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João Del Rei.

118

Figura 50 – (A) Diagrama tetraédrico com os membros finais grossulária-spessartina-almandina-piropo com a distribuição das análises dos diversos grãos de granada dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. (B) Diagrama ternário com os membros finais almandina-grossulária-spessartina. Símbolos preenchidos na figura (B) correspondem às amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

120

Figura 51 – (a) Diagrama Fe/Mn x Mn (% em peso) de diversos grãos de granada provenientes dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Símbolos preenchidos representam as amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes). (b) Mesmo diagrama para comparação com dados publicados de granada magmática proveniente de pegmatitos graníticos (Anderson, 1984; Baldwin & Von Knorring, 1983; Kleck & Foord, 1999; Müller *et al.* 2012; Withworth & Feely, 1994) e outras rochas plutônicas félsicas (Harrison, 1988; Miller & Stoddard, 1981; Vennum & Meyer, 1979). (c) Mesmos dados presentes em (b), separados pelos grupos de rochas. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

123

Figura 52 – Diagrama (MnO + CaO) x (FeO + MgO) (% em peso) de diversos grãos de granada provenientes dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Símbolos preenchidos representam as amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes). O gráfico menor mostra o mesmo diagrama para comparação com dados publicados de granada magmática proveniente de pegmatitos graníticos (Anderson, 1984; Baldwin & Von Knorring, 1983; Kleck & Foord, 1999; Müller *et al.* 2012; Withworth & Feely, 1994) e outras rochas plutônicas félsicas (Harrison, 1988; Miller & Stoddard, 1981; Vennum & Meyer, 1979).

124

Figura 53 – Diagrama ternário X_{Mg} - X_{Fe+Mn} - X_{Ca} para estudos de proveniência apresentado por Mange & Morton (2007). Granada tipo A proveniente de rochas metassedimentares de alto grau (granulíticas) ou charnoquitos; tipo B, associado a rochas metassedimentares anfibolíticas; tipo C, provenientes de rochas metabásicas de alto grau; e tipo D, provenientes de rochas metassomáticas. Subtipos são discutidos no texto.

125

Figura 54 – Espectros Raman característicos dos membros finais spessartina, piropo, almandina, grossulária e andradita segundo Hofmeister & Chopelas (1991) e da uvarovita segundo Kolesov & Geiger (1998). As regiões com os principais modos vibracionais (str = estiramento, bend = dobramento, R = rotação, T = translação) são apresentados para cada membro final.

126

Figura 55 – (a) Espectros Raman característicos das amostras de granada rosa. As principais bandas observadas encontram-se nas regiões em torno de $300-400\text{ cm}^{-1}$, $450-660\text{ cm}^{-1}$ e $800-1060\text{ cm}^{-1}$. (b) Detalhe da região espectral entre $300-400\text{ cm}^{-1}$ mostrando a variação na posição da banda associada à rotação do tetraedro de silício. (c) Detalhe da região espectral entre $870-950\text{ cm}^{-1}$ mostrando o deslocamento da banda associada ao modo de estiramento da ligação Si-O. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

128

Figura 56 – Espectros Raman característicos entre 100 e 1200 cm^{-1} das amostras de granada incolor FA-08B e FA-10B em comparação com as amostras de granada rosa (FA-08A e FA-10A). É possível observar o deslocamento das bandas na região de vibração $(\text{Si-O})_{\text{str}}$ e $\text{R}(\text{SiO}_4)^{4-}$. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes.

129

Figura 57 – Exemplos de grãos de xenotímio dos pegmatitos estudados onde é possível observar as variações de cores entre bege, amarelo e cinza. Grãos marcados com um círculo vermelho indicam a presença de seção basal quadrada característica deste mineral e a seta azul indica cristais com intercrescimento com zircão.

131

Figura 58 – Exemplos de grãos de xenotímio dos pegmatitos estudados onde é possível observar as diversas microinclusões de minerais de Th e/ou U (pontos claros nas imagens a-d), apatita (b), associação com zircão (c) e monazita (d).

132

Figura 59 – Exemplos de grãos de xenotímio com zonamento químico das amostras FA-03 e FA-12. a) Grão de xenotímio da amostra FA-03 com indicação das inclusões presentes. b) Mesma imagem anterior com contraste aumentado de modo a realçar o zonamento químico presente. c) Perfil de análises EDS da região indicada em a e b (explicação no texto). d) Grão de xenotímio da amostra FA-12, com contraste aumentado de modo a realçar o zonamento químico oscilatório presente. No detalhe mesmo grão com contraste original. Pontos claros são inclusões de minerais de U/Th.

133

- Figura 60 – Espectro de EDS de um grão de xenotímio na região de 2,5 a 8,0 keV (região dos picos de energia $L\alpha$ dos elementos terras raras Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) onde é possível observar a aplicação do método de deconvolução para confirmação dos elementos presentes. Em (A) espectro EDS original (correção do background já aplicada) com as raia de energia dos elementos terras raras indicadas; (B) e (C) espectro com a identificação dos elementos presentes, sem Tb e com Tb selecionado, respectivamente; (D) espectro EDS original e área deconvoluída (em cinza) mostrando uma boa relação entre o espectro obtido e o calculado onde foi confirmada a presença de Tb na análise. 134
- Figura 61 – Distribuição em % em peso dos elementos terras raras leves (ETRL) e pesados (ETRP) nos grãos de xenotímio da Província Pegmatítica de São João del Rei. Dados obtidos através de análises semiquantitativas de MEV/EDS. As análises estão agrupadas segundo a rocha encaixante do pegmatito. 137
- Figura 62 – Diagrama ternário dos membros finais YPO_4 - $(La-Gd)PO_4$ - $(Tb-Lu)PO_4$ referente aos grãos de xenotímio dos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. SMVS – sequência metavulcano-sedimentar. 139
- Figura 63 – Concentrações dos elementos terras raras (Nd-Lu) e Y dos grãos de xenotímio dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei intrusivos em diferentes rochas encaixantes. Normalização em relação ao condrito CI de Evensen *et al.* (1978) e Taylor & McClennan (1985). 140
- Figura 64 – Exemplos de grãos de columbita/tantalita provenientes dos pegmatitos estudados. Hábito tabular com terminação em ponta de flecha é comum de ser encontrado (círculo vermelho). Coloração preta e brilho metálico intenso podem ser melhor observados nas amostras FA-07 e FA-11. 143
- Figura 65 – Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por microscopia eletrônica de varredura exemplificando os diferentes grãos de columbita/tantalita provenientes dos pegmatitos estudados. Nas imagens é possível observar o intercrescimento de diferentes fases de niobo-tantalatos, assim como material secundário preenchendo fraturas. 144
- Figura 66 – Exemplos de grãos de microlita encontrados nos pegmatitos estudados. Os grãos são geralmente anédricos e apresentam cores entre o amarelo e vermelho. O brilho resinoso pode ser observado na amostra FA-12. 145
- Figura 67 – Exemplos de grãos de zircão dos pegmatitos estudados. Em detalhe nas amostras FA-05 e FA-14, assim como nas amostras FA-07 (segunda imagem) e FA-11 é possível observar cristais de zircão transparentes (não metamicticos) que foram separados para estudos de geocronologia. Nas fotomicrografias é possível observar as diferentes cores apresentadas pelo zircão assim como seu hábito prismático característico alongado. 147
- Figura 68 – Exemplos de grãos de monazita dos pegmatitos estudados. Grãos com capa de alteração esbranquiçada são a maioria nas amostras FA-03, FA-05 e FA-13, mas podem ser encontrados em outras amostras também (setas azuis). O hábito tabular achado e a cor amarela característica podem ser observados nos grãos marcados com um círculo vermelho. 148
- Figura 69 – Exemplo de grãos de clinozoisita e de epidoto encontrados nos pegmatitos estudados. A clinozoisita é incolor, enquanto o epidoto apresenta uma coloração amarelo esverdeada característica. A linha tracejada nas amostras FA-05 e FA-12 separa grãos de epidoto (lado esquerdo) de grãos de clinozoisita (lado direito). Fotomicrografia da amostra FA-02 é composta somente por clinozoisita, enquanto a da amostra FA-13 é composta apenas por epidoto. 150
- Figura 70 – Fotomicrografia de anatásio e brookita encontrados na amostra FA-07. A principal diferença entre os dois minerais sob estereomicroscopia é a cor, apresentado-se azul no anatásio e marrom esverdeada na brookita. A distinção das duas fases foi realizada através de microsonda Raman. 151
- Figura 71 – Exemplos de grãos de óxido/hidróxido de Mn e de limonita retirados da amostra FA-12. Os grãos de óxi-hidroxidos de Mn apresentam uma cor característica cinza grafite, hábito botrioidal e forma arredondada na maioria dos grãos. A limonita pode apresentar hábito cúbico ou fragmentos formando arestas de cubo (provável pseudomorfo de pirita). 153

- Figura 72 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado (amostra FA-03). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum. 156
- Figura 73 – Diagrama concórdia da amostra FA-03 referente a um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado. Em (A) diagrama concórdia com todos os dados obtidos e em (B) um detalhe da região onde a idade foi calculada. Apenas as elipses pretas foram utilizadas no cálculo. Os dados marcados em azul e vermelho não foram utilizados no cálculo de idade (explicação no texto). Destaca-se a presença de um ponto concordante, porém isolado, em torno de 3050 Ma indicando tratar-se de um grão herdado (elipse verde em A). 157
- Figura 74 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (amostra FA-08). Círculos vermelhos indicam o ponto analisado em cada grão. 159
- Figura 75 – Diagrama concórdia da amostra FA-08 referente a um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis. Em (A) diagrama com todos os dados obtidos plotados. Observar a presença de duas elipses em verde que representam os grãos herdados. Em (B) diagrama concórdia dos dados utilizados para o cálculo de idade (elipses pretas). 160
- Figura 76 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo na faixa metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostra FA-12). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum. 162
- Figura 77 – Em (A) diagrama concórdia com todos os dados obtidos plotados. Elipses em verde representam grãos herdados. Em (B) e (C) as duas idades calculadas representando, respectivamente, a idade de cristalização dos pegmatitos e contaminação crustal de corpos mais antigos. 163
- Figura 78 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita (amostra FA-13). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum. 165
- Figura 79 – Diagrama concórdia da amostra FA-13 referente a um pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita. Em (A) visão geral dos resultados onde é possível ver os três conjuntos de dados obtidos: em preto dados utilizados para o cálculo da idade (detalhe em B), em rosa sequência de dados indicando que houve uma perda progressiva de Pb (evento térmico/metamorfismo) e em azul, dados não utilizados no cálculo da idade. 166
- Figura 80 – Imagem de satélite (Google Earth) mostrando os limites geográficos da Província Pegmatítica de São João del Rei por Pereira *et al.* (2003, 2004) em vermelho e o da presente tese, em amarelo. Em branco estão representados os limites municipais de Minas Gerais (IBGE). 168
- Figura 81 – Distribuição em % em peso normalizada das principais fases minerais encontradas nos pegmatitos estudados, separados por tipo de rocha encaixante. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar. 176
- Figura 82 – Distribuição dos elementos Sn, Nb e Ta nos concentrados de minerais pesados dos corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Os corpos foram agrupados segundo suas rochas encaixantes. Os dados foram obtidos a partir da composição química média dos minerais encontrados e sua proporção em cada concentrado. 181
- Figura 83 – Distribuição normalizada dos elementos Sn, Nb e Ta nos concentrados de minerais pesados dos corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Os corpos foram agrupados segundo suas rochas encaixantes. 183

Figura 84 – Esboço evolutivo do arco Ritápolis com ênfase na intrusão dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei. (A) Formação de crosta oceânica e rochas associadas (sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes) no Riacciano entre 2231 ± 5 Ma e 2202 ± 11 Ma. (B) Subducção da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e formação do plutonismo associado ao arco Ritápolis (2190 a 2100 Ma). (C) Detalhe da figura B mostrando a intrusão do metadiorito Brumado (2131 ± 4 Ma) nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. (D) Intrusão do metagranitoide Ritápolis (2149 ± 10 Ma a 2121 ± 7 Ma) na sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e no metadiorito Brumado. (E) Injeção dos diques pegmatíticos (2129 ± 33 Ma a 2121 ± 9 Ma) nas rochas hospedeiras. (F) Diques pegmatíticos com diferentes cores indicando níveis crustais e de fracionamento distintos. Amarelo: corpos mais rasos e mais fracionados; azul claro: corpos com níveis intermediários de fracionamento e profundidade; azul escuro: corpos mais profundos e primitivos. (G) Movimentação regional sugerida dos blocos e colocação de corpos profundos ao lado de corpos mais rasos e fracionados. (H) Erosão do arco e atual nível de exposição de alguns dos corpos pegmatíticos intrusivos em rochas hospedeiras de diferentes níveis crustais (anfibolitos, filitos, metadiorito e metagranitoide).

187

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo das informações disponíveis sobre o material de interesse da campanha RP. Mineralogia = tabelas de descrição mineralógica; SP = seção polida preparada; MEV = resultados MEV-EDS; SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.	9
Tabela 2 – Resumo das informações disponíveis sobre o material de interesse da campanha SA. Mineralogia = tabelas de descrição mineralógica; SP = seção polida preparada; SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.	10
Tabela 3 – Esquema de classificação de pegmatitos adaptado de Černý & Ercit (2005) e Černý <i>et al.</i> (2012).	24
Tabela 4 – Evolução no conhecimento e subdivisão dos pegmatitos da região de São João del Rei.	51
Tabela 5 – Mineralogia dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei.	53
Tabela 6 – Corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei que foram estudados.	54
Tabela 7 – Resumo da composição mineralógica obtida por estereomicroscopia ótica com auxílio de microsonda Raman e microscopia eletrônica de varredura com EDS, dos concentrados de minerais pesados dos pegmatitos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. (-) indica que o mineral não foi observado no concentrado; (<0,1) indica que o mineral foi encontrado em concentrações inferiores a 0,1 % em peso; (tr) refere-se a traço e indica que poucos grãos do mineral foram observados.	63
Tabela 8 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-02.	64
Tabela 9 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-03.	65
Tabela 10 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-05.	66
Tabela 11 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-06.	67
Tabela 12 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-07.	68
Tabela 13 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-08.	69
Tabela 14 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-09.	69
Tabela 15 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-10.	70
Tabela 16 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-11.	71

Tabela 17 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-12.	72
Tabela 18 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-13.	73
Tabela 19 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-14.	73
Tabela 20 – Lista de minerais, ocorrência e principais técnicas analíticas utilizadas.	75
Tabela 21 – Composição química representativa obtida por microsonda eletrônica/WDS dos diversos grãos de cassiterita presentes nos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Tabela completa de análises é apresentada no Anexo IV.	80
Tabela 22 – Composição química representativa da gahnita estudada obtida por microsonda eletrônica/WDS. A tabela completa com os dados obtidos é apresentada no Anexo VI.	93
Tabela 23 – Comparativo dos dados publicados (teóricos e experimentais) de espectroscopia Raman em gahnita com os resultados experimentais obtidos neste trabalho. nd = não detectado.	96
Tabela 24 – Análises químicas representativas de grãos de ilmenita de diferentes corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei, obtidos por microsonda eletrônica/WDS. Tabela completa de dados é apresentada no Anexo VII.	103
Tabela 25 – Lista de amostras de grãos de granada estudados por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia Raman. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.	112
Tabela 26 – Resultados representativos de química mineral, proporção atômica e membros finais de diferentes grãos de granada dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Uma análise de cada amostra mais próxima da média dos resultados foi selecionada para compor a tabela. Os dados completos são apresentados no Anexo VIII.	117
Tabela 27 – Simetria e frequência dos modos Raman ativos de diferentes tipos de granada segundo Hofmeister & Chopelas (1991) e Kolesov & Geiger (1998). Modos vibracionais descritos: str = estiramento, bend = dobramento, R = rotação, T = translação.	127
Tabela 28 – Análises de química mineral semiquantitativa por EDS de grãos representativos de xenotímio da Província Pegmatítica de São João del Rei. Tabela completa dos dados é apresentada no Anexo IX.	136
Tabela 29 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 25 grãos de zircão de um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado (amostra FA-03). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.	155
Tabela 30 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 26 grãos de zircão de um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (amostra FA-08). Dois pontos com maior grau de discordância e interpretados como herdados não foram utilizados para o cálculo da idade.	158
Tabela 31 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 23 grãos de zircão analisados (26 spots) de um pegmatito intrusivo nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostra FA-12). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.	161

Tabela 32 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 12 grãos de zircão analisados (26 spots) de um pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita (amostra FA-13). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.	164
Tabela 33 – Resumo dos dados geocronológicos disponíveis na literatura e dos obtidos neste trabalho. A interpretação obtida é explicada no texto.	167
Tabela 34 – Estabilidade de alguns minerais pesados segundo Pettijohn <i>et al.</i> (1987).	171
Tabela 35 – Minerais descritos historicamente na Província Pegmatítica de São João del Rei e minerais identificados na presente tese (marcados com X na coluna a esquerda). Os minerais foram agrupados para facilitar a comparação dos dados (descrições originais entre parênteses). A ordem dos minerais segue a que é encontrada na literatura.	174

Sumário

Dedicatória	
Agradecimentos	v
Resumo	vi
<i>Abstract</i>	vii
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xvi
1 - Introdução e caracterização do problema	1
2 - Objetivo	5
3 - Localização e vias de acesso	6
4 - Materiais e métodos de trabalho	8
4.1 - Reestruturação do acervo	9
4.2 - Trabalho de campo	10
4.3 - Preparação laboratorial	12
4.4 - Estereomicroscopia ótica de grãos	12
4.5 - Preparação de amostras	12
4.6 - Microsonda Raman	13
4.7 - Química mineral	14
4.8 - Análise geocronológica	17
4.9 - Mapa geológico integrado	18
5 - Revisão sobre pegmatitos graníticos	20
5.1 - Introdução	20
5.2 - Origem e formação	21
5.2.1 - Precipitação direta de uma fase aquosa	21
5.2.2 - Cristalização de um líquido silicático através da interação com uma fase fluida aquosa	21
5.2.3 - Cristalização a partir de um gel silicático	22
5.2.4 - Cristalização a partir de um líq. silicático rico em fundentes	22
5.2.5 - Cristalização de um magma granítico das margens para o centro	23
5.3 - Classificação de pegmatitos	23
5.4 - Mineralogia de pegmatitos graníticos	27
6 - Geologia regional e evolução geotectônica da área de estudo	33
6.1 - Introdução	33
6.2 - Esboço geológico regional	35

7 - Geologia local	39
7.1 - Introdução	39
7.2 - Ortognaisse tonalítico Cassiterita	39
7.3 - Sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes	41
7.4 - Ortognaisse granítico Fé	41
7.5 - Metaquartzo-monzodiorito Glória	42
7.6 - Ortognaisse granodiorítico Ribeirão do Mosquito	42
7.7 - Metadiorito Brumado	43
7.8 - Metagranitoide Ritápolis	43
8 - Síntese do conhecimento sobre a Província Pegmatítica de São João del Rei	45
9 - Pegmatitos estudados	54
9.1 - Introdução e localização dos corpos	54
9.2 - Características de campo dos pontos visitados	56
9.3 - Descrição geral dos concentrados	62
10 - Resultados dos estudos de mineralogia	74
10.1 - Introdução	74
10.2 - Cassiterita	74
10.2.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	75
10.2.2 - Microscopia eletrônica de varredura	76
10.2.3 - Química mineral por MEV/EDS e ME/WDS	79
10.3 - Gahnita	87
10.3.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	88
10.3.2 - Microscopia eletrônica de varredura	88
10.3.3 - Química mineral por MEV/EDS e ME/WDS	91
10.3.4 - Espectroscopia Raman	95
10.4 - Ilmenita	97
10.4.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	97
10.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura	98
10.4.3 - Química mineral por ME/WDS	102
10.5 - Granada	110
10.5.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	110
10.5.2 - Microscopia eletrônica de varredura	111
10.5.3 - Química mineral por MEV/EDS	115
10.5.4 - Espectroscopia Raman	126
10.6 - Xenotímio	129
10.6.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	129
10.6.2 - Microscopia eletrônica de varredura	130

10.6.3 - Química mineral por MEV/EDS	132
10.7 - Minerais do grupo da columbita/euxenita (columbita/tantalita)	141
10.7.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	141
10.7.2 - Microscopia eletrônica de varredura	142
10.8 - Minerais do grupo da microlita (microlita)	142
10.8.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	144
10.9 - Zircão	145
10.9.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	146
10.10 - Monazita	146
10.10.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	146
10.11 - Outros minerais	149
10.11.1 - Estereomicroscopia ótica de grãos	149
11 - Geocronologia U/Pb LA-ICPMS	154
11.1 - Introdução	154
11.2 - Resultados analíticos	154
11.2.1 - Amostra FA-03 (rocha encaixante: metadiorito Brumado)	154
11.2.2 - Amostra FA-08 (rocha encaixante: metagranitoide Ritápolis)	155
11.2.3 - Amostra FA-12 (rocha encaixante: anfibolito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes)	158
11.2.4 - Amostra FA-13 (rocha encaixante: ortognaisse Cassiterita)	162
11.3 - Discussão das idades obtidas	167
12 - Discussões	168
13 - Conclusões	182
14 - Referências Bibliográficas	189
Anexos	202
Anexo I – Mapa geológico integrado da área de estudo em escala 1:50.000	
Anexo II – Inclusões na cassiterita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS (meio digital)	
Anexo III – Cassiterita: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio digital)	
Anexo IV – Cassiterita: tabela de resultados analíticos ME/WDS (meio digital)	
Anexo V – Gahnita: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio digital)	
Anexo VI – Gahnita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS (meio digital)	
Anexo VII – Ilmenita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS (meio digital)	
Anexo VIII – Granada: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio digital)	
Anexo IX – Xenotímio: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio digital)	
Anexo X – Carta de aceite de artigo (meio digital)	
Anexo XI – Artigo submetido para publicação (meio digital)	

1 INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O pensamento científico até a década de 1990 apontava que a extremidade meridional do cráton São Francisco era representada por fragmentos de sequências metavulcano-sedimentares arqueanas, que seriam cortadas por rochas plutônicas de natureza granito-gnáissica, com idades variando entre 3,20 e 2,10 Ga (Pires *et al.*, 1990; Teixeira *et al.*, 2000; Alkmin, 2004). Uma dessas sequências, que se estende desde Lavras até Conselheiro Lafaiete, passando pela região de São Tiago, Lagoa Dourada, Resende Costa e São João del Rei (Fig. 1), recebeu diferentes denominações: *greenstone belt* Barbacena (Pires, 1978); *greenstone belt* Itumirim – Nazareno (Teixeira, 1992); *greenstone belt* Itumirim – Tiradentes (Valença *et al.*, 1998); e *greenstone belt* Rio das Velhas (Alkmin, 2004). Nesse contexto, Ávila (2000) e Toledo (2002) compartimentaram esse *greenstone belt* em duas faixas, designando-as, respectivamente, de *greenstone belts* I e II e de Rio das Mortes e Nazareno. Posteriormente, Ávila *et al.* (2004) introduziram o termo *greenstone belt* Dolores de Campos para agrupar as rochas anfíbolíticas, metaultramáficas e metassedimentares que afloram ao sul das cidades de Tiradentes e Dolores de Campos, enquanto Ávila *et al.* (2010, 2014) propuseram a utilização da designação de sequências metavulcano-sedimentares Nazareno, Rio das Mortes e Dolores de Campos. Neste mesmo contexto, Ávila *et al.* (2012) caracterizaram que as rochas anfíbolíticas dessas três sequências metavulcano-sedimentares teriam cristalizado no Riaciano entre 2270 e 2220 Ma e, desta maneira, não seriam arqueanas como pressuposto por vários pesquisadores (Pires, 1978; Quéméneur & Baraud, 1983; Teixeira *et al.* 2000; Alkmin, 2004).

Na extremidade meridional do cráton São Francisco também afloram diversos corpos plutônicos paleoproterozoicos de composição bastante variável, incluindo gabros, dioritos, quartzo-dioritos, quartzo-monzodioritos, tonalitos, trondhjemitos, granodioritos e granitos (Ávila *et al.*, 2003, 2006a, 2006b; Cherman, 2004; Teixeira *et al.*, 2008, 2015; Barbosa *et al.*, 2015), bem como rochas vulcânicas e sub-vulcânicas félsicas paleoproterozoicas (Ávila *et al.*, 2007, 2010, 2014), as quais foram correlacionadas temporalmente desde o Sideriano (2,35 – 2,30 Ga) até o Riaciano (2,23 – 2,20 Ga). As feições de campo revelam contatos intrusivos de parte dos corpos plutônicos em relação às rochas das diferentes sequências metavulcano-

sedimentares (Rio das Mortes, Nazareno e Dores de Campos), o que é evidenciado pela presença de xenólitos de rochas anfibolíticas e metaultramáficas naqueles e pelo enxame de diques e apófises associados a esses corpos, que cortam as rochas das supracitadas sequências (Ávila, 2000; Vasques, 2007).

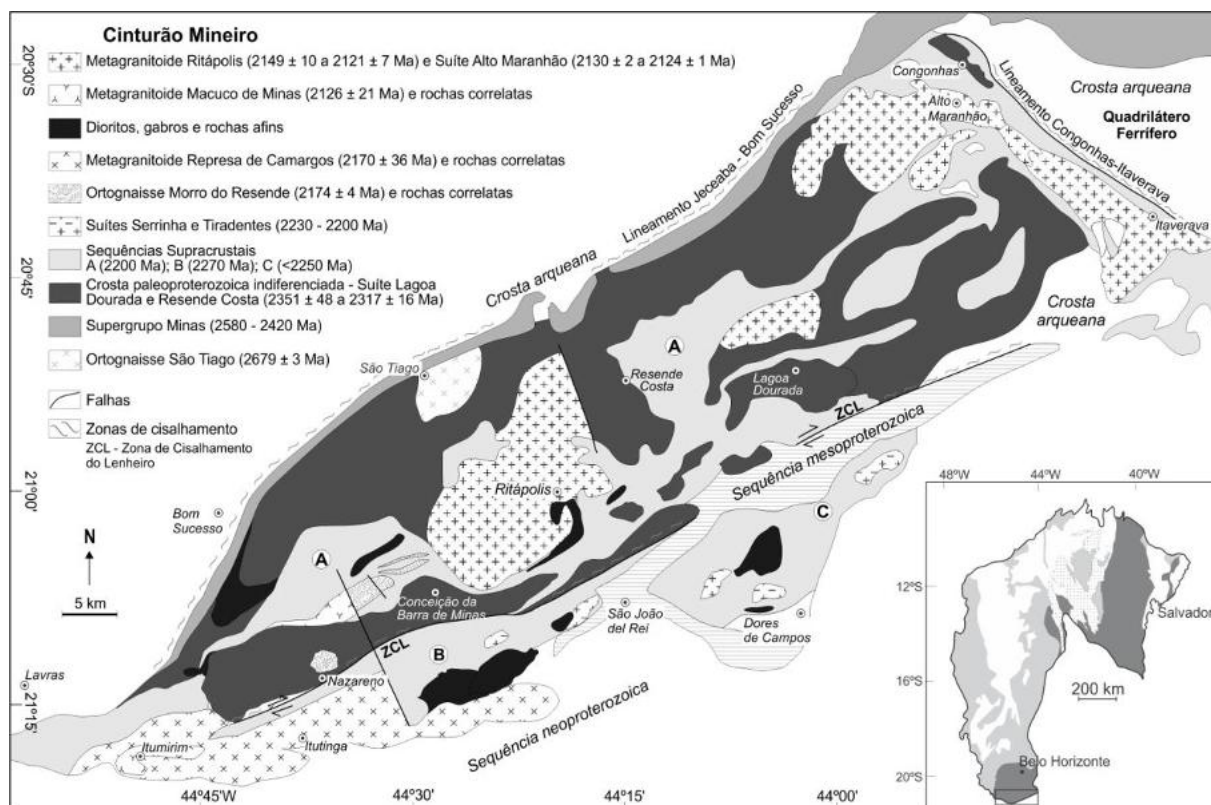


Figura 1 - Mapa geológico esquemático da borda meridional do cráton São Francisco (CSF) mostrando as principais unidades que compõem o Cinturão Mineiro (Barbosa *et al.*, 2015 e referências citadas). Mapa de localização mostra o CSF - cinza escuro: rochas do embasamento; branco, cinza claro e pontilhado: coberturas (Alkmim & Martins Neto, 2012).

Neste mesmo contexto geológico, ocorre um enxame de corpos pegmatíticos mineralizados em cassiterita, columbita, tantalita e espodumênio (Guimarães & Guedes, 1944), os quais foram reunidos por Pereira *et al.* (2003; 2004) na Província Pegmatítica de São João Del Rei (Figs. 1 e 2). Segundo estes autores, essa província ocupa uma área de cerca de 1400 km² (70 km de comprimento por 20 km de largura), abrangendo os municípios de Nazareno, Conceição da Barra de Minas (antiga Cassiterita), São João del Rei, Ritópolis e Coronel Xavier Chaves, na porção sul do Estado de Minas Gerais. Recentemente, corpos pegmatíticos mineralizados em cassiterita e columbita-tantalita também foram descritos em São Tiago e em

Resende Costa, aumentando a área de exposição da referida província (Ávila *et al.*, 2011).

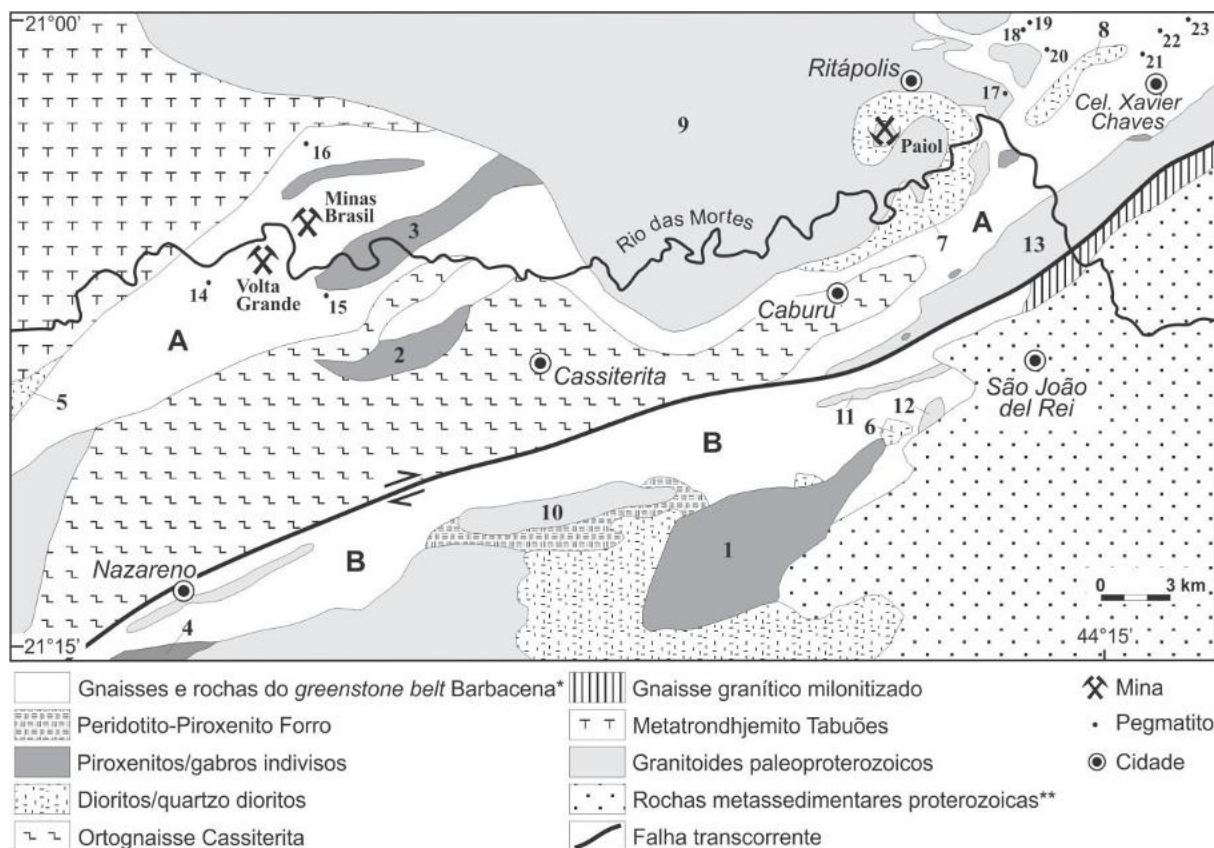


Figura 2 - Mapa geológico esquemático da região entre as cidades de Nazareno e Coronel Xavier Chaves mostrando a distribuição dos principais corpos pegmatíticos explotados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Modificado de Ávila *et al.* (2003). *Gnaisses e rochas do greenstone belt Barbacena: (A) Faixa Rio das Mortes: predominância de anfibólitos, pelitos e gonditos; (B) Faixa Nazareno: predominância de rochas metaultramáficas komatiíticas; **Rochas metassedimentares proterozoicas: Megassequências São João del Rei (Paleoproterozoica), Carandaí (Mesoproterozoica) e Andrelândia (Neoproterozoica). (1) Gabro São Sebastião da Vitória; (2) Metagabro Manuel Inácio; (3) Metagabro Rio dos Peixes; (4) Gabro Rio Grande; (5) Diorito Rio Grande; (6) Quartzo Diorito do Brito; (7) Metadiorito Brumado; (8) Metaquartzo-monzodiorito Glória; (9) Metagranitoide Ritápolis; (10) Granitóide do Lajedo; (11) Granodiorito Brumado de Baixo; (12) Suíte Serrinha (Granodiorito Brumado de Cima e corpos granofíricos); (13) Gnaiss Granítico Fé; (14) Pegmatito do Fundão; (15) Pegmatito Serra; (16) Pegmatito do Fumal; (17) Pegmatito Olaria; (18) Pegmatito Penedo; (19) Pegmatito Cavalo do Buraco; (20) Pegmatito Prainha; (21) Pegmatito Mato Virgem; (22) Pegmatito Sossego; (23) Pegmatito Cascalho Preto.

Regionalmente, os corpos pegmatíticos cortam as rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, bem como os diversos corpos plutônicos paleoproterozoicos. Normalmente os pegmatitos apresentam extensões inferiores a 100 m, porém na área da Volta Grande, Município de Nazareno, registram-se corpos de até 1000 m de comprimento e espessuras variáveis que podem chegar a até 70 metros (Quéméneur, 1987).

Admite-se que a gênese dos corpos pegmatíticos é bastante duvidosa, porém diversos autores associam os mesmos ao plúton Ritápolis (Quéméneur & Baraud, 1983) ou Santa Rita (Pires & Porto Júnior, 1986), cujas idades de cristalização variam de 2149 ± 10 Ma (Barbosa *et al.*, 2015) até 2121 ± 7 Ma (Ávila, 2000). Porém, até o presente momento, nenhum estudo mineralógico ou geocronológico foi efetivado nestes pegmatitos para comprovar tal associação.

No quadro atual do conhecimento geológico da área em questão, diversas dúvidas ainda não foram respondidas satisfatoriamente como, por exemplo: *i)* se todos os corpos pegmatíticos são mineralizados; *ii)* se os minerais econômicos estão distribuídos ao longo da província; *iii)* se a mineralogia desses corpos é semelhante; *iv)* se os pegmatitos estão associados a um ou vários pulsos mineralizadores; *v)* se os pegmatitos estão relacionados geneticamente ao metagranitoide Ritápolis ou a outros corpos plutônicos que ocorrem na área.

2 OBJETIVO

Este projeto tem por tema central a caracterização dos principais constituintes presentes nos concentrados de minerais pesados dos saprólitos de diversos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei no intuito de tentar correlacioná-los espacial, temporal e geneticamente a um dos plútons graníticos da região.

Para se alcançar o objetivo em questão foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Amostragem e concentração de cerca de 20 kg de material saprolítico de diversos corpos pegmatíticos de tamanho e espessura variável;
- 2) Processamento do concentrado de minerais pesados em laboratório para facilitar o seu estudo;
- 3) Caracterização em estereomicroscópio da mineralogia presente nos corpos da Província Pegmatítica de São João del Rei;
- 4) Separação de diversas fases minerais para estudo por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS) e por espectroscopia Raman, objetivando a caracterização das semelhanças ou diferenças na composição química ou das inclusões sólidas presentes nas fases minerais;
- 5) Estudo em microsonda eletrônica de diversos grãos de gahnita, cassiterita e ilmenita visando contribuir para o conhecimento desses minerais em pegmatitos, bem como para comparar os resultados com aqueles obtidos por MEV-EDS.
- 6) Separação de grãos de zircão para a obtenção da idade de cristalização por U-Pb de alguns dos pegmatitos, visando correlacioná-los aos plútons graníticos da região.

3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A região estudada está localizada na porção sul do estado de Minas Gerais (Fig. 3a) e abrange parte dos municípios de São Tiago, Conceição da Barra de Minas (antiga Cassiterita), Ritápolis, São João Del Rei, Coronel Xavier Chaves, Resende Costa e Tiradentes, com destaque para a cidade de São João del Rei. Geograficamente a região estudada está inserida em um retângulo com coordenadas limites de $21^{\circ}9'36''\text{S}$ / $44^{\circ}38'60''\text{W}$ e $20^{\circ}54'00''\text{S}$ / $44^{\circ}5'24''\text{W}$ (UTM 536.000 m E – 7.660.000 m N e 588.000 m E – 7.688.000 m N) e contida nas seguintes cartas topográficas do IBGE em escala 1/50.000: SF-23-X-A-IV-4 (São Tiago), SF-23-X-A-V-3 (Jacarandira), SF-23-X-A-V-4 (Resende Costa), SF-23-X-C-I-2 (Nazareno), SF-23-X-C-II-1 (São João del Rei) e SF-23-X-C-II-2 (Tiradentes).

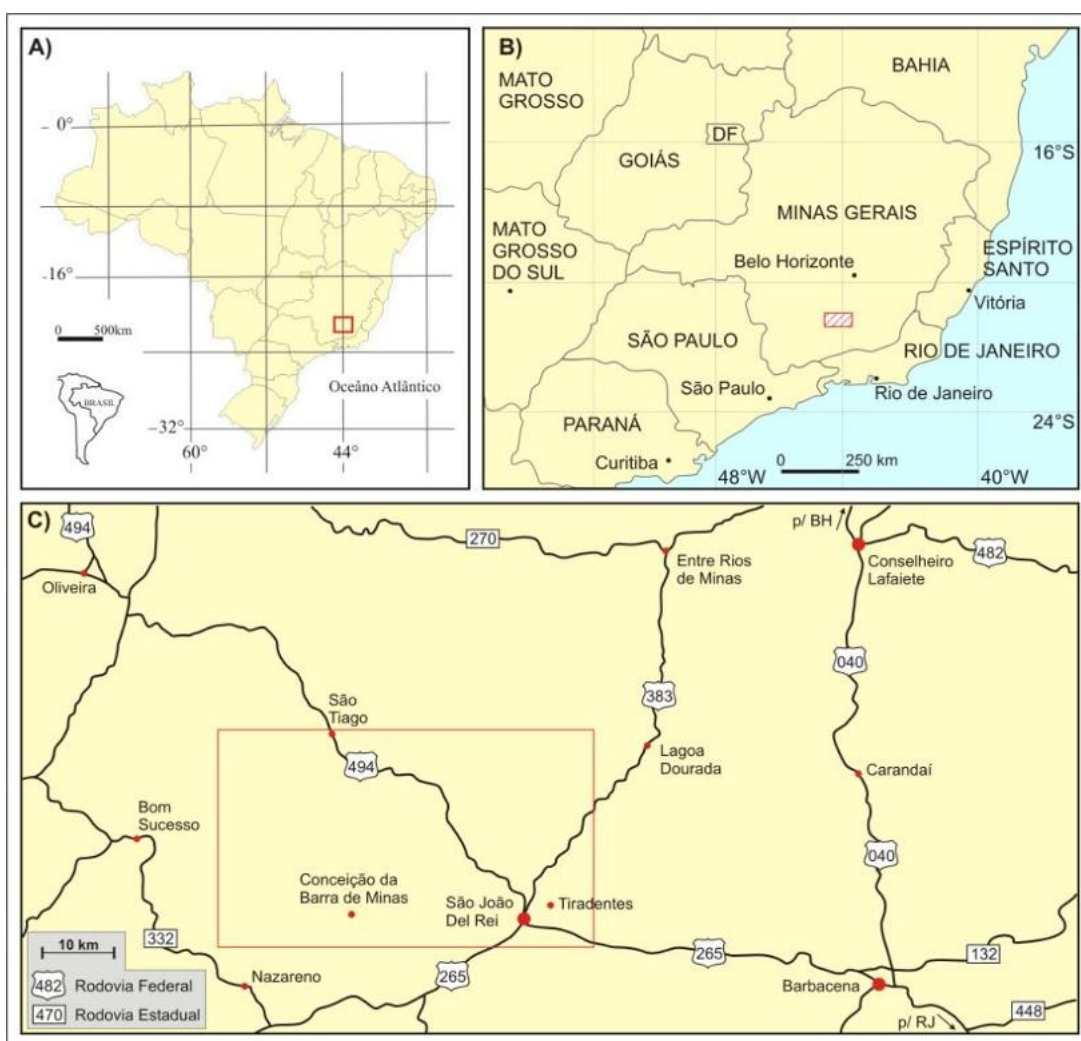


Figura 3 – Localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais (retângulo vermelho) e principais vias de acesso.

As capitais mais próximas são Belo Horizonte, a cerca de 185 km, e Rio de Janeiro, a aproximadamente 331 km (Fig. 3b). Partindo do Rio de Janeiro, o principal acesso se dá pela rodovia federal BR-040 até a cidade de Barbacena, e depois, seguindo pela BR-265 até a cidade de São João Del Rei (Fig. 3c). Partindo de Belo Horizonte, utiliza-se a BR-040 até próximo da cidade de Congonhas, seguindo pela BR-383 até São João Del Rei. A partir da cidade de São João del Rei, o acesso aos corpos estudados pode ser realizado por diversas estradas estaduais ou vicinais, asfaltadas ou de terra.

4 MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO

A presente pesquisa envolveu atividades de escritório, campo e laboratório, sendo que as etapas de trabalho foram realizadas de maneira sucessiva de modo a permitir o gradual tratamento e integração dos dados obtidos. Um fluxograma resumido das etapas de campo e laboratório é apresentado na figura 4.

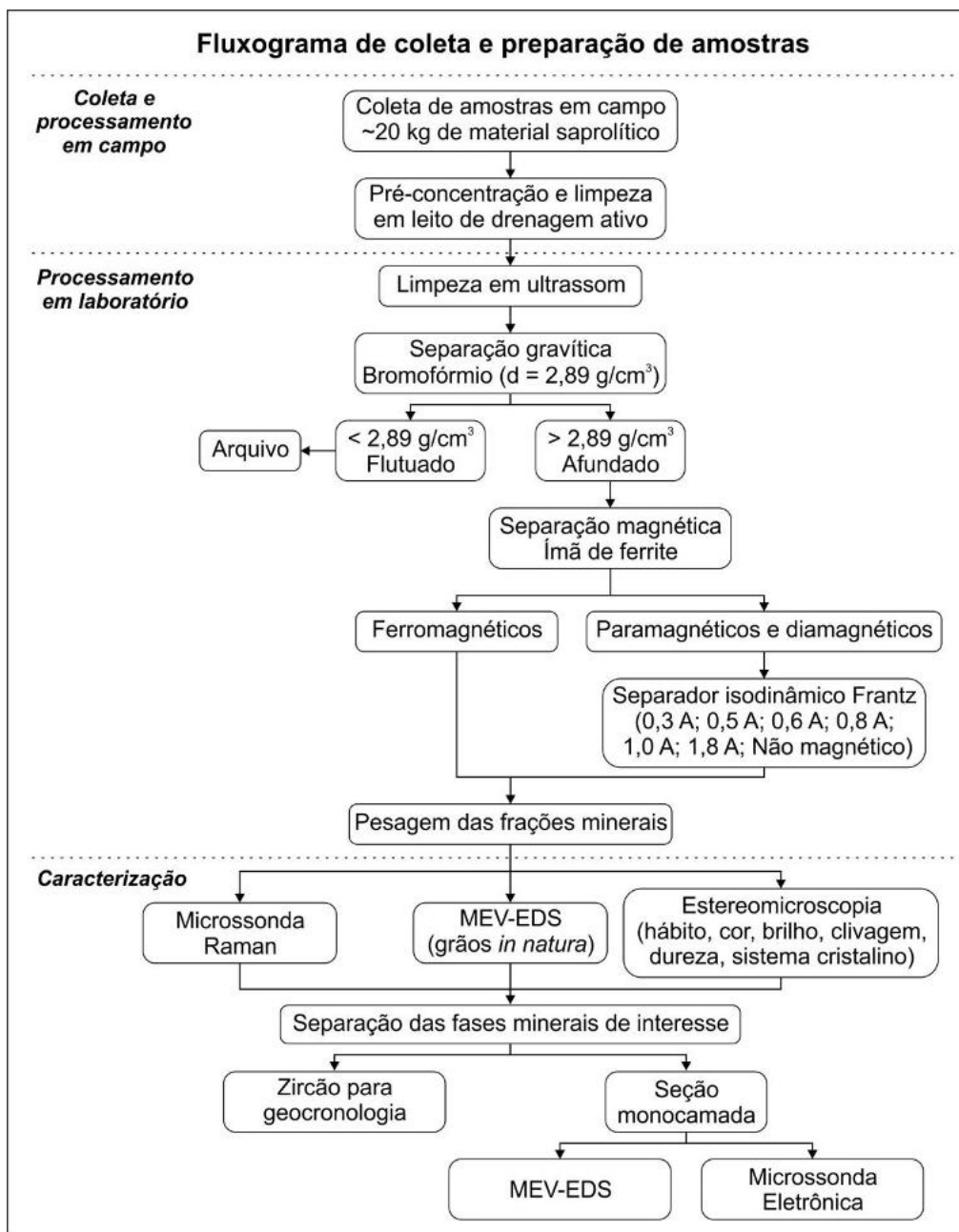


Figura 4 – Fluxograma resumido das etapas de campo e de laboratório da presente tese para coleta, tratamento e caracterização dos concentrados de minerais pesados dos saprólitos dos pegmatitos estudados.

4.1 Reestruturação do Acervo

Inicialmente foi realizado um levantamento de todo o material já amostrado pela equipe do projeto (Rocha & Fiuza, 2007; Stohler *et al.*, 2008; Soares *et al.*, 2009) dos diversos corpos pegmatíticos presentes na região de estudo de modo a: *i*) contabilizar a extensão dos dados disponíveis (amostras, mineralogia, seções polidas); *ii*) otimizar os trabalhos de campo (corpos amostrados e encaixantes); *iii*) e, quando possível, comparar os resultados obtidos.

Neste sentido, foram realizadas anteriormente duas campanhas de estudo na área de desenvolvimento da presente tese, sendo que a primeira ocorreu em 2007 e foi denominada RP (relativa ao metagranitoide Ritápolis) e a segunda em 2008, denominada SA (relativa à saprólitos de pegmatitos). Ambas as campanhas geraram dados apresentados em jornadas de iniciação científica da UFRJ nos anos de 2007, a 2009 (Rocha & Fiuza, 2007; Stohler *et al.*, 2008; Soares *et al.*, 2009) e um resumo das informações disponíveis encontra-se nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Resumo das informações disponíveis sobre o material de interesse da campanha RP. Mineralogia = tabelas de descrição mineralógica; SP = seção polida preparada; MEV = resultados MEV-EDS; SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Ponto	RP - 6	RP - 7	RP - 11	RP - 12	RP - 13	RP - 14	RP - 15	RP - 17	RP - 18	RP - 19
Saprólito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito	Pegmatito
Encaixante	Metagranitoide Ritápolis	Metagranitoide Ritápolis	Filito da SMVS Rio das Mortes	Filito da SMVS Rio das Mortes	Metagranitoide Ritápolis	Ortognaisse Cassiterita	Ortognaisse Cassiterita	Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	Ortognaisse Fé
UTM E	568308	568187	552818	553481	554070	555359	555051	570694	571346	573681
UTM N	7676179	7676431	7670329	7668068	7667266	7666217	7665615	7665914	7665397	7665860
Mineralogia	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ilmenita	SP/MEV	SP/MEV							SP/MEV	
Ilmenita tabular										
Granada rosa								SP		
Granada vermelha		SP						SP		SP
Xenotímio 0,3-0,4A					SP					
Xenotímio 0,5A	SP	SP			SP			SP	SP	
Monazita 0,3-0,6A								SP		
Monazita amarela					SP					
Monazita laranja					SP					
Columbita 0,5A	SP				SP					
Preto dúvida					SP					
Turmalina 0,6A								SP		
Monazita 0,6-0,8A	SP	SP			SP				SP	
Zircão 0,3-0,5A										
Zircão 0,5-0,6A										
Zircão 0,6-0,8A	SP									
Zircão 0,6-1,5A					SP					
Zircão N.A.		SP			SP			SP		

Tabela 2 – Resumo das informações disponíveis sobre o material de interesse da campanha SA. Mineralogia = tabelas de descrição mineralógica; SP = seção polida preparada; SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Ponto	SA - 11	SA - 16A	SA - 16B	SA - 21
Saprólito Amostrado	Pegmatito	Pegmatito (borda)	Pegmatito (centro)	Pegmatito
Encaixante	Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	Metagranitoide Ritápolis	Metagranitoide Ritápolis	Filito da SMVS Rio das Mortes
UTM E	571361	567853	567853	556817
UTM N	7665229	7674254	7674254	7673279
Mineralogia	SIM	SIM	SIM	SIM
Ilmenita	SP	SP		SP
Ilmenita tabular 0,4A				
Granada rosa	SP			
Granada vermelha	SP	SP		
Xenotímio 0,3-0,5A		SP	SP	SP
Monazita 0,3-0,6A				SP
Columbita 0,5A	SP	SP	SP	SP
Turmalina 0,6A	SP			
Monazita 0,6-0,8A		SP	SP	
Zircão 0,3 A 0,5A				
Zircão 0,5 A 0,6A				
Zircão 0,6 a 0,8A				
Zircão 0,6 a 1,5A				SP
Zircão N.A.		SP	SP	
Zircão alongado	SP			
Zircão Arredondado				
Zircão Hafnífero				
Rutilo N.A.				
Titanita N.A.				
Cerianita				

4.2 Trabalho de campo

Durante a etapa de campo, realizada em maio de 2013, as seguintes atividades foram concluídas:

i) Amostragem dos saprólitos (cerca de 20 kg) e de amostras frescas (5 kg) dos corpos pegmatíticos previamente selecionados de acordo com suas rochas encaixantes;

ii) Descrição das principais feições de campo dos pegmatitos, de acordo com critérios previamente estabelecidos;

iii) Concentração dos saprólitos dos corpos pegmatíticos com bateia e peneira em leito ativo de drenagem, para aquisição do concentrado de minerais pesados (Fig. 5).



Figura 5 – Processo de amostragem e concentração em campo das amostras coletadas. A) amostragem de corpo pegmatítico intemperizado (~20 kg), B) material básico para amostragem e concentração em campo, C) deslamagem em leito ativo, D) peneiramento em malha de 2 mm, E) concentração em bateia, F) produto final com os minerais pesados.

4.3 Preparação laboratorial

A fase laboratorial envolveu o processamento do concentrado de minerais pesados, visando facilitar o estudo mineralógico em estereomicroscópio. Inicialmente foi realizada a limpeza em ultrassom dos concentrados, objetivando diminuir a quantidade de contaminantes presentes na forma de alteração ou fases friáveis. Posteriormente, foi realizada a separação gravítica com líquido denso (bromofórmio $d = 2,89 \text{ g/cm}^3$) para a retirada do quartzo e outros minerais leves e, posteriormente, a separação magnética com ímã de ferrite para a retirada de material ferromagnético e com o separador isodinâmico Frantz em correntes de 0,3, 0,5, 0,6, 0,8, 1,0 A e amperagem máxima (1,8 A), para a separação das diferentes frações de material paramagnético e diamagnético (Fig. 4).

4.4 Estereomicroscopia ótica de grãos

Cada um dos produtos finais gerados durante o processamento do concentrado de minerais pesados no separador isodinâmico Frantz foi descrita em estereomicroscópio e os minerais identificados e quantificados (por estimativa visual) a partir das suas principais características físicas, como sistema cristalino, hábito, cor, dureza, clivagem e brilho. Nesta etapa foram separados os grãos de interesse para as outras etapas do estudo, principalmente para a caracterização dos minerais de identificação dúbia por microsonda Raman e para a obtenção das composições químicas e identificação das inclusões sólidas por MEV-EDS (Fig. 4).

4.5 Preparação de amostras

Os grupos minerais de interesse, classificados e separados na fase de estudos em estereomicroscopia, foram montados na forma de seções polidas de monocamada para os estudos posteriores. Essa montagem é feita colando os grãos em fita adesiva, que depois é recoberta com resina epóxi (*Struers Epofix*). Após a cura da resina, cada seção é desbastada e polida com discos de diamante em matriz metálica com granulometria decrescente (40 a 6 μm). Depois do desbaste e polimento inicial, que foi realizado cuidadosamente de modo a evitar perda de grãos, a amostra é polida com o uso de suspensões diamantadas (3 a 1 μm) sobre panos de material sintético. O controle da qualidade do polimento é feito manualmente com a utilização de estereomicroscópio e microscópio ótico de luz refletida.

A preparação das amostras foi realizada no Laboratório do Setor de Caracterização Mineral do CETEM, utilizando sistema automatizado TegraSystem da Struers.

4.6 Microsonda Raman

A espectroscopia Raman é baseada na interação de radiação eletromagnética (neste caso, luz monocromática) com um meio físico (neste caso, a amostra). Durante essa interação, a luz pode ser absorvida, refratada, refletida ou apresentar uma combinação entre esses efeitos físicos, sendo que, para a espectroscopia Raman, a refração ou espalhamento desta radiação é o processo mais importante (e.g. Lewis & Edwards, 2001; Smith & Dent, 2005).

Quando a luz interage com a amostra, a maior parte dela é refletida elasticamente, ou seja, a luz refletida tem a mesma energia (ou frequência) da luz incidente (espalhamento Rayleigh), enquanto uma pequena porção da luz interage inelásticamente com a amostra, ou seja, são espalhadas com energia diferente da inicial. Essa diferença corresponde à energia com que os átomos estão vibrando e a esta frequência de vibração podem ser associadas diversas informações sobre as amostras analisadas como, por exemplo, quais moléculas presentes, a geometria molecular, tipos de ligações químicas, entre outras.

Como os materiais analisados são complexos e geralmente formados por diferentes espécies químicas, que vibram com intensidades e frequências distintas, o resultado é um espectro com um conjunto de bandas que representam o material analisado (Fig. 6).

O equipamento utilizado durante a presente tese foi uma microsonda Raman modelo LabRAM 800HR da Horiba Jobin Yvon, equipado com um detector CCD refrigerado termoeletronicamente a -70°C (efeito Peltier), grade de difração de 1800 linhas/mm, com resolução espectral de aproximadamente $0,5\text{ cm}^{-1}$ e com microscópio petrográfico Olympus BX41 acoplado. A escolha da fonte de excitação entre as quatro linhas disponíveis (Ar^{+} com $\lambda = 488$ e 514 nm ; He-Ne com $\lambda = 632,8\text{ nm}$; diodo com $\lambda = 785\text{ nm}$), assim como o número de integrações, tamanho da janela espectral analisada, tamanho da abertura confocal e objetiva utilizada dependeu das características de cada amostra.

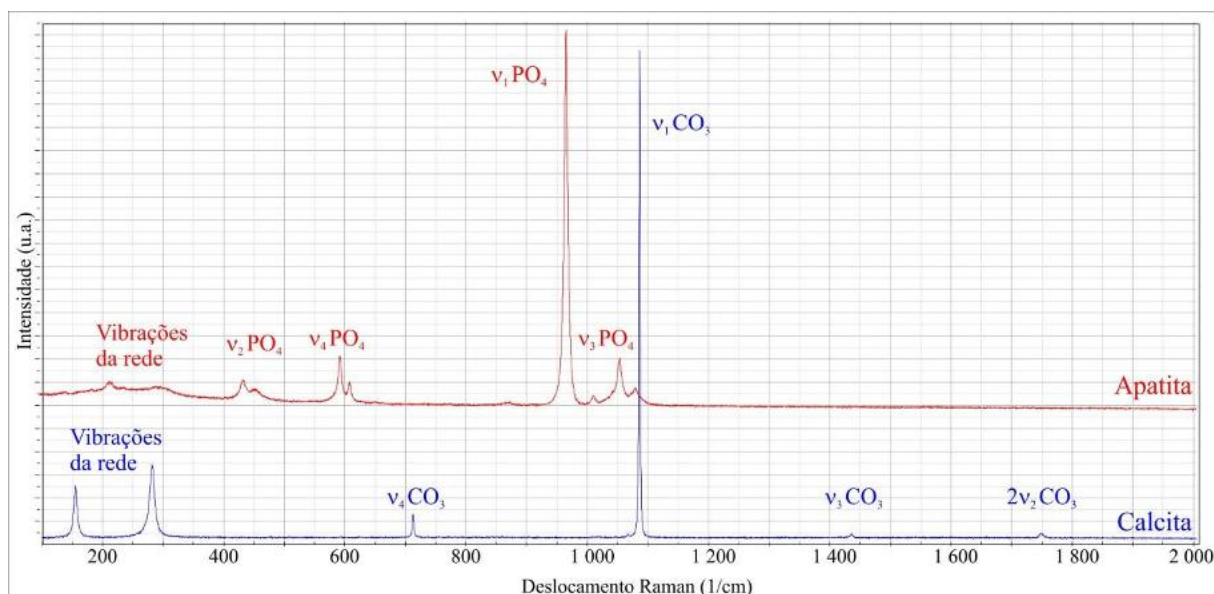


Figura 6 – Dois exemplos de espectro Raman obtidos em grãos de apatita e de calcita, com os diferentes grupos vibracionais identificados. Definição das bandas por Aza *et al.* (1997) e Rividi *et al.* (2010), respectivamente.

4.7 Química mineral

A ferramenta padrão utilizada para caracterizar a química mineral dos grãos foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Este tipo de análise é indicado para elementos maiores e menores, mas possui baixa sensibilidade para elementos traços. Análises por microsonda eletrônica com análises por espectroscopia por dispersão de comprimento de onda (WDS) foram realizadas em alguns minerais selecionados, de modo a se obter uma química mineral mais detalhada (*e.g.* Smith & Dent, 2005; Reed, 2006; Gomes, 2015).

A microscopia eletrônica de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons que é acelerado em direção a um alvo (amostra) e que, ao interagir com este alvo, gera diversos efeitos físicos que podem ser qualificados e/ou quantificados a depender dos tipos de detectores instalados no equipamento. Este feixe é gerado pelo aquecimento de um filamento (anodo) e a aceleração ocorre graças a uma diferença de potencial entre este anodo e um catodo localizado no topo da coluna, geralmente entre 0,5 e 30 kV. O caminho dos elétrons é corrigido e otimizado através de um conjunto de lentes condensadoras, presentes no interior da coluna, e é direcionado até a amostra através de uma lente eletromagnética ou eletrostática objetiva final.

A seguir são descritos os principais efeitos físicos que decorrem da interação do feixe de elétrons e a amostra, e que podem ser observados através da microscopia eletrônica de varredura.

Elétrons secundários (SE)

É formado por elétrons de baixa energia (< 50 eV) e decorre do espalhamento inelástico quando ocorre troca de energia entre o feixe e a amostra, porém sem alteração na trajetória dos elétrons. A excitação desses elétrons é relativamente insensível ao número atômico das amostras (Z) e geralmente aumenta com o decréscimo da energia do feixe. Ocorre na camada mais superficial da amostra e é utilizado para imageamento topográfico e estudos de superfície.

Elétrons retroespalhados (BSE)

Está associado a elétrons de energia superior a 50 eV até o máximo de energia do elétron primário. Os elétrons retroespalhados com maior energia sofrem espalhamento elástico e provêm da parte superior da amostra, enquanto elétrons de energia intermediária são oriundos de interações que ocorrem mais profundamente na amostra. O volume de interações dos elétrons aumenta com o aumento da energia do feixe e diminui com o aumento de Z . Uma imagem BSE fornece duas informações: uma imagem topográfica que é resultante das interações superficiais; e uma imagem composicional em função dos números atômicos dos elementos presentes na amostra. Em amostras de superfície plana (como lâminas e seções polidas) a imagem decorre da componente composicional, portanto imagens com nível de cinza proporcional ao número atômico médio ($\bar{Z}$).

Raios-X característicos – Análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Os raios-X característicos correspondem a uma radiação eletromagnética, que é gerada quando o feixe incidente interage com as camadas de elétrons dos átomos presentes na amostra de forma a arrancar um elétron de seu orbital, ocasionando uma vacância e deixando o átomo como um íon em seu estado excitado. Instantaneamente o átomo retorna ao seu estado normal com a emissão de energia característica da transição ocorrida entre os níveis de elétrons K, L ou M. Para que

essa ionização ocorra, é necessário que a energia dos elétrons incidentes (E_0) seja maior que a energia crítica de excitação (E_c) do átomo a ser excitado. A energia do fóton de raios-X emitido é uma função dos níveis de energia do átomo e é específica para cada elemento e, conseqüentemente, contém as informações sobre a composição química de cada espécie. A profundidade de geração dos raios-X característicos é dependente da energia do feixe incidente, da energia crítica de excitação e da densidade do material em análise, sendo diferente para cada elemento presente na amostra.

Na espectroscopia de energia dispersiva é gerado um único espectro na forma de um histograma, representando todo o conjunto de energias analisadas (0 keV até o E_0). Para identificação dos elementos químicos presentes normalmente são usados os picos de energia entre 0 e 20 keV, o que permite a identificação de elementos entre B e U (Fig. 7) e, a partir das informações contidas no espectro de fluorescência de raios-X, é possível obter informações qualitativas e semiquantitativas acerca da composição da amostra.

O equipamento utilizado durante a presente tese foi um FEI Quanta 400 com um sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) Bruker Nano Quantax 800 atualmente instalado no Setor de Caracterização Tecnológica do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI), no Rio de Janeiro. Este sistema conta com espectrômetro de energia dispersiva Bruker XFlash 4030, tecnologia SDD (*silicon drift detector*) que, com uma janela de 30 mm², permite contagens da ordem de 150 kcps, com tempo morto de 8 a 10% e resolução espectral melhor que 133 eV para Mn K α . O EDS foi calibrado com padrão de cobre de pureza 99,995% sendo que o tempo e tipo de análise variaram dependendo do objetivo e do material analisado. Para as análises de química mineral foram utilizados tanto o método sem padrão (*standardless*) quanto o com calibração interna com a utilização de padrões para todos os elementos (MAC – *Micro-Analysis Consultants Limited*, blocos de padrões 3890 e 6347). O MEV foi operado em alto vácuo, tensão de aceleração de elétrons entre 20 e 25 kV, e spot size entre 5 e 6,4. O software de coleta e tratamento dos dados foi o Esprit (Bruker) e a rotina de correção utilizada foi o PhiRoZ (Pouchou & Pichoir, 1991; Bastin *et al.*, 1998).

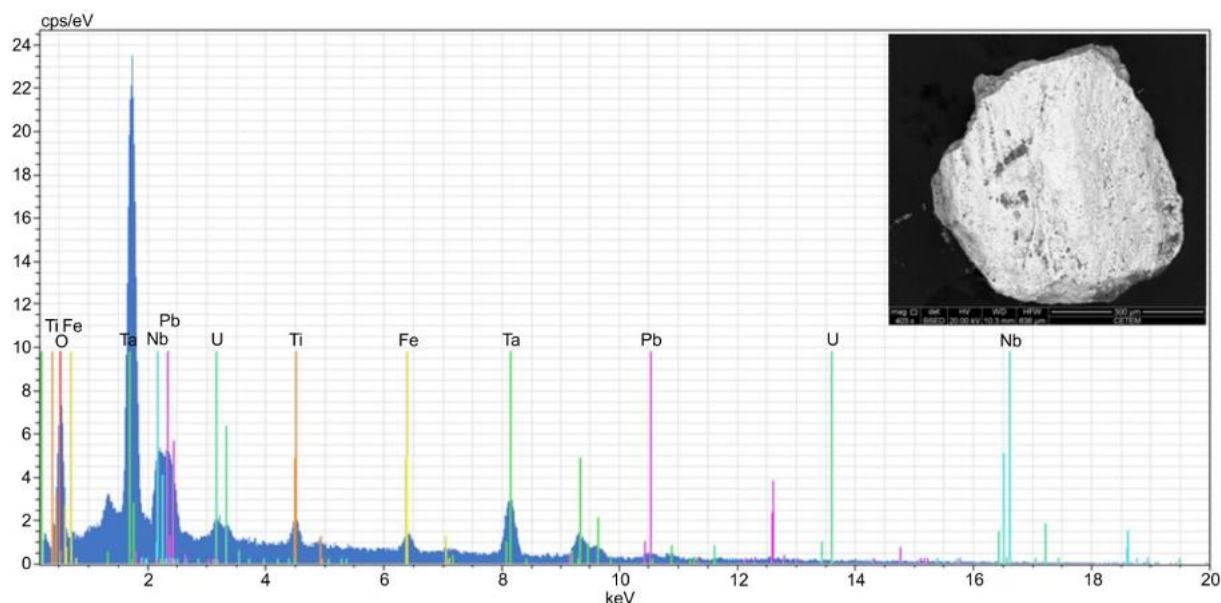


Figura 7 – Espectro EDS entre 0 e 20 keV de um grão de tantalita, no qual é possível observar os elementos identificados a partir das suas raias de energia. A imagem no canto superior direito representa o grão analisado e foi obtida através de elétrons retroespalhados.

Raios-X característicos – Análise por Espectroscopia por Dispersão de Comprimento de Onda (WDS)

Na espectroscopia por dispersão de comprimento de onda (WDS) é possível identificar elementos a partir do Be ($Z = 4$) sendo que cada elemento é identificado separadamente com a utilização de cristais difratores específicos (segundo a lei de Bragg), o que confere uma maior sensibilidade (concentrações menores podem ser identificadas) e resolução (maior separação entre os picos de energia dos elementos presentes). Devido as suas características, o detector WDS comumente é acoplado a uma microsonda eletrônica que, entre outras vantagens e configurações, apresenta maior estabilidade de feixe e melhor vácuo.

As análises de microsonda eletrônica utilizadas na presente tese foram geradas no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia. O equipamento utilizado foi uma microsonda Jeol JXA-8230 operando a 15 kV e 20 nA e com feixe eletrônico focalizado (*spot mode*). Os padrões utilizados foram os pertencentes ao próprio laboratório e dependeram das amostras analisadas.

4.8 Análise geocronológica

Análises U-Pb em grãos de zircão por meio de LA-ICPMS (espectroscopia de massa com plasma indutivamente acoplado e amostragem por ablação laser) foram

realizadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo (CPGeo-IGc-USP). Grãos de zircão de quatro corpos pegmatíticos, que são intrusivos em diferentes rochas encaixantes (FA03 - metadiorito Brumado; FA08 - metagranitoide Ritápolis; FA12 - sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes; e FA13 - ortognaisse Cassiterita), foram manualmente selecionados sob estereomicroscópio ótico, montados em resina epoxy, desbastados e polidos. Depois de fotografadas em luz refletida e transmitida, as amostras foram metalizadas com ouro e imageadas com catodoluminescência, de modo a revelar a presença de possíveis feições, tais como porções herdadas, zonamento interno e bordas de sobrecrecimento dos grãos e, assim, definir as áreas propícias para as análises. Os grãos de zircão mostram razão tamanho/comprimento médio de 2:1 e, quando possível, tanto o núcleo quanto a borda do grão foram analisados.

O equipamento utilizado para a coleta dos dados isotópicos foi um espectrômetro de massa multicoletor com plasma indutivamente acoplado, modelo Neptune da Thermo-Fisher, com laser de ArF de 193 nm da Photon Machines, operando a uma frequência de 6 Hz e intensidade de 6 mJ produzindo um spot de 29 μm . A correção do fracionamento da razão $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ induzido pelo laser segue a regressão linear apresentada por Košler *et al.* (2002). As análises *in situ* em grãos de zircão seguiram o método de correção padrão/amostra em relação ao padrão de zircão GJ-1 (idade média U-Pb de $601 \pm 3,5$ Ma; Jackson *et al.*, 2004). Os dados analíticos foram obtidos em conjuntos de 2-3 planilhas Excel incluindo dois brancos, três análises do padrão GJ-1, treze pontos em grãos de zircão desconhecidos, seguido de mais dois brancos e duas análises no padrão seguindo a rotina proposta por Sato *et al.* (2010). Os teores de ^{202}Hg controlaram os teores de Pb comum presente. Os dados brutos foram processados on-line e reduzidos em uma planilha Excel (Sato *et al.*, 2009; 2010) adaptada do software SQUID 1.02 (Ludwig, 2001). Os dados finais foram plotados em diagramas Concordia através do software ISOPLOT/Ex® 3.00 (Ludwig, 2003).

4.9 Mapa geológico integrado

O mapa geológico confeccionado na presente tese (escala 1:50.000) é o resultado do levantamento realizado na região pela equipe do projeto durante os últimos 30 anos conjuntamente com a interpretação de imagens aerogeofísicas

magnetométricas e gamaespectrométricas realizados pela CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais) em 2001. As principais fontes utilizadas envolveram trabalhos científicos publicados (Francesconi *et al.*, 1975; Quéméneur *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2003), material inédito de trabalhos de graduação (Costa, 2010; Stohler, 2011; Oliveira, 2011; Souza, 2013; Guerra, 2014), dissertações de mestrado (Uchoa, 2006; Souza, 2009) e teses de doutorado (Francesconi, 1972; Ávila, 2000; Toledo, 2002). A base cartográfica foi feita a partir de folhas do IBGE em escala 1:50.000 (SF-23-X-A-IV-4/São Tiago; SF-23-X-A-V-3/Jacarandira; SF-23-X-A-V-4/Resende Costa; SF-23-X-C-I-2/Nazareno; SF-23-X-C-II-1/São João del Rei; SF-23-X-C-II-2/Tiradentes).

5 REVISÃO SOBRE PEGMATITOS GRANÍTICOS

5.1 Introdução

A definição, o estudo e a classificação de pegmatitos remontam ao início do século 19, sendo primeiramente definido pelo mineralogista francês René Just Haüy (1743-1822) e descrito por Brongniart (1813) como uma rocha cristalina composta essencialmente por feldspato lamelar e quartzo, conhecido também por granito gráfico. Landes (1933a) ampliou a mineralogia presente e definiu os pegmatitos como rochas intrusivas holocristalinas compostas essencialmente por minerais que se desenvolveram, em parte, em grandes cristais individuais, quando comparados ao seu equivalente plutônico normal. Vinte anos depois, Jahns (1953) usava ainda a mesma definição de pegmatito, realçando o fato de estes corpos desenvolverem cristais gigantes, bem como também discutiu a sua gênese e formação. No decorrer das décadas seguintes, diversos outros autores (e.g. Jackson, 1997) apresentaram definições próprias de pegmatitos, mas sempre seguindo a mesma tendência de corresponderem a rochas ígneas de granulação muito grossa, com composição geralmente granítica e enriquecida em elementos raros.

A definição mais atual foi apresentada por London (2008), pela qual um pegmatito é essencialmente uma rocha ígnea, comumente de composição granítica, distinguindo-se de outras rochas ígneas devido a sua granulação muito grossa, apesar de extremamente variável, ou pela abundância de cristais com texturas de crescimento direcionais como, por exemplo, textura gráfica e esquelética. Essa definição deixa claro que sua composição pode ser um pouco diferente da granítica *stricto sensu*, já que em pegmatitos quimicamente “complexos” muitos dos minerais presentes podem estar enriquecidos em elementos como Li, P, F, Ta, B, Nb, Be, Rb, Cs e ETR. Porém, segundo Heinrich (1953) as diferenças entre pegmatitos simples e complexos são mais mineralógicas do que químicas, bem como mais aparentes do que reais. London & Morgan (2012) citaram que menos de 1% em volume dos pegmatitos de um determinado distrito podem apresentar composição complexa. Uma segunda característica dessa definição é que ela não se limita apenas ao tamanho dos grãos, mas também à presença de diferentes texturas, que podem estar presentes nos corpos pegmatíticos.

5.2 Origem e Formação

Ainda um tema controverso, a origem de pegmatitos tem sido discutida desde o século 19 e, até meados de 1920, todos os modelos conceituais atualmente conhecidos já haviam sido propostos (London & Morgan, 2012). Trabalhos recentes de London (2011), London & Morgan (2012) e Thomas *et al.* (2012) fizeram uma revisão destes modelos e apresentaram novos dados e conceitos em relação a origem e evolução de corpos pegmatíticos. Abaixo são apresentados resumidamente os principais modelos, suas características e limitações.

5.2.1 Precipitação direta de uma fase aquosa

Propõe que os pegmatitos são depositados em sistemas abertos a partir de fluidos hidrotermais. Esse modelo apresenta duas grandes limitações, sendo a primeira associada à baixa capacidade de carregamento de solutos por soluções aquosas do tipo $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ nas condições de pressão e temperatura de formação de pegmatitos; e a segunda é a ausência de texturas e alterações comumente encontradas nas regiões de contato entre as rochas encaixantes e os veios hidrotermais. Análises de inclusões fluidas e também de *melt inclusions* (fundido magmático) de diversos pegmatitos indicam que os fluidos primários seriam bem mais complexos (ricos em carbonatos e bicarbonatos alcalinos) e capazes de transportar um maior volume de aluminossilicatos reduzindo, ou mesmo evitando, o aparecimento da alteração hidrotermal clássica nas rochas hospedeiras (Thomas *et al.*, 2011).

5.2.2 Cristalização de um líquido silicático por meio da interação com uma fase fluida aquosa

Este modelo, segundo Landes (1933a), é caracterizado por dois estágios: i) fracionamento do magma, no qual o líquido residual rico em H_2O e outros elementos, formaria pegmatitos simples, tanto no próprio corpo parental, quanto nas rochas encaixantes; e ii) pegmatitos complexos, que seriam formados a partir da interação de fluidos hidrotermais, reagindo e dissolvendo os minerais precursores já cristalizados. A origem desses fluidos pode ser o próprio magma pegmatítico ou algum fluido residual do magma parental. As limitações deste modelo são as

mesmas do anterior, pois um fluido aquoso não é suficiente para solubilizar os elementos eficientemente.

5.2.3 Cristalização a partir de um gel silicático

Este é um antigo modelo que está sendo novamente revisto. Géis reduzem a nucleação e favorecem o desenvolvimento de grandes cristais em temperaturas e pressões mais baixas (Thomas *et al.*, 2012), enquanto sílica géis podem ser meios altamente efetivos em trocas iônicas entre os materiais presentes, explicando o enriquecimento em alguns elementos traços encontrados em pegmatitos. A presença de inclusões de sílica gel e cristobalita como fase sólida em inclusões fluidas, bem como as inclusões de minerais bem cristalizados, como o topázio e a apatita, em opalas são fortes indícios da importância de um gel silicático na formação de pegmatitos. Thomas *et al.* (2012) enfatizam que este modelo pode não ser o único processo formador de pegmatitos, mas pode ser um passo intermediário ou final do processo como um todo.

5.2.4 Cristalização a partir de um líquido silicático rico em fundentes

Este modelo é baseado no efeito de que altas concentrações de elementos fundentes reduzem a viscosidade do magma e assim promovem as elevadas taxas de difusão e o crescimento de cristais e, ao mesmo tempo, inibem as taxas de nucleação. Os elementos fundentes tradicionais são o B, P e F associados a H₂O. Porém estudos recentes têm demonstrado que existem outros potenciais fundentes ou modificadores (*e.g.* Thomas & Davidson, 2012) como OH⁻, CO₂, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, H₃BO₃, Cl, Li, Na, K, Rb, Cs e Be. Para a cristalização de um determinado mineral é necessário não apenas que seus elementos formadores estejam em concentração suficiente e que o sistema esteja em seu campo de estabilidade (T, P, *f*O₂, pH entre outros parâmetros), mas também que os mesmos requisitos sejam atingidos para os elementos modificadores. Por exemplo, caso OH⁻ e CO₃²⁻ estejam presentes como modificadores, alterações na P e T de um determinado corpo irão transformá-los para H₂O e CO₂, alterando o volume e a viscosidade do magma, afetando diretamente a geração de espaços para a formação e colocação do pegmatito.

5.2.5 Cristalização de um magma granítico das margens para o centro

Modelo no qual o material cristalizado nas bordas de um corpo não reage nem se reequilibra com o líquido residual que vai se tornando cada vez mais rico em elementos incompatíveis, bem como em elementos fundentes e/ou modificadores. O resultado é um corpo que exhibe um aumento do fracionamento químico em direção ao seu centro. É um modelo amplamente aceito e atualmente se discute a importância da H_2O e outros fundentes ou modificadores na formação dos pegmatitos, assim como a real necessidade de um superesfriamento (resfriar abaixo da temperatura do *solidus*) antes da cristalização do pegmatito.

5.3 Classificação de pegmatitos

Segundo Zagorsky *et al.* (2003) cerca de 40 tipos de classificação de pegmatitos já haviam sido propostos, com base em diferentes critérios e suas combinações. A princípio, a classificação era simples e baseada principalmente nas observações de campo e composição, como por exemplo, a apresentada por Landes (1933b), que agrupava os pegmatitos em simples ou complexos, segundo sua mineralogia. Com a evolução do conhecimento, diversos outros critérios começaram a ser utilizados, como por exemplo, sua estrutura interna, as relações paragenéticas, composição química global ou as assinaturas geoquímicas presentes. Segundo Černý & Ercit (2005), a aplicação e o grau de sucesso dessas diferentes propostas esbarraram nas limitações de conhecimento (geológico e petrológico) dos próprios autores, assim como na tentativa de usar um único critério para classificar todos os pegmatitos.

O sistema de classificação mais utilizado atualmente é o apresentado por Černý & Ercit (2005), que se baseia principalmente nos trabalhos russos de Ginsburg & Rodionov (1960 apud Černý & Ercit, 2005), Ginsburg *et al.* (1979 apud Černý & Ercit, 2005) e de Černý (1991). Este sistema classifica os corpos pegmatíticos segundo duas abordagens complementares, sendo a primeira baseada no contexto geológico/geoquímico (abissal, muscovita, muscovita/elementos raros, elementos raros e miarolítica) e a segunda a partir de informações petrogenéticas dos corpos, separando-os em duas famílias: LCT e NYF.

A tabela 3 apresenta as principais subdivisões e características das cinco classes descritas por Černý & Ercit (2005), assim como a que família pertencem.

Existem outros sistemas de classificação, como o apresentado por Zagorsky *et al.* (2003), que utiliza três níveis de classificação subordinados, baseados em formações (subformações), evolução geoquímica e tipos paragenéticos. Estes autores usaram ainda outro fator discriminante, a pressão em que os corpos começam a se cristalizar, para agrupar as formações em pegmatitos de baixa pressão (<2,5 kbar), de moderada pressão (2 a 5 kbar) e de alta pressão (>5 kbar). Esse sistema de classificação, assim como outros, não encontrou a aplicabilidade do sistema apresentado por Černý & Ercit (2005).

Tabela 3 – Esquema de classificação de pegmatitos adaptado de Černý & Ercit (2005) e Černý *et al.* (2012).

Classe Subclasse	Elementos menores típicos	Ambiente metamórfico	Família
Miarolítica (MI)			
<i>MI-ETR</i>	Y, ETR, Ti, U, Th, Zr, Nb, F	Muito baixa P, posterior a eventos metamórficos que afetam as rochas hospedeiras	NYF
<i>MI-Li</i>	Li, Be, B, F, Ta>Nb	Anfibolito baixa P até xisto verde, 3 a 1,5 kbar, 500 a 400 °C	LCT
Elementos raros (ER)			
<i>ER-ETR</i>	Be, Y, ETR, U, Th, Nb>Ta, F	Variável, eventos regionais raros e tardios afetando as rochas hospedeiras	NYF
<i>ER-Li</i>	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Hf, Nb-Ta, B, P, F	Baixa P, fácies anfibolito (andaluzita-silimanita) até xisto verde alto, ~2 a 4 kbar, ~650 a 450 °C	LCT
Muscovita - Elementos raros (MSER)			
<i>MSER-ETR</i>	Be, Y, ETR, Ti, U, Th, Nb-Ta	Moderada a alta P, fácies anfibolito (cianita-silimanita), 3 a 7 kbar, ~650 a 520 °C	NYF
<i>MSER-Li</i>	Li, Be, Nb		LCT
Muscovita (MS)			
	Sem mineralização em elementos raros (micas e feldspatos)	Alta P, fácies anfibolito, 5 a 8 kbar, ~650 a 580 °C	-
Abissal (AB)			
<i>AB-ETR pesados</i>	ETR, Y, Nb, Zr, U, Ti	Anfibolito superior até granulito, ~4 a 9 kbar, ~700 a 800 °C	NYF
<i>AB-ETR leves</i>	ETR leves, U, Th, Ti		-
<i>AB-U</i>	U, Th, Zr, ETR leves		NYF
<i>AB-BBe</i>	B, Be		LCT

As classes apresentadas na tabela 3 são baseadas na pressão (e em parte na temperatura) descritas para as rochas hospedeiras dos pegmatitos. Essas condições de P-T devem ser consideradas como as estimativas máximas do ambiente, já que refletem o pico do metamorfismo antes da intrusão do pegmatito e não a

temperatura do pegmatito em si. A figura 8 apresenta um diagrama com as temperaturas e pressões estimadas para as diferentes classes de pegmatitos. As classes MS e MSER assim como a ER e MI podem ser transicionais entre si.

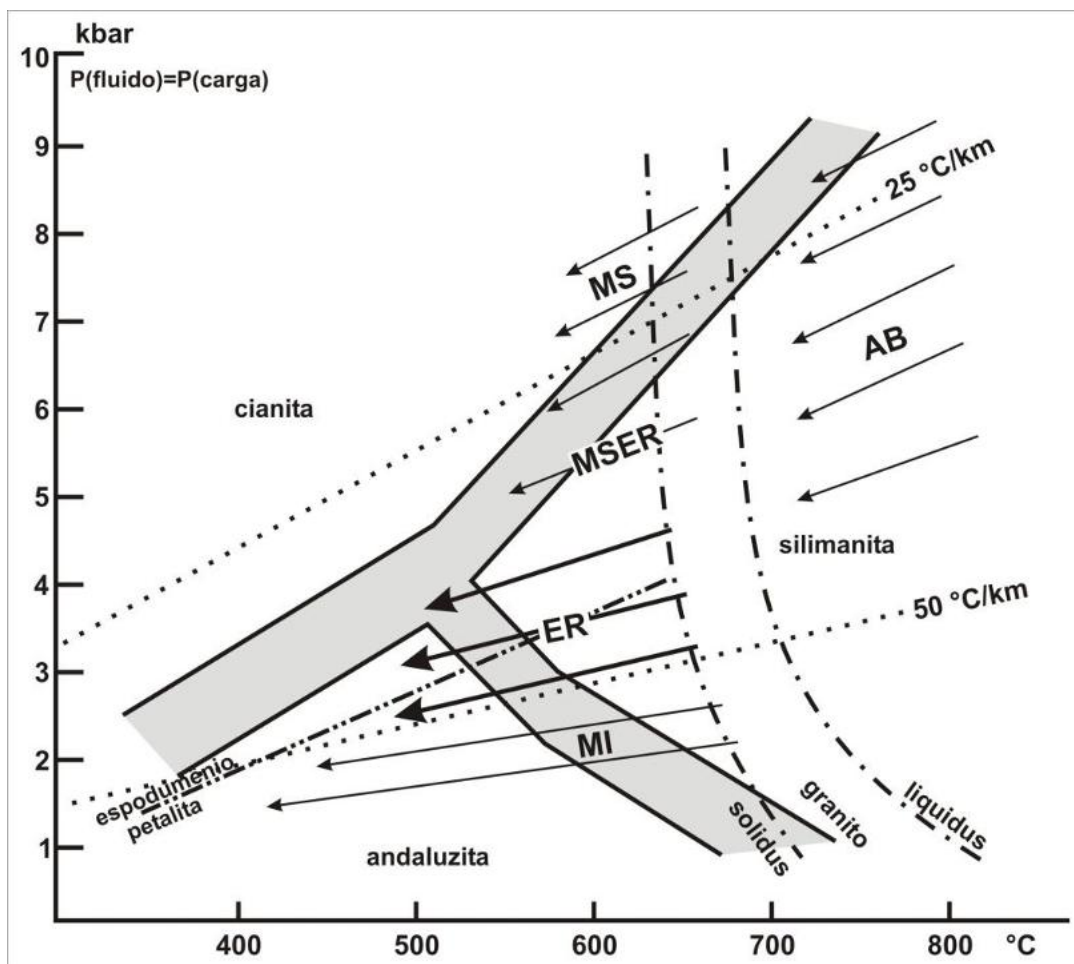


Figura 8 – Campos P-T esquemáticos das rochas hospedeiras em que ocorrem os pegmatitos da classe abissal (AB), muscovita (MS), muscovita – elementos raros (MSER), elementos raros (ER) e miarolítica (MI). As setas pretas representam tendências regionais de fracionamento dos pegmatitos relativo ao grau metamórfico das rochas hospedeiras (segundo Černý & Ercit, 2005).

Em contraste com a subdivisão em classes, baseada principalmente em uma proposta descritiva do ambiente geológico em que os corpos foram formados, uma segunda classificação petrogenética, separando os corpos em duas famílias, foi igualmente proposta por Černý & Ercit (2005). Esta classificação se baseia no fato de que, na medida em que os corpos pegmatíticos são derivados de plútons graníticos, ambos apresentarão semelhantes assinaturas geoquímicas de seus elementos traço. Neste caso a família NYF é enriquecida em nióbio, ítrio e flúor e a família LCT enriquecida em lítio, céσιο e tântalo. A única classe que não pôde ser

colocada em uma família foi a “Muscovita (MS)” devido à falta de dados petrológicos, geoquímicos ou isotópicos que pudessem comprovar a sua fonte como sendo um magma granítico. Vale ressaltar que os corpos pegmatíticos não precisam ser necessariamente ricos nos três elementos, bem como os elementos característicos de outra família podem ocorrer, ainda que em menor concentração. Existem ainda casos em que os corpos pegmatíticos apresentam assinatura combinada de duas famílias.

A maioria dos pegmatitos com assinatura LCT tem afinidade composicional com granitos do tipo S, de natureza peraluminosa e são progressivamente enriquecidos em Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ta, Nb (com $Ta > Nb$) e também em B, P e F. Esse contém predominantemente minerais de lítio (espodumênio, petalita, lepidolita e elbaíta); quando enriquecido em Cs podem apresentar polucita; e é comum a presença de diferentes tipos de turmalina. Os pegmatitos podem apresentar zonação entre columbita e tantalita, ficando mais enriquecidos em Ta em direção ao centro do corpo. O magma parental desta família pode ter como fonte a fusão de rochas metassedimentares ou metavulcânicas não depletadas da crosta superior ou a anatexia parcial de rochas (meta) ígneas do embasamento. Em ambos os casos, o protólito deve gerar magmas leucograníticos durante os primeiros eventos de fusão (Černý & Ercit, 2005). Segundo Martin & De Vito (2005), pegmatitos litiníferos ricos em fósforo e cério são diagnósticos de fonte do tipo S para os pegmatitos da família LCT.

Os pegmatitos da família NYF são marcados pela presença de óxidos quimicamente complexos que contém ETR pesados, Ti, U, Th e $Nb > Ta$. São depletados em fósforo, a presença de turmalina é incomum e, quando enriquecidos em flúor, apresentam abundante fluorita e topázio. Tem afinidade com granitos sub a metaluminosos do tipo A e, baseados em dados geológicos, geoquímicos e isotópicos, Černý & Ercit (2005) sugerem diversas possibilidades para geração do magma parental: diferenciação direta de magmas basálticos do manto; fusão de protólitos da crosta intermediária ou inferior já depletados em elementos LCT; fusão de rochas ígneas juvenis não depletadas em ambiente orogênico; ou fusão de crosta sílica previamente enriquecida em elementos NYF por fluidos derivados do manto. Em locais onde o ambiente tectônico é bem conhecido, granitos tipo A e pegmatitos da família NYF podem estar associados a *hot spots* ou riftes intracontinentais.

5.4 Mineralogia de pegmatitos graníticos

Um pegmatito pode apresentar, além dos minerais básicos (quartzo e feldspato), cerca de uma dezena de minerais, entre eles alguns raros ou incomuns. Essa mineralogia complexa reflete diretamente a evolução de determinado corpo ou conjunto de corpos pegmatíticos e pode ainda fornecer importantes informações sobre a gênese destes corpos. A seguir, serão descritos os principais minerais ou grupos minerais que ocorrem em pegmatitos, assim como suas principais características e as informações petrológicas que podem ser obtidas a partir do seu estudo.

Quartzo

Geralmente apresenta-se anédrico e maciço ocorrendo de forma intersticial entre feldspatos ou outros minerais. Hábitos esqueletal ou textura gráfica também são comuns.

Composicionalmente, o quartzo apresenta-se praticamente puro com impurezas representando menos que 0,1 % em peso. Além do H, Al, Fe^{3+} , P e Ti são os principais elementos que substituem o Si. O Al é a substituição mais comum ($\text{M}^+\text{Al}^{3+} = \text{Si}^{4+}$) e a compensação de carga é feita com a adição de Li, Na ou H (como M^+) nos interstícios entre Si e O (Stenina *et al.*, 1984). Devido a essa característica, as principais informações petrológicas são obtidas através do estudo de inclusões fluidas (*e.g.* Roedder, 1984) que são geralmente aquosas, bifásicas (vapor, líquido), com baixa a moderada salinidade e comumente contendo CO_2 e pouco ou nenhum CH_4 . O ponto mais importante a ser observado no estudo de inclusões fluidas é verificar o grau de recristalização do quartzo, pois as informações originais podem ser mascaradas ou completamente apagadas.

Feldspato

O feldspato compõe aproximadamente 2/3 do volume de um pegmatito típico e consiste predominantemente de soluções sólidas entre anortita-albita e polimorfos de K-feldspato (London, 2008). A maioria dos pegmatitos contém dois feldspatos, sendo o plagioclásio próximo à composição da albita e o K-feldspato com teores

variáveis de Ab. Pegmatitos com feldspatos de composição ternária (An-Ab-Or) são raros.

A utilização de feldspatos como indicadores petrológicos é menos comum se comparada com outros aspectos da petrologia ígnea devido à crença de que esses minerais sofrem processos de recristalização e podem não atingir completo reequilíbrio durante sua história de formação (e.g. Brown & Parsons, 1981). Essa crença é bem exemplificada na ocorrência da textura pertítica (exsolução de lamelas de Ab em um hospedeiro potássico) que representa extensa recristalização da fase primária e onde a composição inicial do feldspato é modificada e pode ser totalmente perdida. A utilização de análises totais (*bulk analysis*) ou análises de microsonda ponderadas em conjunto com acompanhamento petrográfico, análises de catodoluminescência, assim como de microscopia eletrônica de varredura podem contornar as limitações acima citadas (Fuhrman & Lindsley, 1988; Elkins & Grove, 1990).

Micas

São constituintes comuns na maioria dos pegmatitos e apesar de apresentarem baixa proporção em volume, pegmatitos peraluminosos podem ser extremamente ricos em muscovita. Pegmatitos simples podem apresentar tanto biotita quanto muscovita, sendo que os pegmatitos da família LCT apresentam muscovita (predominante) e lepidolita, enquanto pegmatitos da família NYF apresentam biotita (rica em Fe) e também zinnwaldita (rica em Li e F), quando mais evoluídos. Tanto lepidolita quanto zinnwaldita são nomes de séries de micas trioctaédricas com composições intermediárias entre trillitionita e polilitionita e entre siderofilita e polilitionita, respectivamente (Rieder *et al.*, 1998).

As micas podem ser utilizadas como indicadores da proveniência de pegmatitos e apresentam tendências de fracionamento químico semelhante ao encontrado nos feldspatos e turmalinas, com Fe e Mg decrescendo em detrimento ao Li, Rb, Mn e F.

Aluminossilicatos de Li

Os principais aluminossilicatos de lítio encontrados em pegmatitos são o espodumênio (piroxênio monoclínico, α -LiAlSi₂O₆), a petalita (LiAlSi₄O₁₀) e a

eucryptita (LiAlSiO_4). A bikitaíta ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) é muito rara e se origina geralmente pela alteração de petalita/espodumênio preexistentes. Quimicamente estes minerais em pegmatitos apresentam-se muito puros (impurezas são traços) e somente o espodumênio pode conter níveis percentuais de Fe^{3+} , Mn^{3+} e Cr^{3+} em substituição ao alumínio (London, 2008).

As reações entre os diferentes aluminossilicatos de Li envolvem apenas sílica e, segundo os trabalhos apresentados por London & Burt (1982) e London (1984), nas condições de saturação em quartzo encontradas em pegmatitos, essas reações são função direta da temperatura e pressão e independentes da natureza, composição e proporção de outras fases presentes. Assim as relações de estabilidades entre esses minerais são importantes para interpretação da história de resfriamento de um pegmatito, assim como das inclusões sólidas e fluidas que contêm (London, 2008).

Fosfatos

A variedade de fosfatos que podem ocorrer em pegmatitos é tão grande quanto a de silicatos (London, 1996), sendo fluorapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$], cloroapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$] e hidroxilapatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] os mais comuns. Monazita-(Ce) (CePO_4), Monazita-(La) (LaPO_4), Monazita-(Nd) (NdPO_4) e xenotímio-(Y) (YPO_4) ocorrem como fases acessórias em pegmatitos, tanto da família LCT quanto da NYF. No caso da família NYF, por ser depletada em fósforo, esses dois minerais representam os mais importantes portadores de elementos terras raras. Montebrasita [$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$] e ambligonita [$(\text{Li},\text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$] são comuns em pegmatitos ricos em lítio. Diversos fosfatos máficos (de Mg, Fe, Mn) como litiofilita-trifilita e triplita-zwieselita ocorrem como fases primárias em pegmatitos da família LCT.

As principais informações que podem ser obtidas com assembleias minerais fosfáticas primárias e secundárias são a proveniência do pegmatito, conteúdo de fósforo no magma original (agente fundente) e também a composição dos fluidos aquosos associados à alteração destes pegmatitos (London, 2008). Cabe ressaltar que o caminho percorrido durante as alterações, assim como a composição final das fases fosfáticas geradas são diretamente dependentes da química/mineralogia local, sendo preponderante o estudo da paragênese e não apenas do mineral em si.

Turmalina

A turmalina é o mais importante carreador de boro encontrado em pegmatitos (London, 2008). Ocorre geralmente nas bordas dos corpos ou como alteração das encaixantes, pois são as regiões onde há disponibilidade de Fe e Mg, componentes essenciais na formação de turmalinas e que geralmente estão ausentes em magmas pegmatíticos originais.

A fórmula geral dos minerais do grupo da turmalina é $XY_3Z_3(BO_3)_6O_{18}V_3W$ (Hawthorne & Henry, 1999). Para turmalinas que ocorrem em pegmatitos, o sítio X é normalmente ocupado por Na ou apresenta vacância, o sítio Y contém Fe^{2+} , Fe^{3+} e Al e pode conter Mg (próximo as bordas do corpo), Li, Mn e Ti. O sítio Z contém basicamente Al, mas pode apresentar traços de Fe^{3+} , Mg, Cr ou V. Os sítios tetraédricos T são ocupados por Si e eventualmente por Al, os sítios V por OH ou O e os sítios W por OH, O ou F.

Medidas qualitativas de fracionamento do magma, variações na alcalinidade e nos estados de oxidação do magma podem ser obtidos através do estudo das turmalinas. Devido ao B ser um eficiente fundente para magmas silicáticos, sua presença altera as propriedades do magma original e essa informação permanece registrada nas turmalinas e na sua história de cristalização (London, 2008).

Topázio e outros minerais de flúor

Apatita, lepidolita e topázio são os principais minerais de flúor encontrados em pegmatitos (London, 2008), porém devido à fácil substituição de OH por F, outras espécies minerais como anfibólios, micas e turmalinas podem apresentar importantes teores de F. A fluorita (CaF_2) não é comum mas pode ser encontrada em pegmatitos da família NYF, apresentando ainda enriquecimento em elementos terras raras, mais notadamente em Y. O topázio ocorre como cristais euédricos em cavidades miarolíticas quando encontrados nos pegmatitos da família LCT ou como massas anédricas finas em pegmatitos da família NYF.

O flúor, assim como o boro e o fósforo, pode ser um importante componente de um magma formador de pegmatitos na medida em que reduz sua temperatura de fusão e sua viscosidade, podendo alterar até sua composição (Manning, 1981). London *et al.* (2001) apresentam um modelo de calibração do F no magma precursor a partir do estudo da solução sólida montebrasita-ambligonita.

Óxidos de Nb, Ta, Sn, Ti, Fe e V

Os óxidos mais importantes encontrados em pegmatitos são cassiterita (SnO_2), minerais do grupo da columbita-euxenita [principalmente a solução sólida $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$], minerais do supergrupo do pirocloro [particularmente dos grupos da microlita, solução sólida $(\text{Na,Ca})_2(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6(\text{OH,F})$, e da betafita $(\text{Ca,U})_2(\text{Ti,Nb,Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})$], ilmenita (TiFeO_3), magnetita (Fe_3O_4), tapiolita (FeTa_2O_6) e rutilo com Nb $[(\text{Ti,Nb,Fe}^{3+})\text{O}_2]$. Fases raras como ixiolita, wodginita, samarskita, fergusonita, uraninita e euxenita também podem ocorrer.

Em geral o grupo columbita-euxenita apresenta extensa solução sólida e possui fórmula geral $\text{A}_n\text{B}_m\text{O}_x$ (London, 2008) onde o sítio A pode conter principalmente Fe, Mn mas também Ca, Na, ETR, Y, Th, U, Sb, Al e Cs; e o sítio B pode ser ocupado por Ti, Nb, Ta e Sn. Para estes minerais, as razões Mn/Fe e Ta/Nb são bons indicadores do fracionamento de um corpo, sendo mais altas em corpos mais evoluídos. As fases mais desordenadas (e.g. ixiolita e wodginita) apresentam os cátions dos sítios A e B ocupados aleatoriamente em um único sítio apresentando fórmula geral MyOx .

Segundo London (2008), as aplicações petrológicas desses minerais estão apenas começando a ser descobertas e entendidas, principalmente devido a sua complexidade química. Relações entre a cristalização de fases mais ou menos ordenadas e a história de cristalização (temperaturas) de um corpo pegmatítico foram investigadas, porém nenhuma tendência de que alguma associação desse tipo ocorra foi comprovada.

Granada

A granada é um mineral acessório comum em corpos pegmatíticos originados a partir de fontes aluminosas, incluindo pegmatitos da família LCT assim como outros pegmatitos menos desenvolvidos que tem como fonte magmas graníticos do tipo I e S. Em pegmatitos da família NYF não é um mineral tão comum, pois estes tendem a ser metaluminosos ou mesmo alcalinos, assim como os magmas graníticos tipo A do qual eles derivam (Smeds, 1994). Pode apresentar solução sólida entre spessartina ($\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) e almandina ($\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$), mas é predominantemente composta pela fase manganesífera. A razão $\text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$ tende a aumentar com o

fracionamento do corpo e é comum encontrarmos nestes ambientes cristais com o núcleo rico em Mn (spessartina) e a borda enriquecida em Fe (almandina).

Berilo (e outros minerais de Be)

Berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) é o mineral mais comum em pegmatitos da família LCT e a gadolinita-(Y) $[(\text{Y},\text{Ce})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}]$ o principal mineral de Be encontrado em pegmatitos da família NYF (London, 2008). Crisoberilo (BeAl_2O_4) também pode ser encontrado, porém está restrito a zonas de alteração em contato com rochas ultramáficas. Outras fases raras incluem bertrandita $[\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2]$, euclásio $[\text{BeAlSiO}_4(\text{OH})]$, bavenita $[\text{Ca}_4\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26}(\text{OH})_2]$ entre outros. Devido à baixa concentração natural de Be em magmas silicáticos, a presença de berilo em rochas ígneas é um indicador de alto grau de fracionamento e eficiente extração de líquidos residuais. Variações nos teores de Fe, Na, Li e, principalmente Cs, também são indicadores de fracionamento em pegmatitos já altamente evoluídos.

Polucita

É o mais importante mineral de cério ($\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$, Pol) e ocorre apenas em pegmatitos da família LCT altamente fracionados. Forma solução sólida com analcima ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Anl) e leucita (KAlSi_2O_6). A composição da polucita primária varia entre $\text{Pol}_{85}\text{Anl}_{15}$ e $\text{Pol}_{75}\text{Anl}_{25}$ e, em assembleias secundárias, é possível encontrar analcima rica em Cs e polucita pura. Assim como ocorre com o Be, a presença de minerais de Cs indicam um alto fracionamento e eficiente extração de líquidos silicáticos residuais saturados em Cs, marcando o mais alto grau de saturação química em magmas graníticos (London, 2013).

Zircão

Comum na maioria dos pegmatitos, o zircão (ZrSiO_4) é mais abundante nos elementos raros da família NYF e nos pegmatitos feldspáticos da família LCT. Em grãos de zircão dessa última família, a razão Zr/Hf decresce à medida que aumenta o fracionamento químico (e.g. von Knorring & Hornung, 1961; Wang *et al.*, 1996; Pereira *et al.*, 2003).

6 GEOLOGIA REGIONAL E EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DA ÁREA DE ESTUDO

6.1 Introdução

A área de estudo da presente tese é composta por um enxame de corpos pegmatíticos mineralizados em cassiterita, columbita, tantalita, microlita e espodumênio (Guimarães & Guedes, 1944; Francesconi, 1972), os quais foram reunidos por Pereira *et al.* (2003) na Província Pegmatítica de São João del Rei (Fig. 9). Segundo estes autores, a província ocupa uma área de cerca de 1400 km² (70 km de comprimento por 20 km de largura) e está inclusa no contexto evolutivo do Cinturão Mineiro (Fig. 10), que corresponde a um conjunto de arcos magmáticos paleoproterozoicos, os quais estão localizados no limite sul do cráton São Francisco (Ávila *et al.*, 2010, 2014).

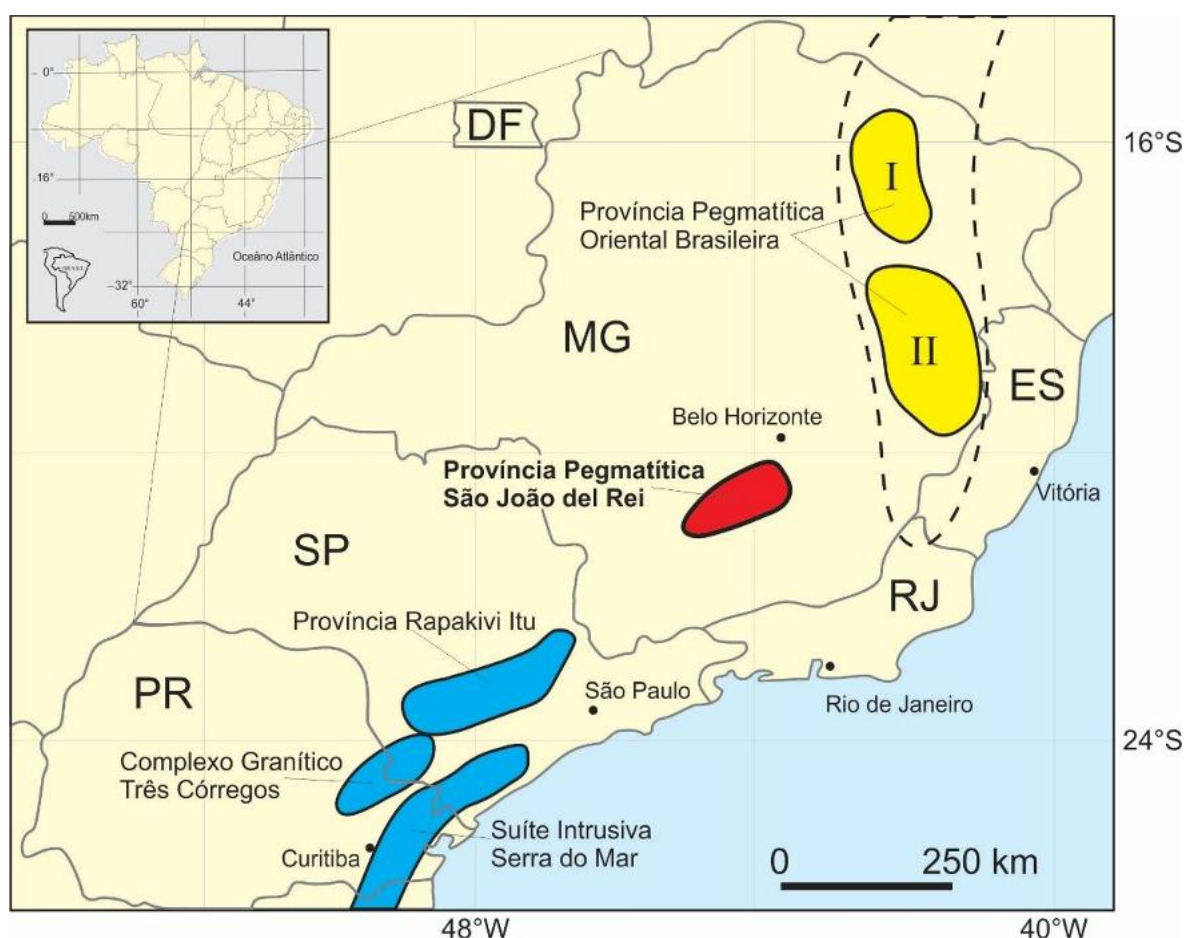
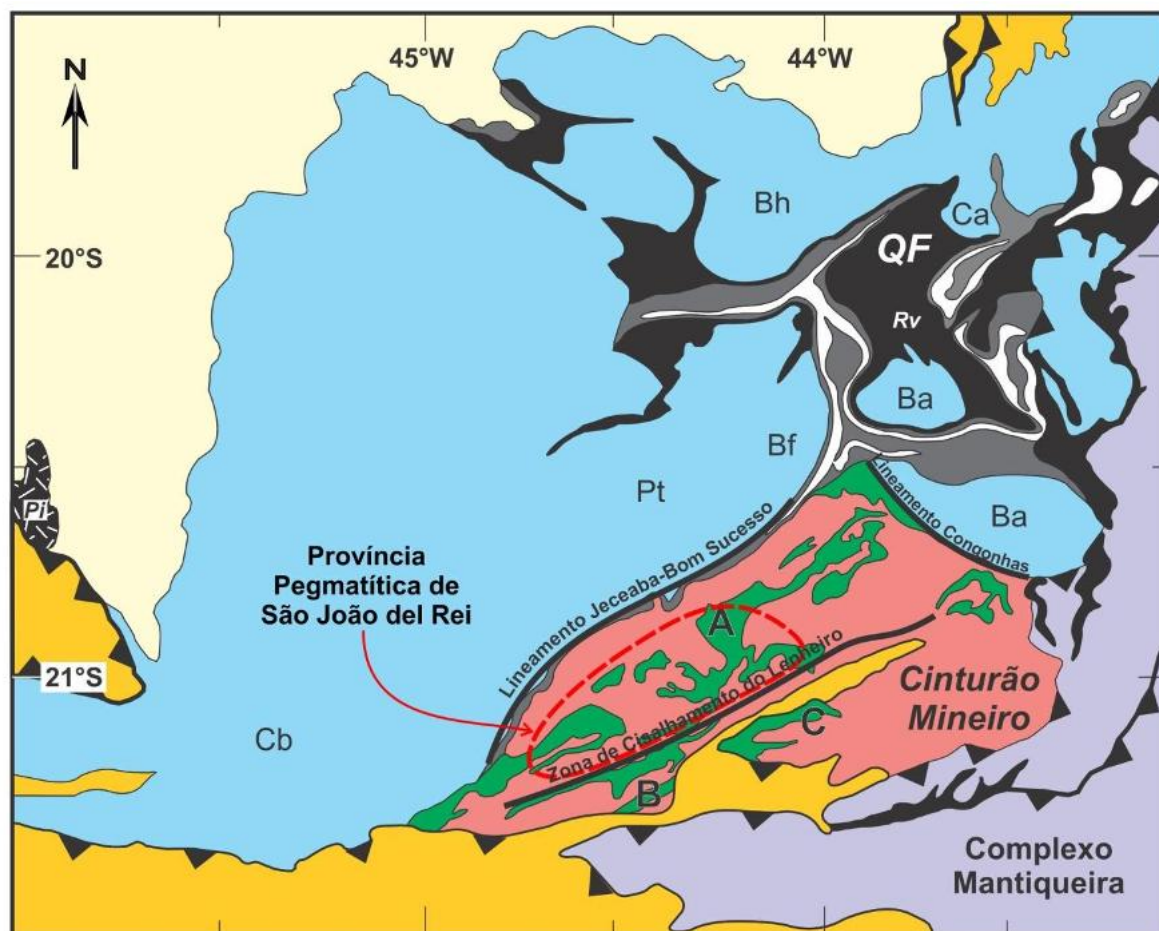


Figura 9 – Mapa com a localização geográfica das províncias pegmatíticas do sudeste brasileiro com destaque para a Província Pegmatítica de São João del Rei no estado de Minas Gerais. Subdivisões da Província Pegmatítica Oriental: I - Campo de Itinga - Araçuaí; II - Campo de Governador Valadares (modificado de Pereira *et al.*, 2008a).



- Grupo Bambuí**
- Faixas Supracrustais (Meso- a Neoproterozoico):** Sequências metassedimentares São João del Rei, Carandá e Andrelândia (xistos, filitos, mármore, quartzitos).
- Complexo Metamórfico Mantiqueira (Paleoproterozoico):** Ortognaisses de alto grau, anfibolitos, metaultramáficas, granulitos ácidos e básicos, kinzigitos e corpos plutônicos não deformados.
- Cinturão Mineiro (Paleoproterozoico):** Corpos plutônicos, incluindo ortognaisses (tonalítico, trondhjemitico, granodiorítico, granítico), gabro, diorito, quartzo-diorito, granodiorito, granito, vulcânicas félsicas e rochas subvulcânicas de fácies xisto verde a anfibolito.
- Sequências Metavulcano-sedimentares (Paleoproterozoico):** A - Rio das Morte (anfibolitos, filitos, gonditos); B - Nazareno (metakomatiitos, anfibolitos, filitos, quartzitos e gonditos) e C - Dores de Campos (anfibolitos, metaultramáficas vulcânicas e plutônicas, quartzitos, filitos e gonditos).
- Supergrupo Minas (Neoarqueano/Paleoproterozoico - Sideriano):** Rochas supracrustais de fácies xisto verde a anfibolito baixo. Rochas metassedimentares clásticas e químicas (cinza) e BIFs tipo Lago Superior (branco).
- Supergrupo Rio das Velhas (Rv - Neoarqueano):** *Greenstone belt* de fácies xisto verde a anfibolito baixo. Metavulcânicas komatiíticas, toleíticas e calcio-alcálinas, metavulcanoclásticas, rochas metassedimentares clásticas e químicas (QF: Quadrilátero Ferrífero, incluindo BIFs tipo Algoma).
- Complexos Gnáissico-migmatíticos (Meso- a Neoarqueano):** TTGs de alto grau, granulitos, intrusões máficas e ultramáficas metamorizadas, sequências metavulcano-sedimentares, intrusões tonalíticas a graníticas e charnockitos. Cb - Campo Belo, Pt - Passatempo, Bf - Bonfim, Ba - Bação, Bh - Belo Horizonte, Ca - Caeté.
- Greenstone belt Piumhi (Pi - Mesoarqueano):** Metaultramáficas, metamáficas e metafélsicas plutônicas e vulcânicas e rochas metassedimentares.

Figura 10 – Mapa geológico da borda meridional do cráton São Francisco enfocando o Cinturão Mineiro (Ávila et al., 2014).

6.2 Esboço geológico regional

Segundo Almeida (1977) o cráton São Francisco tem como limites as faixas Brasília (a sul e oeste), Rio Preto (a noroeste), Riacho do Pontal (a norte), Sergipana (a nordeste) e Araçuaí (a sudeste), todas de idade Brasiliana (Fig. 11). Em sua maior parte o cráton está recoberto por unidades pré-cambrianas (Supergrupo São Francisco) e fanerozoicas, porém seu embasamento arqueano está exposto nas porções norte, leste (blocos Gavião, Jequié, Serrinha e Sobradinho) e sul (complexos Campo Belo, Bonfim, Bação e Belo Horizonte) (Alkmim *et al.*, 1993).

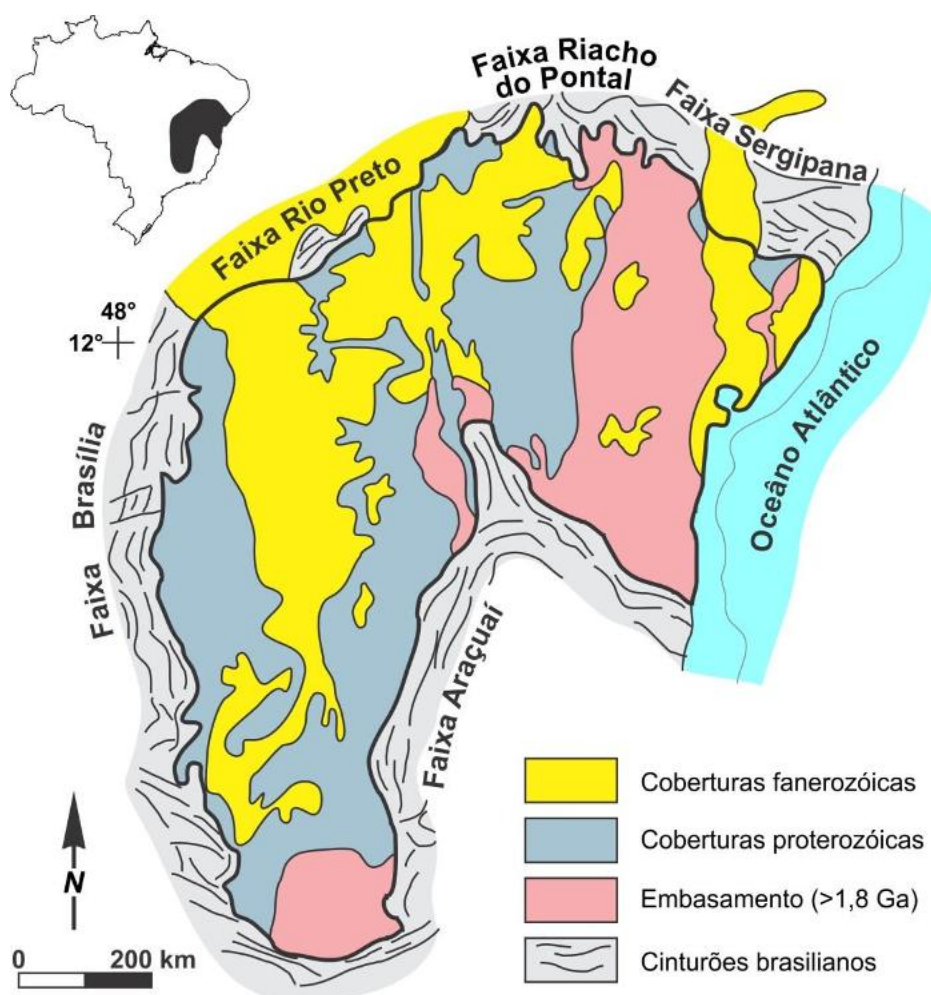


Figura 11 – Mapa geológico simplificado do cráton São Francisco (modificado de Alkmim *et al.*, 1993).

Ao longo do cráton São Francisco foram caracterizados diversos conjuntos de rochas metavulcano-sedimentares e pelo menos dois cinturões magmáticos paleoproterozoicos (Fig. 12a), sendo que o cinturão da porção norte na Bahia foi designado de Itabuna-Salvador-Curaçá (Fig. 12b), localizado entre vários blocos

arqueanos (Jequié, Serrinha, Gavião) e a plataforma continental (Alkmin, 2004). O cinturão da porção sul do cráton São Francisco em Minas Gerais foi designado de Mineiro e está localizado entre os complexos metamórficos arqueanos e as faixas móveis neoproterozoicas Brasília e Ribeira (Fig. 12c).

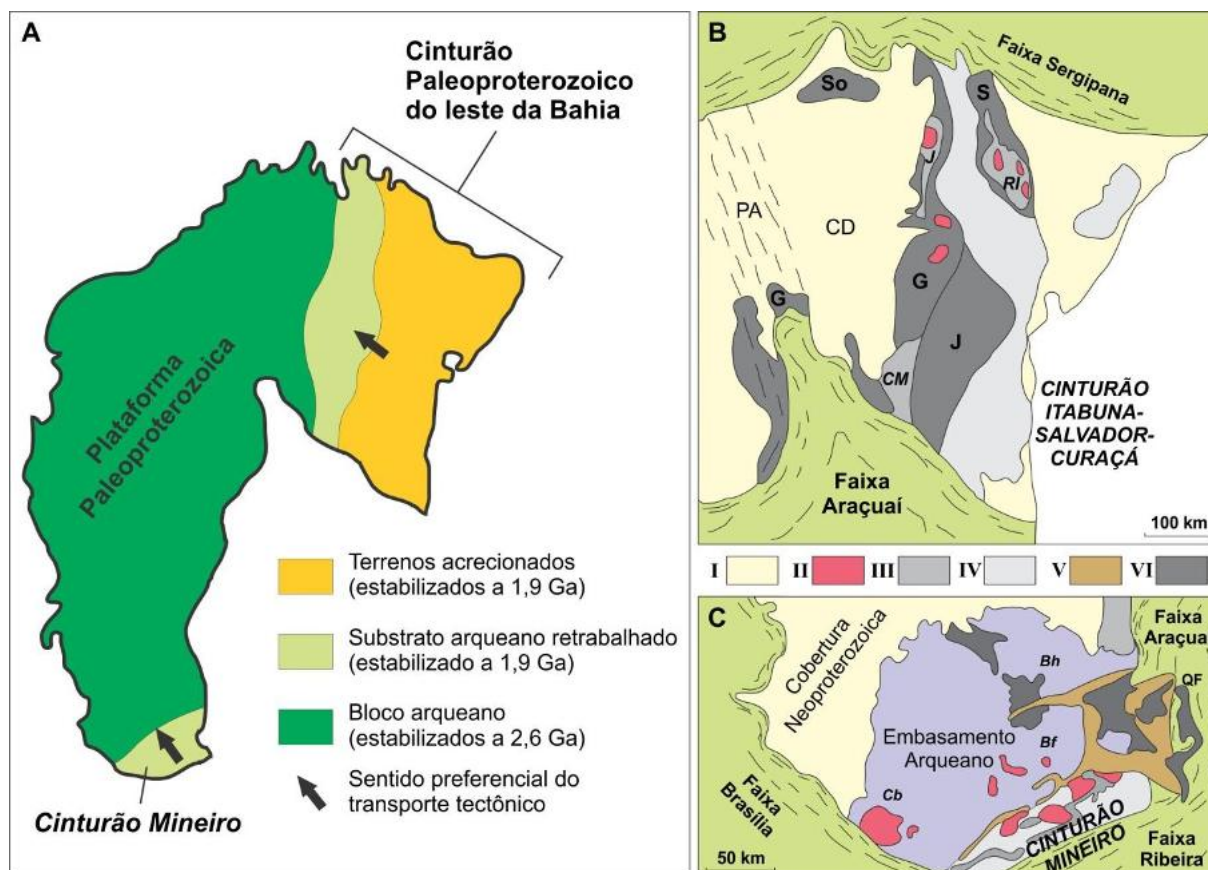


Figura 12 – A) Componentes do embasamento do cráton São Francisco (adaptado de Alkmim, 2004); B) Arcabouço paleoproterozoico do Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá: So = Bloco Sobradinho, S = Bloco Serrinha, G = Bloco Gavião, J = Bloco Jequié, PA = Aulacógeno Paramirim, CD = cobertura sedimentar Chapada Diamantina, J = Faixa Jacobina, CM = Faixa Contendas-Mirante, RI = Greenstone Belt do Rio Itapicuru; C) Arcabouço paleoproterozoico do Cinturão Mineiro. Complexos Arqueanos: Cb = Campo Belo, Bf = Bonfim, Bh = Belo Horizonte. Legenda: I = Coberturas proterozoicas ou mais novas, II = Granitos paleoproterozoicos, III = Unidades supracrustais paleoproterozoicas, IV = Rochas paleoproterozoicas, V = Supergrupo Minas, VI = Rochas arqueanas (figuras 12b e 12c adaptadas de Alkmim & Noce, 2006).

Ao longo da borda meridional do cráton São Francisco afloram diversas unidades que estão associadas ao limite do Arqueano/Paleoproterozoico e ao Paleoproterozoico, sendo as mesmas representadas por: i) Sequência metassedimentar do Supergrupo Minas (limite Arqueano/Paleoproterozoico e Sideriano - Babinski *et al.*, 1995; Machado *et al.*, 1996); ii) Arcos magmáticos Resende Costa (Sideriano - Teixeira *et al.*, 2015), Serrinha (Riaciano - Ávila *et al.*,

2010, 2014), Ritópolis (Riaciano - Ávila *et al.*, 2010), Mantiqueira (Riaciano - Noce *et al.*, 2007; Heilbron *et al.*, 2010) e Juiz de Fora (Riaciano - Heilbron *et al.*, 2010). Essas áreas envolvem corpos plutônicos máficos e félsicos (gnáissificados ou não), bem como rochas subvulcânicas - vulcânicas das suítes Serrinha e Tiradentes (Ávila *et al.*, 2010, 2014); iii) Sequências metavulcano-sedimentares Nazareno, Rio das Mortes e Dolores de Campos, todas riacianas (Ávila *et al.*, 2012); iv) Sequências metassedimentares dos grupos Sabará (Riaciano) e Itacolomi (Orosiriano). Em termos geotectônicos, os arcos magmáticos paleoproterozoicos são interpretados como o resultado dos eventos colisionais/acrecionais desenvolvidos entre os paleocontinentes São Francisco e Congo (Teixeira *et al.*, 2015).

Em termos gerais, o Cinturão Mineiro é tectonicamente controlado pelo Lineamento Jeceaba - Bom Sucesso (limite norte e direção NE-SW) e pelo Lineamento Congonhas (limite oeste e direção NW-SE), enquanto seu limite a sul é marcado pelo Complexo Mantiqueira e pelas rochas das megassequências São João del Rei, Carandaí e Andrelândia (Fig. 10). Este cinturão corresponde a um extenso terreno paleoproterozoico composto predominantemente por rochas granito-gnáissicas dos arcos magmáticos Resende Costa, Serrinha e Ritópolis, que ocorrem associados ou intercalados com as sequências metavulcano-sedimentares Nazareno, Rio das Mortes e Dolores de Campos (Ávila *et al.*, 2010; Teixeira *et al.*, 2015). A sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes é composta basicamente por anfibolitos e metabasitos, que ocorrem associados a quartzitos, filitos, BIFs e raras rochas metaultramáficas (Vasques, 2009), enquanto a sequência metavulcano-sedimentar Nazareno é composta basicamente por rochas metaultramáficas (komatiitos, serpentinitos e talco-clorita xistos) e anfibolitos com assembleias metassedimentares subordinadas (Toledo, 2002). Por fim, a sequência metavulcano-sedimentar Dolores do Campo é composta por anfibolitos toleíticos e metaultramáficas plutônicas e subvulcânicas com subordinados quartzitos, gnditos e filitos (Ávila *et al.*, 2006a). Uma falha (ao norte) e uma inconformidade regional (ao sul) separam as unidades paleoproterozoicas do Cinturão Mineiro das sequências metassedimentares meso-neoproterozoicas São João del Rei, Carandaí e Andrelândia (Ribeiro *et al.*, 2013).

O Complexo ou Cinturão Mantiqueira ocorre a leste e a sul do Cinturão Mineiro (Fig. 10) e é composto essencialmente por ortognaisses tonalíticos a graníticos e,

mais restritamente, por anfibolitos, migmatitos, granulitos, kinzigitos e rochas metassedimentares calciossilicáticas (Heilbron *et al.*, 2010). Essa faixa é considerada como um fragmento profundamente retrabalhado de um arco continental paleoproterozoico (Noce *et al.*, 2007; Heilbron *et al.*, 2010). De forma semelhante, o Complexo ou Cinturão Juiz de Fora é composto basicamente por ortogranulitos de composição variada e evolução polifásica, cuja gênese estaria associada a um arco magmático oceânico (Heilbron *et al.*, 2010).

7. GEOLOGIA LOCAL

7.1 Introdução

Localmente, as principais unidades encaixantes dos corpos pegmatíticos são anfibolitos e filitos da faixa metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, diferentes tipos de ortognaisses (Cassiterita, Fé e Ribeirão do Mosquito), metadioritos (Brumado e Glória) e o metagranitoide Ritápolis. Todas essas unidades são paleoproterozoicas e apresentam uma estruturação alongada no sentido NE-SW (Fig. 13 e Anexo I). A sul e sudeste da Zona de Cisalhamento do Lenheiro são encontradas rochas da sequência metavulcano-sedimentar Nazareno, do arco Serrinha e das megassequências São João del Rei, Carandaí e Andrelândia, as quais não são cortadas pelos pegmatitos (Ávila, 2000), enquanto a norte e noroeste são encontrados anfibolito e filito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, bem como granitos, dioritos e ortognaisses (Fé, Cassiterita, Resende Costa, Canoas, São Tiago) que são entrecortados por dezenas de corpos pegmatíticos.

7.2 Ortogneisse tonalítico Cassiterita

Este corpo apresenta forma alongada segundo ENE-WSW e dimensões batolíticas com exposição de aproximadamente 300 km². É composto por rochas tonalíticas, possui caráter peraluminoso, filiação cálcio-alcálica, apresenta forte fracionamento de ETR e incipiente anomalia negativa de Eu (Ávila *et al.*, 2003). Seu contato é brusco com as rochas anfibolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e é cortado por pegmatitos e diques graníticos e granodioríticos associados, especialmente, ao plúton Ritápolis. Ávila *et al.* (2003) apresentaram idade mínima de cristalização por evaporação de Pb em monocristais de zircão de 2162 ± 10 Ma, enquanto Barbosa *et al.* (2013) encontraram idade de cristalização U-Pb (SHRIMP) de 2417 ± 12 Ma.

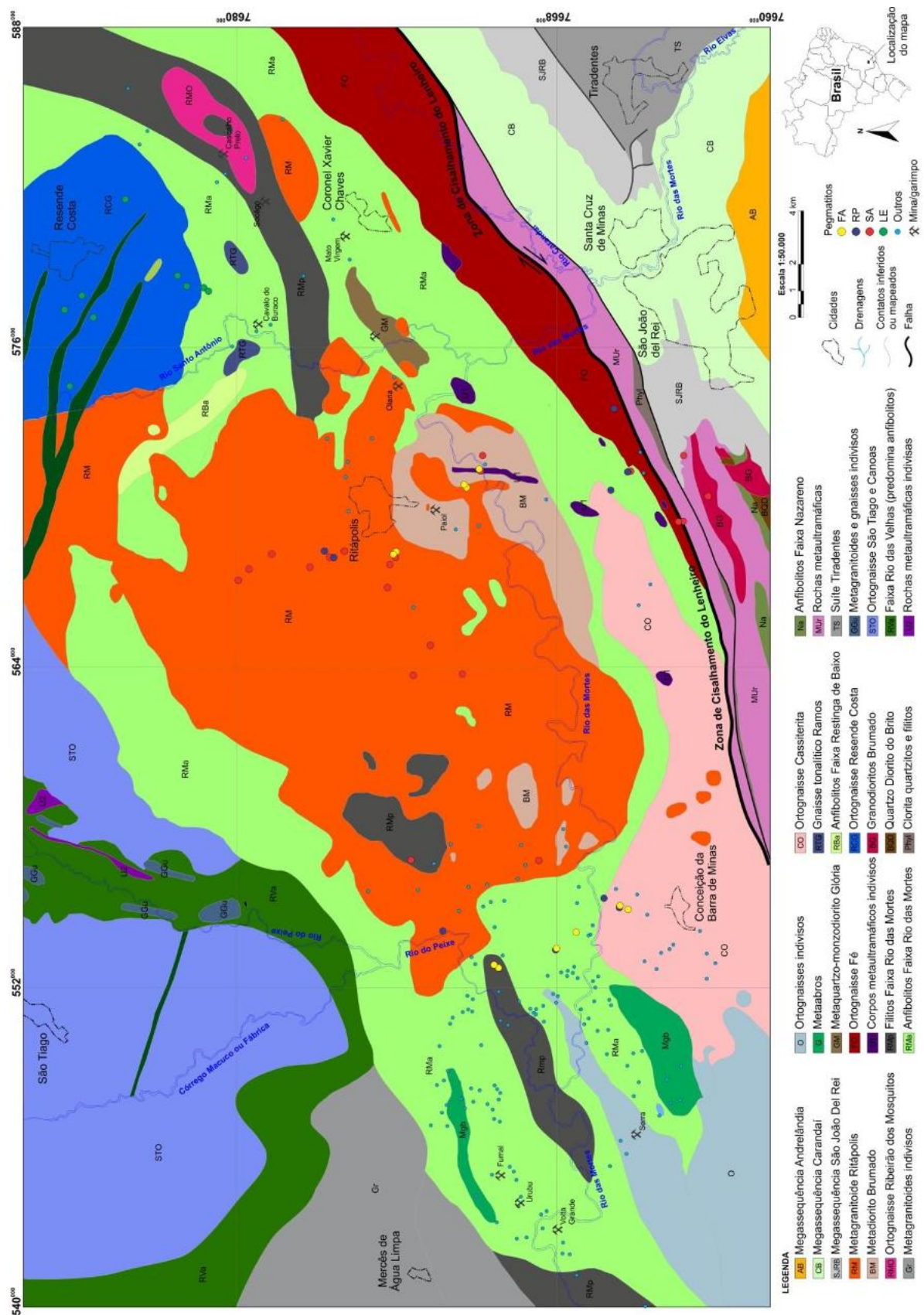


Figura 13 – Mapa litológico simplificado da área de estudo compilado de diversas fontes. Pontos de ocorrência de pegmatitos: FA – esta tese; LE – Calegário (inédito); RP – Rocha & Fiuza (2007); SA – Stohler *et al.* (2008) e Soares *et al.* (2009); Outros – folhas São João del Rei e Lavras publicados pela CODEMIG, Francesconi (1972) e Francesconi *et al.* (1975).

7.3 Sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes

A faixa metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, anteriormente englobada por Pires *et al.* (1990) no *greenstone belt* Barbacena, é composta predominantemente por rochas metamáficas (metabasaltos e anfibolitos de filiação toleítica) associadas a espessos pacotes de rochas metassedimentares e subordinadamente a rochas metaultramáficas (Ávila, 2000; Toledo, 2002; Ávila *et al.*, 2012). Essas rochas também ocorrem como xenólitos em diversos corpos plutônicos máficos e félsicos, dentre os quais se destacam o metagranitoide Ritápolis e o metadiorito Brumado.

A sequência metassedimentar é formada por gonditos, filitos e quartzitos, os quais são encontrados em escassos afloramentos, não sendo possível o estabelecimento de correlações estratigráficas precisas (Toledo, 2002). Porém, segundo Ávila *et al.* (2012), filitos e gonditos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes ocorrem desde próximos da mina da Volta Grande até a região a norte da cidade de Coronel Xavier Chaves. Ávila *et al.* (2012) apontaram que a idade de cristalização U-Pb LA-ICPMS dos protólitos dos anfibolitos da faixa metavulcano-sedimentar Rio das Mortes varia entre 2231 ± 5 Ma e 2202 ± 11 Ma, ou seja, que estas rochas são pelo menos cerca de 100 Ma mais velhas que o metagranitoide Ritápolis.

7.4 Ortognaisse granítico Fé

Trata-se de um corpo alongado segundo a direção NEE-SWW e de aproximadamente 18 km² de extensão na área estudada se prolongando em direção a Lagoa Dourada. É limitado a norte pelas rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e a sul pela Zona de Cisalhamento do Lenheiro e pelas rochas da sequência metavulcano-sedimentar Nazareno (Ávila, 2000; Teixeira *et al.*, 2008). É composto por rochas hololeucocráticas, de granulação fina a média (0,2 a 1,5 mm), textura inequigranular xenoblástica e apresenta composição modal variando entre monzogranito e sienogranito (Ávila, 2000; Teixeira *et al.*, 2008). Pode apresentar bandamento característico e é cortado por diversos corpos pegmatíticos pré a sin-tectônicos.

Estudos geocronológicos por U-Pb TIMNS apontaram para uma idade de cristalização de 2191 ± 9 Ma, enquanto os dados de geoquímica isotópica sugeriram

o envolvimento de um componente crustal na gênese do referido corpo (Nunes, 2007; Teixeira *et al.*, 2008).

7.5 Metaquartzo-monzodiorito Glória

Erichsen (1929) e Guimarães & Guedes (1944) designaram de quartzo diorito Ibitutinga as rochas máficas ígneas compostas de hornblenda e plagioclásio, que afloram ao norte da região de São João del Rei, enquanto Pires & Porto Junior (1986) propuseram a utilização do termo tonalito Ibitutinga para as mesmas. Posteriormente, Ávila (2000) individualizou dois corpos dioríticos que variam composicionalmente e em relação à idade, denominando-os de metadiorito Brumado e metaquartzo-monzodiorito Glória.

O metaquartzo-monzodiorito Glória é um corpo máfico que aflora entre as cidades de Ritápolis e Coronel Xavier Chaves, ocupando uma área de cerca de 9 km² (Ávila *et al.*, 2004; Ávila *et al.*, 2006a, 2006b). Este apresenta xenólitos de rochas anfibolíticas e metaultramáficas associadas à sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e é cortado por apófises e diques correlatos ao metagranitoide Ritápolis, bem como por diversos pegmatitos.

As rochas deste corpo são mesocráticas, apresentam coloração esverdeada, granulação entre 0,1 e 5 mm e englobam litotipos dioríticos, quartzo-dioríticos, quartzo-monzodioríticos e tonalíticos (Ávila, 2000; Ávila *et al.*, 2004). Estas foram subdivididas em três fácies texturais granulométricas distintas (equigranulares fina, fina/média e média) com predominância espacial da fácies fina/média. Ávila *et al.* (2006b) obtiveram idade de cristalização U-Pb (SHRIMP) de 2188 ± 29 Ma e o associaram à fase pré-colisional do Cinturão Mineiro.

7.6 Ortognaisse granodiorítico Ribeirão do Mosquito

Este corpo possui forma alongada segundo a direção NEE-SWW e aflora entre as cidades de Coronel Xavier Chaves e Resende Costa. É representado por rochas leucocráticas, equigranulares, médias e de composição granodiorítica. Possui xenólitos de anfibolito e biotita xistos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e é cortado por diversos corpos pegmatíticos e diques graníticos associados ao metagranitoide Ritápolis. Dados isotópicos U-Pb LA-ICPMS apontaram idade de cristalização de 2146 ± 6 Ma (Ávila *et al.*, 2013).

7.7 Metadiorito Brumado

Segundo Ávila (2000) e Ávila *et al.* (2008), o metadiorito Brumado é representado por rochas dioríticas, quartzo-dioríticas e tonalíticas compostas de hornblenda verde, actinolita, plagioclásio (albita até labradorita), biotita, quartzo e rara microclina, enquanto epidoto, zircão, apatita, allanita, titanita, magnetita, ilmenita, pirita, calcopirita, molibdenita, esfalerita, galena, sericita, clorita e carbonato são os minerais acessórios. Caracterizaram as rochas como metaluminosas, cálcio-alcalinas, com moderado fracionamento de ETR e incipiente anomalia negativa de Eu. Apontaram ainda que o metadiorito Brumado seria intrusivo na sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, possuindo xenólitos de rochas anfibolíticas, bem como este seria cortado por diques e apófises do metagranitoide Ritápolis e por diversos corpos pegmatíticos. Essa proposta foi corroborada pela idade mínima de cristalização de 2131 ± 4 Ma (Pb-Pb em zircão) apresentada por Ávila (2000), enquanto o metagranitoide Ritápolis apresenta idade de 2121 ± 7 Ma.

7.8 Metagranitoide Ritápolis

Destaca-se na área em questão um grande corpo batolítico de composição granítica-tonalítica que recebeu diferentes denominações, dentre as quais granito Ritápolis (Quéméneur & Baraud, 1983), granito Santa Rita (Pires & Porto Júnior, 1986), Maciço de Ritápolis (Quéméneur & Garcia, 1993) e metagranitoide Ritápolis (Ávila, 2000). Inicialmente Pires & Porto Júnior (1986) descreveram este corpo como um leuco monzogranito fracamente foliado, de granulação homogênea média, caracterizando-se por apresentar textura equigranular hipidiomórfica e presença comum de mirmequita e intercrescimento granofírico. Porém, Ávila *et al.* (1998) e Ávila (2000) apontaram que este corpo seria composto por rochas tonalíticas, granodioríticas, graníticas (finas a grossas) e granodioríticas-graníticas porfíricas e, devido a essa variedade composicional, o denominaram de metagranitoide Ritápolis. Ávila (2000) descreveu ainda a presença neste de xenólitos do corpo Cassiterita, do metadiorito Brumado e de rochas anfibolíticas e metassedimentares da sequência metavulcano-sedimentar do Rio das Mortes. Caracterizou o granito como peraluminoso, cálcio-alcalino, com incipiente anomalia negativa em Eu e para as rochas da fácies tonalítica apresentou idade mínima de cristalização Pb-Pb em

monocristais de zircão de 2122 ± 6 Ma, enquanto rochas da fácies granítica apresentaram idade de 2121 ± 7 Ma.

8 SÍNTESE DO CONHECIMENTO SOBRE A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DE SÃO JOÃO DEL REI

A primeira citação de cassiterita na região de São João del Rei provém de Coelho (1942) que descreveu a presença deste mineral em aluviões do Rio das Mortes nas proximidades da vila de Santa Rita do Rio Abaixo (atual cidade de Ritópolis). Sugeriu, ainda, que esta seria de origem primária e estaria associada a filões pegmatíticos que cortam o embasamento gnáissico.

Alves de Souza (1943) também descreveu a ocorrência de mineralizações de estanho primárias (em pegmatitos) e secundárias (em aluvião) na região de São João del Rei e Resende Costa, sugerindo que a presença de cassiterita estaria limitada ao complexo cristalino gnáissico da região.

Guimarães & Guedes (1944) designaram de Região Estanífera de São João del Rei a área de ocorrência de cassiterita, que abrange os municípios de São João del Rei, Resende Costa, Prados e Bom Sucesso (Tab. 4). Afirmaram que a mineralização estaria diretamente relacionada à presença de rochas graníticas, mas também descreveram a presença de horizontes aluvionares ricos em cassiterita associados aos rios Santo Antônio e das Mortes.

Posteriormente, Rolff (1947) designou a região em questão de Província Estanífera do Rio das Mortes e sugeriu que a mesma se estendesse para norte, englobando Resende Costa, Lagoa Dourada e João Ribeiro (atual Entre Rio de Minas) e, para leste, incluindo Carandaí e Lafaiete (Tab. 4). Propôs ainda a subdivisão dos corpos pegmatíticos, segundo sua economicidade, em dois tipos: finos (tipo Santa Rita), que incluiriam os corpos da região de Ritópolis; e possantes (tipo Nazareno), que abrangeriam os corpos próximos às cidades de Nazareno, Cassiterita e Coronel Xavier Chaves - antigamente denominada Coroas. Segundo Rolff (1948a), os pegmatitos tipo Santa Rita estariam encaixados em granitos e quartzo-dioritos, enquanto os do tipo Nazareno, em biotita gnaisses (Tab. 4). Rolff (1948b) apontou para a presença de monazita em vários desses corpos.

Guimarães & Florêncio (1949) e Guimarães (1950) definiram a área de ocorrência dos pegmatitos como Província Pegmatítica do Rio das Mortes e os separaram em dois grupos, segundo sua composição e as idades obtidas por meio da análise de U e Th em grãos de monazita (Tab. 4). Os pegmatitos mais antigos,

com composição calco-sódicos e apresentando idades em torno de 1064 Ma, foram designados de Pegmatitos Proterozoicos, enquanto os mais recentes, potássicos, e com uma idade média de 362,4 Ma, foram classificados como Pegmatitos Paleozoicos. Guimarães (1950) propôs que os pegmatitos teriam sido formados em duas fases de granitização. Na primeira fase (calco-sódica) cristalizaram-se cassiterita, espodumênio e monazita, de idade de formação próxima a 1064 Ma; na segunda fase (potássica), formaram-se microclina e djalmaíta (uranomicrolita), esta última de idade aproximada de 375 Ma (Tab. 4).

Rolff (1951, 1952a) descreveu na Província Estanífera do Rio das Mortes a presença de minerais radioativos, tais como xenotímio, monazita, ítriotantalita, microlita, zircão, fergusonita, euxenita-policrasita (Tab. 4 e 5).

Rolff (1952b) englobou os minerais de lítio como sendo uma fase importante dos pegmatitos da região e denominou-a de Província Estano-Litinífera do Rio das Mortes. Subdividiu os corpos pegmatíticos em três tipos (Tab. 4): estaníferos (sem minerais de lítio e com pouca muscovita - tipo Santa Rita); estano-litiníferos (com espodumênio e muscovita dominantes e tantalatos subordinados - tipo Nazareno); e fosfo-estaníferos (com teor menor de cassiterita, abundante monazita, raro xenotímio e possível litiofilita).

Rolff (1953) descreveu os pegmatitos do tipo Santa Rita que ocorrem na região de Colônia, às margens do Rio Santo Antônio (tributário do Rio das Mortes). Os corpos são compostos por uma massa homogênea de feldspato caulinizado, quartzo e rara muscovita, berilo e monazita. Nas zonas próximas ao contato, há extensa turmalinização e a mineralização em cassiterita ocorre de forma muito variável (Tab. 5).

Ebert (1956) descreveu os pegmatitos como sendo os últimos representantes de uma província magmática neoarqueana bastante variável e com importância econômica devido à presença de cassiterita, tantalita e djalmaíta (uranomicrolita).

Guimarães & Belezkij (1956) e Belezkij (1956) definiram a mineralização nos pegmatitos como estano-tantalo-uranífera e propuseram que a djalmaíta (uranomicrolita) encontrada nesses corpos seria um mineral secundário, formado a partir da alteração da tantalita, bem como a lepidolita estaria relacionada à alteração do espodumênio. Caracterizaram, ainda, a existência de duas gerações de cassiterita e a presença de corpos com e sem magnetita (Tab. 4). Em relação ao tipo

de mineralização (além da estanífera) dividiram a província em duas zonas: "Zona do Oeste", com mineralização em urânio (uranomicrolita) na região da jazida da Volta Grande; e a "Zona do Nordeste", na região de Ritápolis com baixo urânio (microlita) e presença de monazita e xenotímio.

Guimarães (1956) sugeriu que, devido à presença geral de tantalita nos concentrados estudados, a região poderia ser denominada como Província Metalogenética Estano-Tantalífera de São João del Rei (Tab. 4). Sugeriu que tanto a cassiterita, quanto a tantalita teriam cristalizado anteriormente à monazita e djalmaíta e que esta última e a microlita foram formadas a partir da alteração da tantalita com saída de Mn e Fe e entrada de U e Ca. Guimarães (1957) descreveu as características da bityita (aluminossilicato de Be, Li e Ca), um mineral raro encontrado no pegmatito de Germinal (Tab. 4 e 5).

Heinrich (1959, 1964) subdividiu os pegmatitos do Distrito Pegmatítico de São João del Rei a partir da presença ou não de espodumênio (Tab. 4). O tipo sem espodumênio foi considerado pré-tectônico, possui cassiterita, tantalita e microlita como minerais acessórios e não apresenta zonação, enquanto o tipo com espodumênio, considerado pós-tectônico, tem cassiterita, columbita e microlita (djalmaíta) como acessórios e pode apresentar um zonamento incipiente. Além dos minerais acima citados, ambos os tipos apresentam ainda sua própria mineralogia característica (Tab. 5).

Francesconi (1972) subdividiu os corpos da Província Pegmatítica de São João del Rei em simples e complexos, apresentando a mineralogia dos principais corpos (Tab. 4 e 5). Quanto ao zoneamento, afirmou ser indistinto. Caracterizou, ainda, que os pegmatitos costumam intrudir dois tipos de rochas: gnaisses, onde não apresentam orientação preferencial; e anfibólio xistos, onde sua atitude é concordante a da rocha encaixante.

Pires & Porto Júnior (1986) associaram os pegmatitos mineralizados a uma zona de profunda alteração do Granito Santa Rita (Ritápolis), onde uma lixiviação regional removeu os íons metálicos (Sn, Ta, Nb, etc.) do granito e os concentrou nos pegmatitos. Observaram ainda que os pegmatitos próximos a Volta Grande apresentam-se mais ricos em Ta e Li, enquanto os que estão mais a leste, próximos à cidade de Ritápolis, são mais estaníferos e apresentam monazita. Além da mineralogia descrita (Tab. 5), associaram a ocorrência de hematita, rutilo, brookita,

granada e estaurolita, como decorrente da assimilação das rochas encaixantes, e a magnetita e ilmenita, como pertencentes aos xenólitos de anfibolitos e xistos máficos.

Quéméneur (1987) dividiu a Província Pegmatítica de São João del Rei em duas áreas geograficamente distintas (Vale do Rio das Mortes e Região de Cristiano Ottoni) e associou a formação dos corpos pegmatíticos mineralizados em Sn-Ta do Vale do Rio das Mortes (região da Volta Grande) à intrusão do complexo granítico de São Tiago (Tab. 4). Apresentou um modelo de cristalização para os corpos mineralizados baseado no zoneamento mineral observado.

Pires & Pires (1992) descreveram um zoneamento regional dos corpos do Distrito Pegmatítico de São João del Rei, segundo a presença de muscovita, proporções relativas de tantalita, columbita e microlita, assim como a distribuição espacial (atitude e dimensão) dos corpos (Tab. 4). Quatro zonas foram definidas: Intragranítica, Proximal (periplutônica), Medial, e Distal. Cada zona possui particularidades quanto à mineralogia apresentada e suas abundâncias relativas (Tab. 5).

Quéméneur & Lagache (1994, 1997, 1999) descreveram a presença de holmquistita, zinnwaldita e flogopita com Li nas auréolas de metamorfismo que ocorrem associadas aos pegmatitos da mina da Volta Grande. Definiram ainda que os dois primeiros minerais se formaram a partir da alteração da hornblenda e da biotita, respectivamente, devido à percolação de soluções hidrotermais ricas em Li, K e Rb, provenientes do pegmatito.

Lagache & Quéméneur (1997) definiram que os corpos da mina da Volta Grande seriam fortemente diferenciados e que poderiam ser subdividido em três principais partes: zona de borda (superior e inferior); zona intermediária (superior e inferior); zona central, que variaria entre contínua, segmentada ou lenticular.

Rodrigues (1998) estudou em detalhe os corpos pegmatíticos da mina da Volta Grande, com especial atenção aos processos metassomáticos e suas relações com a mineralização de Li. Apresentou dados de triclinicidade de feldspatos potássicos, indicando que os fluidos eram altamente evoluídos e estudou as inclusões fluidas, apontando para a presença de fluidos exclusivamente aquosos e de baixa salinidade (< 5% NaCl eq.).

Pereira *et al.* (2003, 2004a) descreveram e detalharam a presença de zircão hafnífero e de hafnã zirconífero na Província Pegmatítica de São João del Rei, especificamente na Mina da Volta Grande (Tab. 4), enquanto Pereira *et al.* (2007a, 2008a) descreveram a presença de zircão hafnífero em outras localidades da província, os quais ocorrem como grãos isolados ou inclusos na cassiterita, bem como inclusões de bariomicrolita, plumbomicrolita, tantaueuxenita, brabantita (cheralita), monazita e torogumita e exsoluções de torita também na cassiterita (Tab. 5).

Diniz-Pinto (2000, 2004a, 2004b, 2004c) estudou os pegmatitos da região da Volta Grande e detalhou química e texturalmente os minerais do grupo da microlita presentes nestes pegmatitos. Através do método Pb-Pb em zircão obteve uma idade de 2207 ± 13 Ma e através do método ^{202}Pb - ^{205}Pb de Spike duplo em microlita obteve duas outras idades mais novas de 1513 Ma e 980 Ma, sendo estas duas últimas interpretadas como idade da alteração hidrotermal que os corpos sofreram durante os eventos termo-tectônicos do Brasileiro.

Pereira *et al.* (2004b, 2008b) observaram que a cassiterita encontrada na Província Pegmatítica de São João del Rei poderia ter se formado tanto no estágio magmático (cálcico-sódico), quanto no hidrotermal (potássico). Inclusões na cassiterita de microlita e bariomicrolita (minerais formados no episódio metassomático) indicam que este mineral também pode ter se formado nesse estágio. Outras inclusões encontradas e descritas são de minerais dos grupos da columbita-euxenita, do pirocloro e da microlita, além de zircão, hafnã, esfalerita, biotita, albita, rutilo, wodginita e ferrowodginita (Tab. 5).

Pereira *et al.* (2011) descreveram a presença de *stockscheider* quartzo-muscovíticos associados à cúpula do metagranitoide Ritápolis, sendo que esses corpos apresentam a mesma associação mineralógica dos pegmatitos encontrados na província (Tab. 4 e 5), porém foram formados em uma fase tardia e de forma restrita.

Assumpção (2015) estudou o corpo pegmatítico da mina da Volta Grande e o subdividiu em seis zonas com características petrográficas, mineralógicas e químicas distintas, representadas pela zona da parede, zona de borda (biotito), zona do espodumênio, zona do pegmatito granular, zona do albitito e zona do K-feldspato. Utilizando-se da columbita-tantalita e da microlita caracterizou o

fracionamento do corpo pegmatítico e identificou três fases de mineralização em tântalo: grãos homogêneos cristalizados em equilíbrio com o fluido presente; grãos com teores variados de Mn e Ta indicando uma cristalização tardia e associada a um estágio hidrotermal; e grãos caracterizados pelo enriquecimento em Ba e H₂O associados a evolução pós-magmática (intempérica).

Cabe ressaltar que os minerais descritos na tabela 5 utilizam a nomenclatura da época de publicação dos trabalhos originais, sendo que muitos deles já foram desacreditados ou tiveram seu nome alterado. Exemplos são a zinnwaldita que teve seu nome desacreditado, pois na realidade trata-se de uma mica de composição próxima a siderofilita-polilitionita (Rieder *et al.*, 1998), a djalmaíta reclassificada como microlita (Hogarth, 1977), a alvarolita, atualmente tantalita-(Mn) (Fleischer, 1954) e ainda ribeirita e cyrtolita que são variedades de zircão (Fleischer, 1954).

Tabela 4 - Evolução no conhecimento e subdivisão dos pegmatitos da região de São João del Rei.

Autor	Denominação Regional	Subdivisões dos pegmatitos	Nome/localização dos corpos estudados	Outras informações relevantes
Guimarães & Guedes (1944)	Região Estanífera de São João del Rei	-	Nazaré (Volta Grande), Ramos, Penedo	-
Rolff (1947)	Província Estanífera do Rio das Mortes	Tipos Santa Rita e Nazareno	Mata Virgem/Elias, Cagengá, Nazareno, Rochedo, Fartura, Volta Grande e São Tadeu	-
Rolff (1948a)	Província Estanífera do Rio das Mortes	Tipos Santa Rita e Nazareno	Escobar, Pará, Glória, Fartura, Elias, Volta Grande, Cagengá, Boa Vista, São Tadeu, Mamonal, Brumado, Jaburú, Cascalho Preto, Curralinho, Fuma, Colônia, Godofredo e Ilha	Encaixantes: tipo Santa Rita (granito e quartzo-diorito); tipo Nazareno (biotita gnaiss)
Guimarães & Florêncio (1949)	Província Pegmatítica do Rio das Mortes	Fase 1 - pegmatitos cálcio-sódicos Fase 2 - pegmatitos potássicos	Aluvião: Ribeirão Jaburu; Elúvio: Fundão, Matizada e Laginha, Faz. de Soledade; Pegmatitos: Gongo Fino, Faz. Rochedo, Faz. Palestina.	Idades em monazita: Fase 1 = 1064 Ma Fase 2 = 362,4 Ma
Guimarães (1950)	-	Fase 1 - pegmatitos cálcio-sódicos Fase 2 - pegmatitos potássicos	Volta Grande e Germinal	Datação em uranomicrolita: Fase 2 = 373 Ma
Rolff (1951, 1952a)	Província Estanífera do Rio das Mortes	-	Espigão dos Pinheiros, Ribeirão Jaburu (Fundão, Soledade, Várzea Alegre, Paciência, etc.), Fartura-Rochedo, Congo Fino, Volta Grande-Cagengá.	Ocorrência de minerais radioativos
Rolff (1952b)	Província Estano-litinífera do Rio das Mortes	Estaníferos; estano-litiníferos; fosfo-estaníferos	Pará, Nazareno, Mata Virgem, Ramos, Godofredo, Fartura, Escobar, Boa Vista, Rio Abaixo, Rochedo, São Tadeu e Glória	Presença de fase aplítica estéril
Ebert (1956)	Província de Pegmatitos do Rio das Mortes	-	Volta Grande e região de Cassiterita	Representa ultima fase de uma província magmática neo-arqueana
Guimarães (1956)	Prov. Metalogenética Estano-Tantalífera de São João del Rei	-	Volta Grande, Paiol, Mamonal (Glória), Pará, Laginha, Faz. Coqueiros e Vargem Grande	Magnetita e ilmenita provêm das encaixantes
Guimarães & Belezkij (1956); Belezkij (1956)	Província Estano-Tantalo-Uranífera de São João del Rei	“Zona do Oeste” rica em U “Zona do Nordeste” pobre em U	Volta Grande, Faz. Coqueiros, Fundão e Germinal	Zonação da mineralização em U

Tabela 4 - Evolução no conhecimento e subdivisão dos pegmatitos da região de São João del Rei (continuação).

Autor	Denominação Regional	Subdivisões dos pegmatitos	Nome/localização dos corpos estudados	Outras informações relevantes
Guimarães (1957)	-	-	Germinal	Segunda ocorrência mundial de bityita
Heinrich (1959; 1964)	Distrito Pegmatítico de São João del Rei	Com espodumênio e sem espodumênio	Volta Grande, Minas Brasil, Carvalho, Nazaré, Panzera, Corte Grande, Paiol, Vargem Grande	Também separados em pré (sem) e pós-tectônicos (com espodumênio)
Francesconi (1972)	Província Pegmatítica de São João del Rei	Simples e complexos	Serra, Volta Grande, Paiol, Cascalho Preto, Sossego, Fazenda Olaria, Mato Virgem e Cavalo do Buraco	Encaixantes: gnaisses e anfibólio xistos
Pires & Porto Júnior (1986)	Distrito Estanífero de São João del Rei (ou do Rio das Mortes)	-	Volta Grande – Germinal - Fumal, Serra, Barra, Paiol - Joanico, Facão, Mamonal, Boa Vista, Rochedo, Penedo, Barro Vermelho e Fundão.	Região de Volta Grande – Ta e Li, região de Ritópolis – Sn
Quéméneur (1987)	Província Pegmatítica de São João del Rei	-	Vale do Rio das Mortes - Volta Grande (corpos A a E), Minas Brasil, Fumal	Associa esses corpos ao complexo granítico de São Tiago
Pires & Pires (1992)	Distrito Pegmatítico de São João del Rei	Sem muscovita e com muscovita	Volta Grande	Subdivisão em quatro zonas segundo mineralogia e distribuição espacial
Quéméneur & Lagache (1994, 1997, 1999)	-	-	Volta Grande	Enriquecimento em Li, Rb e Cs
Lagache & Quéméneur (1997)	-	-	Volta Grande	Zonamento dos pegmatitos: zona de borda, intermediária e central
Rodrigues (1998)	Província São João del Rei	-	Volta Grande (corpos A, E e F), Fumal, Urubu, Sapezinho e veios de quartzo no granito Santa Rita	Fluido pegmatítico altamente evoluído com cristalização lenta
Pereira <i>et al.</i> (2003, 2004a, 2007a)	Província Pegmatítica de São João del Rei	-	Mina de Volta Grande, Garimpo do Cascalho Preto, Córrego Pernambuco	Presença de zircão hafnífero e hafnã zirconífero
Diniz-Pinto (2000, 2004a, 2004b, 2004c)	-	-	Volta Grande, Fundão e Paiol	Cristalização (zircão): 2207 ± 13 Ma Alteração (microlita): 1513 Ma/980 Ma
Pereira <i>et al.</i> (2004b, 2008b)	Província Pegmatítica de São João del Rei	-	Minas: Volta Grande (Corpo A) e Paiol; Córregos: Carioca (Penedo), Cascalho Preto (Cel. Xavier Chaves) e do Cunha (Caburu/São João del Rei).	Cassiterita magmática e hidrotermal
Pereira <i>et al.</i> (2011)	Província Pegmatítica de São João del Rei	<i>stockscheider</i> quartzo-muscovíticos	Itutinga, Lavra da Barra, Ritópolis, Penedo	Representam evento tardi- a pós-magmático
Assumpção (2015)	Província Pegmatítica de São João del Rei	-	Volta Grande	Subdivisão do pegmatito em seis zonas distintas

Tabela 5 - Mineralogia dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei.

Autor	Mineralogia descrita nos corpos
Coelho (1942)	Cassiterita
Guimarães & Guedes (1944)	Cassiterita, espodumênio, lepidolita, turmalina, granada, berilo, magnetita, titanita e possivelmente monazita e xenotímio.
Rolff (1947)	Cassiterita, topázio, espodumênio.
Rolff (1948a, 1948b)	Cassiterita, espodumênio, amblygonita, muscovita, plagioclásio, quartzo, ortoclásio, berilo, zircão, topázio, xenotímio, monazita, turmalina, euxenita, policrasita, fergusonita, betafita, djalmaíta, lepidolita e zinnwaldita.
Guimarães e Florêncio (1949)	Pegmatitos proterozóicos: albita-oligoclásio, quartzo, biotita, epidoto, muscovita e monazita; Pegmatitos paleozóicos: microclina, quartzo, muscovita, albita, berilo, columbita, topázio, zircão, fenacita, kunzita, monazita e outros minerais radioativos descritos como tântalo-niobatos.
Guimarães (1950)	Volta Grande e Germinal: cassiterita, espodumênio, amblygonita, muscovita, quartzo, plagioclásio, topázio, lepidolita, zinnwaldita, albita, zircão, turmalina, microclina, djalmaíta e tantalita.
Rolff (1951, 1952a)	Xenotímio, monazita, policrasita, fergusonita, euxenita, itriotantalita, microlita, djalmaíta, zircão, cassiterita, espodumênio, berilo.
Rolff (1952b)	Estaníferos (cassiterita), estano-litníferos (espodumênio, fosfatos de Li, muscovita, berilo, nióbio-tantalatos) e fosfo-estaníferos (cassiterita, xenotímio, litiofilita, monazita)
Rolff (1953)	Tipo Santa Rita: quartzo, feldspato, muscovita, cassiterita, turmalina e berilo.
Ebert (1956)	Cassiterita, tantalita, uranomicrolita
Guimarães (1956), Belezkij (1956)	Feldspato, quartzo, mica, espodumênio, cassiterita, tantalita e djalmaíta (monazita, xenotímio, fergusonita) lepidolita. Raros: turmalina, granada incolor, bityita e zirconita.
Guimarães (1957)	Quartzo, espodumênio, muscovita, cassiterita, tantalita, granada, djalmaíta, bityita, lepidolita.
Heinrich (1959 e 1964)	Com espodumênio: muscovita, espodumênio, lepidolita, cassiterita, tantalita, microlita, ilmenita, magnetita, zircão, turmalina, spessartina, bityita, xenotímio e gahnita. Sem espodumênio: muscovita, berilo, biotita, cassiterita, columbita-tantalita, spessartina, ilmenita, magnetita, microlita, zircão, monazita, turmalina, xenotímio e gahnita.
Francesconi (1972)	Albita, quartzo, microclínio, columbita-tantalita, alvarolita, ixiolita, cassiterita, microlita, pirocloro, samarskita, zircão, cyrtolita, xenotímio, monazita, magnesita, ilmenita, hematita, goethita, granada, berilo, espodumênio, gahnita, muscovita, bityita, lepidolita, rutilo, brookita, epidoto, estauroлита e turmalina
Pires & Porto Júnior (1986)	Quartzo, caolinita, albita, muscovita, cassiterita, tantalita, microlita, columbita, espodumênio, lepidolita, turmalina e monazita. Raros: berilo, alvarolita, ixiolita, pirocloro, samarskita, cyrtolita, xenotímio, gahnita, bityita. Assimilados: hematita, rutilo, brookita, granada e estauroлита
Quéméneur (1987)	Albita, espodumênio, quartzo, microclina e muscovita como principais, granada, apatita, cassiterita e tantalita como acessórios e lepidolita, microlita e berilo restritos a corpos específicos.
Pires & Pires (1992)	Zona Intragranítica: biotita, magnetita, quartzo, feldspato, monazita, xenotímio, granada e zircão; Proximal (periplutônica): biotita, granada, cassiterita, columbita-tantalita; Medial: cassiterita, tantalita-columbita, microlita e granada; Distal: aparecimento de minerais de Li (espodumênio e lepidolita)
Lagache & Quéméneur (1997)	Albita, lepidolita, quartzo, muscovita, espodumênio, microclina, zinnwaldita, flogopita, holmquistita, cassiterita, tantalita, microlita, monazita, granada
Rodrigues (1998)	Hornblenda, plagioclásio, ilmenita, holmquistita, epidoto, granada, titanita, antofilita, quartzo, fluorita, biotita, cassiterita, muscovita, microclina, espodumênio, lepidolita
Pereira <i>et al.</i> (2003, 2004a, 2007a)	Zircão hafnífero, hafnã zirconífero, cassiterita, bariomicrolita, plumbomicrolita, tanta-euxenita, brabantita, monazita, torogumita, torita
Diniz-Pinto (2000, 2004a, 2004b, 2004c)	Albita, microclina, quartzo, muscovita, lepidolita e espodumênio. Acessórios: cassiterita, microlita, tantalita, fluorita, apatita e berilo.
Pereira <i>et al.</i> (2004b, 2008b)	Cassiterita, columbita-tantalita, tantalita rica em Pb, tantalita rica em Mn, bariotantalita, pirocloro, microlita, bariomicrolita, uranomicrolita, zircão, zircão hafnífero, hafnã zirconífero, esfalerita, biotita, albita, rutilo com nióbio, wodginita e ferrowodginita
Pereira <i>et al.</i> (2011)	Quartzo, muscovita, columbita-tantalita, pirocloro, cassiterita, xenotímio, monazita, zircão, gahnita, turmalina, granada, magnetita, ilmenita, epidoto, rutilo, anfibólio, apatita, hidrobiotita, oxi-hidróxidos de Fe e de Mn.
Assumpção (2015)	Quartzo, albita, microclina-(Rb), epidoto (piemontita), espodumênio, topázio, kaersutita, lepidolita, titanita, ilmenita, rutilo, pirita, cassiterita, óxidos Fe/goethita, columbita-(Mn), tantalita-(Mn), pirocloro, microlita, apatita, polucita, fluorita, calcita, grafita

9. PEGMATITOS ESTUDADOS

9.1 Introdução e localização dos corpos

Dentre os diversos corpos identificados e visitados na região da Província Pegmatítica de São João del Rei, doze foram escolhidos para serem estudados durante a presente tese. Os critérios utilizados para a seleção destes corpos foram sua distribuição espacial na área, relação com os diferentes litotipos encaixantes presentes, estado de alteração intempérica avançada e seu acesso físico. A tabela 6 resume as principais informações referentes aos corpos estudados e a figura 14 mostra sua localização espacial.

Tabela 6 – Corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei que foram estudados.

Nome	Coordenada UTM E	Coordenada UTM N	Litologia Encaixante
FA-02	571503	7670829	Metadiorito Brumado
FA-03	571503	7670829	Metadiorito Brumado
FA-05	570728	7671461	Metagranitoide Ritápolis
FA-06	570737	7671438	Metadiorito Brumado
FA-07	568398	7674039	Metagranitoide Ritápolis Facies Média
FA-08	568213	7674122	Metagranitoide Ritápolis Facies Média
FA-09	552725	7670209	Filito da Sequência Metavulcano-sedimentar Rio das Mortes
FA-10	552803	7670312	Filito da Sequência Metavulcano-sedimentar Rio das Mortes
FA-11	553480	7668039	Anfibolito da Sequência Metavulcano-sedimentar Rio das Mortes
FA-12	554041	7667246	Anfibolito da Sequência Metavulcano-sedimentar Rio das Mortes
FA-13	555037	7665609	Ortognaisse Cassiterita
FA-14	554974	7665381	Ortognaisse Cassiterita

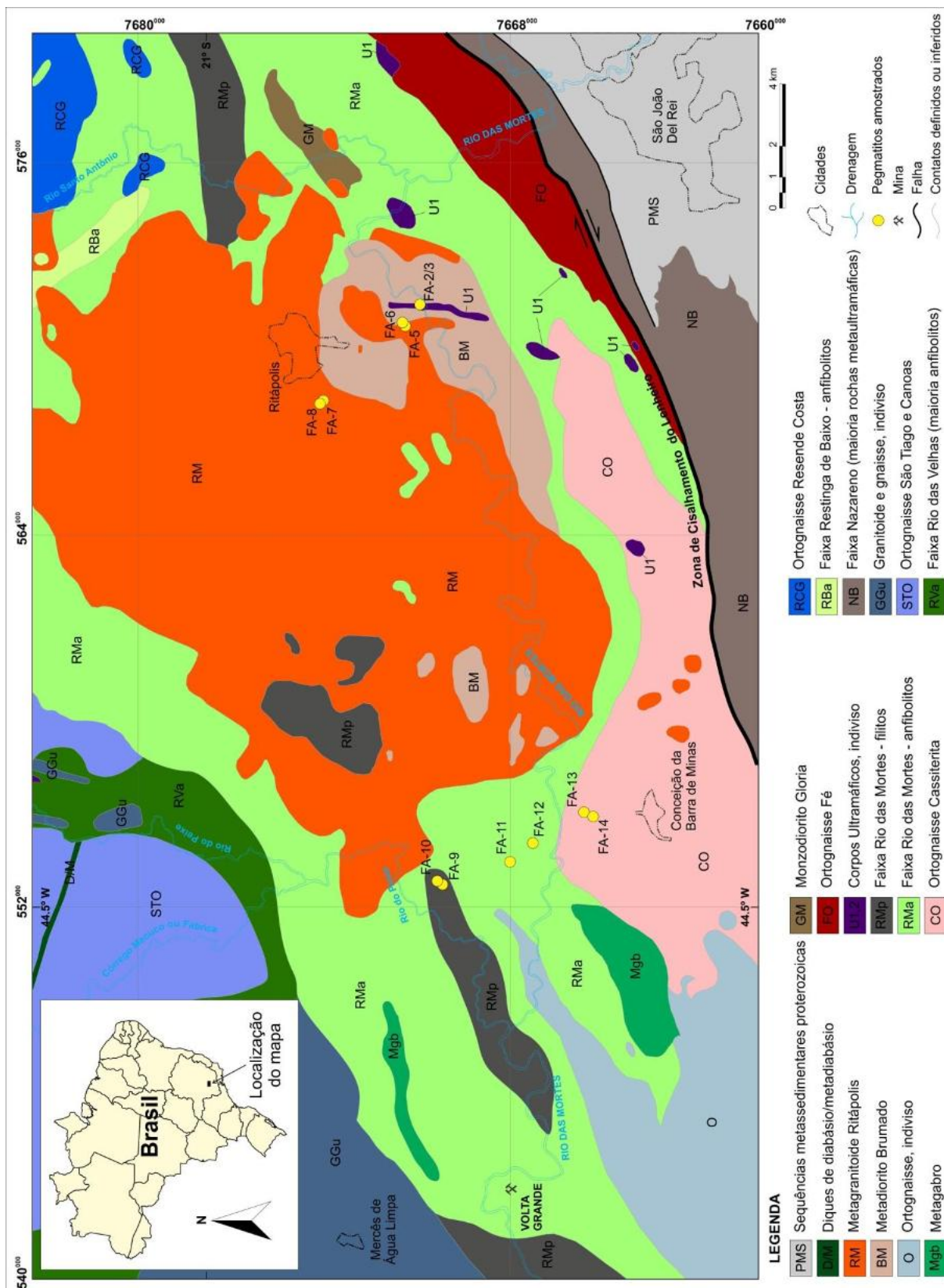


Figura 14 – Mapa litológico simplificado da área de estudo com ênfase na localização dos corpos pegmatíticos estudados. As referências utilizadas na confecção deste mapa são as mesmas apresentadas na figura anterior.

9.2 Características de campo dos pontos visitados

Ponto FA-01 (0584512/7678278)

Corte de estrada próximo ao km 4 da MG-839 onde é possível observar diques graníticos cortando rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, incluindo xenólitos da mesma, e ainda a presença de intrusões pegmatíticas associadas (Fig. 15a e b). Esta amostra não foi estudada na presente tese, pois o pegmatito estava fresco. Logo ao lado, a encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis, no qual é possível observar duas fácies equigranulares (fina e média, Fig. 15c). Pegmatito com espessura aproximada de 70 cm, atitude $325^{\circ}/35^{\circ}$ e mineralogia, à lupa, composta por quartzo, plagioclásio, biotita e granada (provável fase aplítica posterior – Fig. 15d).

Amostras coletadas: FA-01A – metagranitoide fácies fina (rocha); FA-01B – metagranitoide fácies média (rocha); FA-01C – fase aplítica com granada (rocha).

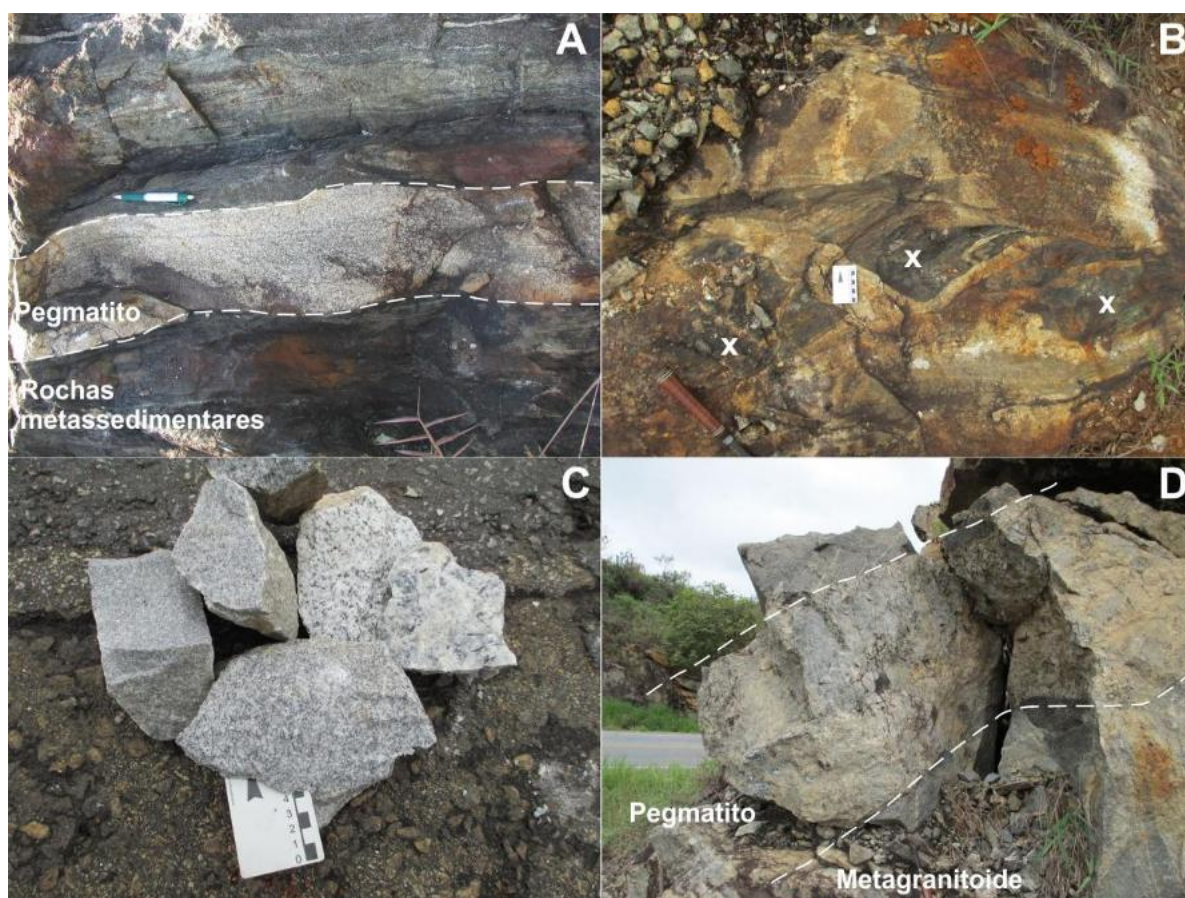


Figura 15 – Relações de campo observadas entre os pegmatitos e as rochas encaixantes encontradas no ponto FA-01. A) Dique pegmatítico intrudindo rochas metassedimentares da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. B) Xenólitos das rochas metassedimentares (x) nos diques. C) Diferentes fácies do metagranitoide Ritápolis. D) Dique pegmatítico cortando o metagranitoide.

Ponto FA-02 (0571503/7670829)

Afloramento em corte de estrada próximo ao Rio das Mortes. Pegmatito alterado encaixado no metadiorito Brumado (Fig. 16a). Apresenta espessura aparente de 4,90 m, contato brusco e sinuoso. Mineralogia básica: quartzo e caulim (proveniente da alteração do feldspato).

Amostras coletadas: FA-02 – saprólito.

Ponto FA-03 (0571503/7670829)

Pegmatito alterado encaixado no metadiorito Brumado, com uma espessura aparente de 2,10 m, contato brusco e sinuoso. Distante cerca de 50 metros do ponto anterior, sendo que a grande diferença é a presença de muscovita em placas de até 5 cm, além do caulim (proveniente da alteração do feldspato) e do quartzo (Fig. 16b).

Amostras coletadas: FA-03 – saprólito.

Ponto FA-04 (0571561/7670792)

Afloramento nas margens do Rio das Mortes, no qual é possível observar as relações de contato entre o metadiorito, metagranitoide, anfibolito e pegmatito (Fig. 16c e d). O metadiorito possui xenólitos de anfibolito e é cortado pelo metagranitoide e ambos são cortados pelo pegmatito. Pegmatito amostrado: encaixado no metadiorito Brumado, 15 a 30 cm de espessura, granulação grossa, composição básica quartzo e feldspato. Apresenta contato brusco e sinuoso com a encaixante. Atitude 330°/65°.

Amostra coletada: FA-04 – amostra do pegmatito (rocha). Esta amostra não foi estudada, pois o pegmatito estava fresco.

Ponto FA-05 (0570728/7671461)

Pegmatito alterado encaixado no metagranitoide Ritápolis (Fig. 17a). O metagranitoide é uma apófise no metadiorito Brumado. Apresenta uma espessura aparente de 3 m, granulação média, contato brusco com a encaixante e atitude 280°/45°.

Amostras coletadas: FA-05 – saprólito.



Figura 16 – Corpos pegmatíticos amostrados. A) Pegmatito do ponto FA-02 intrusivo no metadiorito Brumado. B) Detalhe do pegmatito amostrado no ponto FA-03 com quartzo e muscovita. C) Metadiorito Brumado cortado por diversos veios do metagranitoide Ritápolis formando xenólitos angulosos. D) Metadiorito cortado por pegmatito espesso (imagens C e D, ponto FA-04).

Ponto FA-06 (0570737/7671438)

Pegmatito alterado encaixado no metadiorito Brumado, bem próximo ao ponto anterior. Apresenta espessura aparente de 1 m e atitude $300^{\circ}/45^{\circ}$. Próximo a ele foram encontradas rochas metaultramáficas (hornblendito, metapiroxenito).

Amostras coletadas: FA-06 – sapróilito.

Ponto FA-07 (0568398/7674039)

Pegmatito alterado encaixado no metagranitoide Ritápolis (fácies média), na descida que leva a cachoeira do Jaburu (Fig. 17b). Apresenta textura gráfica (Fig. 17c), tem uma espessura aparente de 4,7 m e granulação média. Mineralogia encontrada: quartzo e feldspato. Atitude aproximada 260°/80°.

Amostras coletadas: FA-07 – saprólito.



Figura 17 – A) Pegmatito amostrado em corte de estrada no ponto FA-05. Corpo intrusivo no metagranitoide Ritápolis. B) Saprólito do pegmatito amostrado no ponto FA-07. C) Detalhe da textura gráfica (em amostra de mão) encontrada no ponto FA-07.

Ponto FA-08 (0568213/7674122)

Pegmatito alterado encaixado no metagranitoide Ritápolis (fácies média), próximo ao ponto anterior (descida para a cachoeira do Jaburu). É um enxame de diques onde fica difícil diferenciar os vários corpos e suas atitudes. Apresenta muscovita que não foi observada no ponto anterior. Mineralogia encontrada: quartzo, feldspato e muscovita.

Amostras coletadas: FA-08 – saprólito.

Ponto FA-09 (0552725/7670209)

Provável *stockscheider* intrusivo na unidade metassedimentar (filitos e quartzitos) da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 18a e b). Granulação grossa, na qual é possível observar placas de muscovita centimétricas

em meio a grãos de quartzo. Não foi observada a presença de feldspato. Tem espessura aparente de 30 cm e atitude 195°/65°.

Amostras coletadas: FA-09 – saprólito.

Ponto FA-10 (0552803/7670312)

Pegmatito alterado, espesso (cerca de 2 m) intrusivo na unidade metassedimentar (filito) da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Granulação grossa, na qual é possível observar placas de muscovita centimétricas (Fig. 18c e d) em meio a grãos de quartzo, neste caso, fumê. Não foi observada a presença de feldspato.

Amostras coletadas: FA-10 – saprólito.

Ponto FA-11 (0553480/7668039)

Possível *stockscheider* intrusivo nas rochas anfibolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Mineralogia observada: quartzo, muscovita e caulim (alteração do feldspato). Granulação média a grossa.

Amostras coletadas: FA-11 – saprólito.

Ponto FA-12 (0554041/7667246)

Pegmatito alterado encaixado nas rochas anfibolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Não apresenta muscovita, mas foi possível observar presença de óxi-hidroxidos de manganês (Fig. 18e). Apresenta granulação de média a fina.

Amostras coletadas: FA-12 – saprólito.

Ponto FA-13 (0555037/7665609)

Pegmatito alterado encaixado no ortognaisse Cassiterita (Fig. 19a). Apresenta textura gráfica, espessura aparente de 50 a 80 cm, granulação grossa e contato brusco, mas sinuoso, com a encaixante. Mineralogia encontrada: quartzo e feldspato (sem muscovita). Atitude aproximada 220°/86°.

Amostras coletadas: FA-13 – saprólito.



Figura 18 – A) Pegmatito intrusivo na unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, ponto FA-09. B) Quartzitos que compõem a unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, próximo ao ponto FA-09. C) Pegmatito intrusivo em filitos da unidade metassedimentar da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes amostrado no ponto FA-10. D) Detalhe das placas centimétricas de muscovita encontrados no ponto FA-10. E) Ponto FA-12: pegmatito intrusivo em anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes onde é possível observar a presença de óxi-hidróxidos de Mn (manchas escuras).

Ponto FA-14 (0554974/7665381)

Pegmatito alterado encaixado no ortogneisse Cassiterita (Fig. 19b). Apresenta espessura aparente de 37 cm, granulação grossa e contato brusco e reto com a

encaixante. Mineralogia encontrada: quartzo, feldspato e muscovita. Atitude aproximada $170^{\circ}/80^{\circ}$.

Amostras coletadas: FA-14 – saprólito.



Figura 19 – Pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita amostrados nos pontos FA-13 (A) e FA-14 (B).

9.3 Descrição geral dos concentrados

A tabela 7 e a figura 20 apresentam um resumo dos minerais encontrados nos concentrados e que serão descritos em detalhe a seguir. Cada descrição é seguida por uma tabela (Tab. 8 a 19) contendo as principais informações da amostra: nome, procedência, massa do concentrado (em gramas), mineralogia por fração magnética, porcentagem relativa da fração em relação à massa do concentrado e observações pertinentes.

Tabela 7 – Resumo da composição mineralógica obtida por estereomicroscopia ótica com auxílio de microsonda Raman e microscopia eletrônica de varredura com EDS, dos concentrados de minerais pesados dos pegmatitos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. (-) indica que o mineral não foi observado no concentrado; (<0,1) indica que o mineral foi encontrado em concentrações inferiores a 0,1 % em peso; (tr) refere-se a traço e indica que poucos grãos do mineral foram observados.

Amostras	FA-02	FA-03	FA-06	FA-05	FA-07	FA-08	FA-09	FA-10	FA-11	FA-12	FA-13	FA-14
Concentrado (g)	5,56	2,81	2,14	2,13	0,48	1,23	1,65	4,92	2,99	1,36	3,00	4,05
Minerais identificados (% em peso)	Anatásio	-	-	-	1,2	-	0,1	-	-	-	-	-
	Andaluzita	-	-	-	-	-	0,3	24,7	-	-	-	-
	Cassiterita	9,0	35,9	53,6	28,4	-	<0,1	-	12,2	tr	<0,1	-
	Columbita-tantalita	30,2	34,5	25,3	35,6	44,7	70,2	8,4	1,7	38,0	19,3	-
	Epidoto	tr	1,2	tr	tr	1,2	0,3	-	tr	tr	0,1	0,5
	Gahnita	0,3	3,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	72,5	tr	14,3	-	-
	Granada	59,1	10,7	12,6	4,2	5,6	5,0	6,7	2,2	3,3	18,5	44,4
	Ilmenita	-	2,1	1,7	0,8	31,8	14,2	8,7	18,5	1,8	5,6	13,2
	Limonita/hematita	-	tr	0,3	-	1,3	0,4	1,2	9,9	tr	13,4	<0,1
	Magnetita	0,2	4,0	0,1	0,4	5,2	1,3	1,2	25,0	7,3	2,1	0,2
	Microlita	0,1	tr	0,6	23,9	<0,1	<0,1	-	1,1	-	15,5	2,5
	Muscovita	tr	<0,1	tr	tr	<0,1	0,5	<0,1	tr	tr	tr	tr
	Óxidos de Mn	<0,1	tr	0,3	-	tr	0,2	0,1	0,1	tr	3,3	2,8
	Turmalina	-	tr	tr	tr	tr	<0,1	<0,1	2,2	<0,1	tr	<0,1
	Monazita	<0,1	2,8	tr	0,2	3,2	2,6	0,6	tr	28,0	14,0	1,0
	Xenotímio	-	<0,1	-	0,3	1,0	2,3	-	<0,1	3,6	4,7	1,8
	Zircão	0,7	3,2	5,6	6,3	4,6	3,0	0,2	2,3	3,6	3,5	33,3
	*Outros	<0,1	2,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Minerais em *Outros	Anfibólio	tr	tr	tr	-	tr	tr	-	-	-	tr	-
	Apatita	tr	-	-	-	tr	tr	-	-	-	-	-
	Biotita/hidrobiotita	-	-	-	-	-	tr	-	-	-	tr	tr
	Brookita	-	-	-	-	tr	-	-	-	-	-	-
	Cianita	-	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-
	Clinozoisita	tr	tr	tr	tr	-	-	tr	-	tr	-	-
	Estaurolita	-	-	-	-	-	-	tr	tr	-	-	-
	Pirita limonitizada	-	tr	-	-	-	-	-	-	tr	-	-
	Rutilo	-	-	-	-	-	tr	-	-	tr	-	tr
	Thorita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	tr	tr

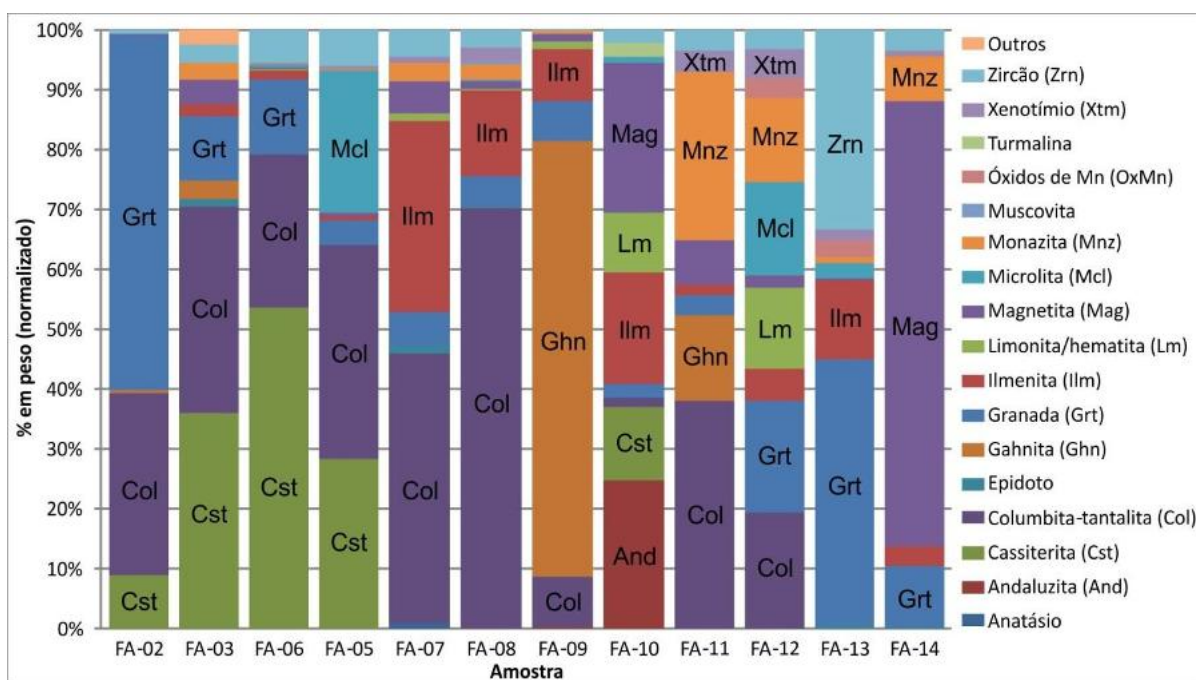


Figura 20 – Distribuição normalizada das principais fases minerais encontradas nos pegmatitos estudados.

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-02 ocorrem, em grande quantidade, granada rosa e limonitizada (fração 0,3 A), columbita/tantalita (frações 0,5 A, 0,6 A e 0,8 A) e cassiterita (1,0 A, 1,8 A e fração não atraível). Foram também identificados magnetita, epidoto, clinozoisita, zircão, gahnita, anfibólio, monazita, óxido/hidróxido de Mn, turmalina castanha, muscovita, microlita (rosa e amarela) e apatita (Tab. 8), sendo que microlita, clinozoisita, monazita e apatita foram confirmadas por microsonda Raman. A fração 0,3 A ocorre em maior quantidade, enquanto as frações 0,5 A, 0,6 A e não atraível também são bem representadas no concentrado, implicando no amplo predomínio de granada, columbita-tantalita e cassiterita no mesmo (Fig. 20). A granada rosa encontra-se envolvida por uma película que pode variar de fina a grossa de limonita de coloração amarronzada, enquanto a columbita-tantalita apresenta uma massa branco-amarelada ao seu redor, possivelmente um mineral do supergrupo do pirocloro. Cabe destacar que ilmenita e xenotímio não foram identificados em nenhuma das frações, enquanto gahnita e monazita são muito raras.

Tabela 8 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-02.

Amostra FA-02		Procedência Pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 5,56 gramas							
Magnético (0,2%)		0,3 A (59,7%)		0,5 A (30,2%)		0,6 A (2,3%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Granada rosa	54	Columbita-tantalita	90	Columbita-tantalita	98
		Granada limonitizada	45	Cassiterita	7	Cassiterita	3
		Columbita-tantalita	1	Zircão	1	Monazita*	1
		Epidoto	Tr	Clinozoisita*	1	Clinozoisita	1
				Gahnita	1	Óxido/hidróxido Mn	1
				Epidoto	Tr	Zircão	Tr
				Microlita (rosa)*	Tr	Gahnita	Tr
				Granada rosa	Tr	Microlita amarela*	Tr
				Granada limonitizada	Tr	Epidoto	Tr
						Anfibólio	Tr
						Turmalina castanha	Tr
0,8 A (0,4%)		1,0 A (0,2%)		1,8 A (1,3%)		NÃO ATRAÍVEL (5,8%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Columbita-tantalita	53	Cassiterita	76	Cassiterita	85	Cassiterita	95
Cassiterita	42	Columbita alterada	20	Zircão	11	Zircão	5
Gahnita	3	Gahnita	2	Microlita amarela*	4	Apatita*	Tr
Monazita	1	Zircão	1	Gahnita	Tr	Microlita amarela*	Tr
Clinozoisita	1	Clinozoisita	1	Apatita*	Tr		
Zircão	Tr	Monazita	Tr	Muscovita	Tr		
Microlita amarela	Tr	Muscovita	Tr				

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-03 ocorrem, em grande quantidade, granada rosa e limonitizada (fração 0,3 A), columbita/tantalita (frações 0,5 A e 0,6 A), gahnita (fração 0,8 A) e cassiterita (fração não atraível) (Tab. 9). As frações 0,5 A e não atraível são as mais abundantes no concentrado, enquanto as frações 1,0 A e 1,8 A apresentam muito pouco material e são caracterizadas por apresentar cassiterita, gahnita, zircão, muscovita e monazita. Foram ainda identificados magnetita, ilmenita, epidoto, clinozoisita, pirita limonitizada, xenotímio, óxidos/hidróxidos de Mn, limonita, turmalina castanha, anfibólio, monazita e zircão. A granada rosa encontra-se envolvida por limonita de coloração amarronzada, sendo que este processo pode, inclusive, ocasionar a substituição por completo desta. Gahnita, granada, magnetita, ilmenita, zircão e monazita são encontrados em grande quantidade no concentrado (aproximadamente 30% do total), porém predominam amplamente columbita-tantalita e cassiterita (Fig. 20). Monazita na fração 0,6 A foi caracterizada por microsonda Raman, enquanto microlita não foi identificada e xenotímio é muito raro.

Tabela 9 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-03.

Amostra FA-03		Procedência		Observações			
Massa do concentrado 2,8 gramas		Pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado		* Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Magnético (4,0%)		0,3 A (9,0%)		0,5 A (35,5%)		0,6 A (3,6%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Granada rosa	50	Columbita-tantalita	85	Columbita-tantalita	60
		Granada limonitizada	30	Granada rosa	10	Epidoto/clinozoisita	34
		Ilmenita	20	Granada limonitizada	4	Cassiterita	3
		Epidoto	Tr	Ilmenita	1	Anfibólio	3
				Epidoto	Tr	Limonita	Tr
				Pirita limonitizada	Tr	Turmalina castanha	Tr
				Xenotímio	Tr	Monazita*	Tr
						Zircão	Tr
						Óxido/hidróxido Mn	Tr
0,8 A (2,8%)		1,0 A (3,7%)		1,8 A (1,7%)		NÃO ATRAÍVEL (39,7%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Gahnita	45	Cassiterita	55	Cassiterita	67	Cassiterita	98
Monazita	33	Gahnita	35	Zircão	15	Zircão	2
Columbita-tantalita	20	Muscovita	6	Muscovita	10		
Cassiterita	2	Zircão	3	Monazita	8		
Epidoto	Tr	Monazita	1	Microlita	Tr		
Limonita	Tr	Epidoto	Tr	Gahnita	Tr		
Turmalina castanha	Tr						
Anfibólio	Tr						

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-05 ocorrem, em grande quantidade, granada limonitizada (fração 0,3 A), columbita/tantalita (frações 0,5 A,

0,6 A, 0,8 A e 1,0 A), microlita (fração 1,8 A) e cassiterita (fração não atraível). Destaca-se o amplo predomínio das frações não atraível e 0,5 A, bem como de columbita-tantalita, cassiterita e microlita no concentrado (Fig. 20). A presença de microlita (no produto magnético a 1,8 A) e turmalina azul (frações 0,8 A e 1,0 A) foram confirmadas por microsonda Raman. Foram também identificados magnetita, granada rosa, ilmenita, xenotímio, epidoto, clinozoisita, gahnita, monazita, muscovita, zircão, turmalina castanha e azul (Tab. 10). A granada e a ilmenita estão alteradas, ocasionando a transformação da primeira para granada limonitizada, enquanto, na ilmenita, forma-se uma massa branca de cristais muito pequenos, informalmente designada de leucoxênio. Esta massa foi caracterizada por microsonda Raman como sendo composta de brookita e anatásio. A columbita-tantalita também se encontra alterada, com a formação de uma massa esbranquiçada-amarelada, que foi identificada por microsonda Raman como microlita.

Tabela 10 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-05.

Amostra FA-05		Procedência Pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (fácies média)		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 2,13 gramas							
Magnético (0,4%)		0,3 A (4,1%)		0,5 A (27,9%)		0,6 A (3,1%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Granada limonitizada	70	Columbita-tantalita	95	Columbita-tantalita	98
		Granada rosa	20	Granada limonitizada	2	Xenotímio	2
		Ilmenita	10	Ilmenita	2	Gahnita	Tr
		Columbita-tantalita	Tr	Xenotímio	1	Granada limonitizada	Tr
		Xenotímio	Tr	Epidoto	Tr	Granada rosa	Tr
		Epidoto	Tr	Granada rosa	Tr	Epidoto/clinozoisita	Tr
				Gahnita	Tr	Cassiterita	Tr
						Monazita	Tr
						Turmalina castanha	Tr
0,8 A (2,8%)		1,0 A (3,3%)		1,8 A (2,2%)		NÃO ATRAÍVEL (56,3%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Columbita - tantalita	95	Columbita - tantalita	93	Microlita*	60	Cassiterita	50
Monazita	3	Microlita*	5	Zircão	30	Microlita*	40
Granada limonitizada	2	Monazita	2	Cassiterita	10	Zircão	10
Epidoto	Tr	Epidoto	Tr	Muscovita	Tr		
Muscovita	Tr	Cassiterita	Tr				
Gahnita	Tr	Muscovita	Tr				
Turmalina castanha	Tr	Gahnita	Tr				
Cassiterita	Tr	Turmalina azul*	Tr				
Turmalina azul*	Tr	Turmalina castanha	Tr				

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-06 ocorrem, em grande quantidade, granada rosa a incolor (fração 0,3 A), columbita/tantalita (frações 0,5 A,

0,6 A, 0,8 A e 1,0 A) e cassiterita (frações 1,8 A e não atraível). Observou-se o amplo predomínio das frações não atraível, 0,3 A e 0,5 A, bem como de columbita-tantalita, cassiterita, granada e zircão no concentrado (Fig. 20). Foram também identificados magnetita, granada limonitizada, ilmenita, limonita, óxidos/hidróxidos de Mn, epidoto, clinozoisita, gahnita, anfibólio, monazita, turmalina castanha, microlita, muscovita e zircão (Tab. 11). Grãos de gahnita, microlita e turmalina foram encontrados, mas em quantidade muito reduzida (< 6 grãos/mineral), sendo que a microlita foi caracterizada por microsonda Raman. A granada rosa encontra-se envolvida parcial ou completamente por limonita e não foi observado xenotímio.

Tabela 11 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-06.

Amostra FA-06		Procedência Pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 2,14 gramas							
Magnético (0,1%)		0,3 A (14,0%)		0,5 A (16,9%)		0,6 A (4,4%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Granada rosa-incolor	60	Columbita - tantalita	94	Columbita - tantalita	94
		Granada limonitizada	27	Cassiterita	2	Óxido/hidróxido Mn	3
		Ilmenita	12	Granada limonitizada	2	Cassiterita	2
		Columbita - tantalita	1	Limonita	1	Limonita	1
				Óxido/hidróxido Mn	1	Epidoto/clinozoisita	Tr
				Granada rosa	Tr	Microlita*	Tr
				Epidoto/clinozoisita	Tr	Gahnita	Tr
				Gahnita	Tr	Turmalina castanha	Tr
						Anfibólio	Tr
0,8 A (3,8%)		1,0 A (2,3%)		1,8 A (5,4%)		NÃO ATRAÍVEL (52,9%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Columbita - tantalita	89	Columbita - tantalita	72	Cassiterita	94	Cassiterita	89
Cassiterita	10	Cassiterita	28	Zircão	5	Zircão	10
Limonita	1	Epidoto	Tr	Microlita*	1	Microlita*	1
Monazita	Tr	Microlita*	Tr	Muscovita	Tr	Muscovita	Tr
Epidoto	Tr	Monazita	Tr				
Microlita*	Tr						
Gahnita	Tr						

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-07 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), columbita/tantalita (fração 0,5 A), epidoto e limonita (fração 0,6 A), monazita (fração 0,8 A) e zircão (frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível). Ressalta-se o predomínio das frações 0,3 A e 0,5 A, enquanto as demais são praticamente insignificantes. Com isso caracterizou-se o predomínio de ilmenita e columbita-tantalita no concentrado (Fig. 20). Foram também identificados magnetita, granada rosa, granada limonitizada, xenotímio, anfibólio, óxidos/hidróxidos de Mn, turmalina castanha, gahnita, muscovita, microlita, apatita,

anatásio e brookita (Tab. 12), sendo que os quatro últimos minerais foram confirmados por microsonda Raman. Não foi caracterizada a presença de cassiterita no concentrado.

Tabela 12 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-07.

Amostra FA-07		Procedência Pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (fácies média)		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 0,48 gramas							
Magnético (5,2%)		0,3 A (33,5%)		0,5 A (49,7%)		0,6 A (2,5%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	95	Columbita-tantalita	90	Epidoto	50
		Granada rosa	5	Granada limonitizada	5	Limonita	46
		Granada limonitizada	Tr	Granada rosa	3	Zircão	3
		Xenotímio	Tr	Xenotímio	2	Columbita-tantalita	1
		Columbita-tantalita	Tr	Epidoto	Tr	Óxido/hidróxido Mn	Tr
		Zircão	Tr	Zircão	Tr	Xenotímio	Tr
				Anfibólio	Tr	Monazita	Tr
						Turmalina castanha	Tr
						Anfibólio	Tr
0,8 A (3,7%)		1,0 A (0,6%)		1,8 A (1,9%)		NÃO ATRAÍVEL (2,9%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Monazita	85	Zircão	74	Zircão	69	Zircão	80
Zircão	12	Agreg. com anatasio	25	Anatásio*	30	Anatásio*	15
Limonita	3	Muscovita	1	Microlita*	1	Brookita*	5
Turmalina castanha	Tr	Gahnita	Tr	Muscovita	Tr	Microlita*	Tr
Gahnita	Tr					Apatita*	Tr

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-08 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), columbita/tantalita (frações 0,5 A e 0,6 A), monazita (fração 0,8 A) e zircão (frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível). Ressalta-se que o material é muito fino, predominando a fração 0,5 A o que, consequentemente, acarreta na presença em grande quantidade de columbita-tantalita no concentrado (Fig. 20). Foram identificados magnetita, granada rosa e limonitizada, xenotímio, limonita, epidoto, anfibólio, óxidos/hidróxidos de Mn, gahnita, turmalina castanha, muscovita, biotita, rutilo, apatita e microlita (Tab. 13), sendo que monazita e os três últimos minerais foram identificados por microsonda Raman. Ressalta-se que a ilmenita encontra-se alterada para um agregado de óxidos de titânio de coloração esbranquiçada. Não foi caracterizada a presença de cassiterita no concentrado.

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-09 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), columbita-tantalita (frações 0,5 A), gahnita (frações 0,6 A, 0,8 A e 1,0 A) e andaluzita (fração 1,8 A). Predominam as frações 0,6 A e 0,8 A e consequentemente gahnita no concentrado (Fig. 20). Foram também identificados magnetita, granada rosa e limonitizada, limonita, óxidos/hidróxidos de

Mn, epidoto, clinozoisita, monazita, turmalina castanha, muscovita, anatásio, estauroлита e zircão (Tab. 14). Andaluzita, estauroлита e anatásio foram identificados por microssonda Raman. Cassiterita, microlita e xenotímio não foram identificados.

Tabela 13 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-08.

Amostra FA-08		Procedência Pegmatito intrusivo no meta granitoide Ritópolis (fácies média)		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 1,23 gramas							
Magnético (1,3%)		0,3 A (15,3%)		0,5 A (75,7%)		0,6 A (1,3%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	92	Columbita-tantalita	92	Columbita-tantalita	40
		Granada rosa	5	Granada limonitizada	5	Limonita	30
		Granada limonitizada	2	Xenotímio	3	Epidoto	20
		Limonita	Tr	Epidoto	Tr	Zircão cinza	9
		Epidoto	Tr	Zircão	Tr	Xenotímio	1
		Columbita-tantalita	Tr			Óxido/hidróxido Mn	Tr
						Anfibólio	Tr
						Gahnita	Tr
						Turmalina castanha	Tr
0,8 A (3,2%)		1,0 A (0,7%)		1,8 A (1,3%)		NÃO ATRAÍVEL (1,0%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Monazita amarela	44	Zircão	65	Zircão	75	Zircão	98
Monazita alterada*	35	Muscovita	25	Muscovita	25	Microlita*	2
Zircão	15	Monazita	5	Biotita/agregados	Tr	Muscovita	Tr
Óxido/hidróxido Mn	5	Monazita alterada*	2	Monazita*	Tr	Rutilo*	Tr
Limonita	1	Biotita	2	Microlita*	Tr	Cassiterita	Tr
Turmalina castanha	Tr	Turmalina castanha	1	Apatita*	Tr		
Gahnita	Tr	Gahnita	Tr	Rutilo*	Tr		

Tabela 14 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-09.

Amostra FA-09		Procedência Pegmatito intrusivo em filitos da sequência metavulcano- sedimentar Rio das Mortes		Observações * Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 1,65 gramas							
Magnético (1,2%)		0,3 A (9,7%)		0,5 A (14,9%)		0,6 A (59,1%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	90	Columbita - tantalita	50	Gahnita	98
		Columbita-tantalita	5	Granada limonitizada	45	Limonita	2
		Granada limonitizada	3	Monazita	4	Monazita	Tr
		Granada rosa	2	Óxido/hidróxido Mn	1	Turmalina castanha	Tr
		Gahnita	Tr	Epidoto/clinozoisita	Tr	Andaluzita*	Tr
		Zircão	Tr	Turmalina castanha	Tr	Columbita-tantalita	Tr
				Gahnita	Tr	Epidoto/clinozoisita	Tr
				Granada Rosa	Tr	Estauroлита*	Tr
0,8 A (13,9%)		1,0 A (0,6%)		1,8 A (0,6%)		NÃO ATRAÍVEL (0,0%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Gahnita	100	Gahnita	92	Andaluzita	45		
Turmalina castanha	Tr	Andaluzita	4	Zircão	35	* Material foi extraviado	
Anatásio	Tr	Muscovita	2	Gahnita	10		
Andaluzita*	Tr	Anatásio*	1	Anatásio*	10		
Estauroлита*	Tr	Turmalina castanha	1	Muscovita	Tr		
		Limonita	Tr	Estauroлита*	Tr		
		Estauroлита*	Tr				
		Zircão	Tr				

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-10 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), limonita (frações 0,5 A e 0,6 A), cassiterita (fração 0,8 A) e andaluzita (frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível). Predominam as frações 0,3 A, 0,5 A e NA e destaca-se a presença de cassiterita e andaluzita por quase todas as frações do concentrado, bem como ocorrem magnetita e ilmenita em grande quantidade (Fig. 20). Foram ainda identificados granada vermelha, rosa, branca e limonitizada, epidoto, óxidos/hidróxidos de Mn, turmalina azul clara a branca-azulada (provável rossmanita) e castanha, xenotímio, estauroлита, columbita-tantalita, monazita, gahnita, zircão, muscovita e microlita (Tab. 15). Diversos minerais foram identificados por microsonda Raman, dentre os quais, estauroлита laranja e bege clara, granada branca, andaluzita branca e branca amarronzada, ilmenita cinza clara, turmalina azul clara e microlita. Cabe destacar que a ilmenita encontra-se fortemente alterada para uma massa esbranquiçada designada informalmente de leucoxênio.

Tabela 15 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-10.

Amostra FA-10		Procedência		Observações			
Massa do concentrado 4,92 gramas		Pegmatito intrusivo em filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes		* Mineral identificado por espectroscopia Raman Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Magnético (25,0%)		0,3 A (22,3%)		0,5 A (17,1%)		0,6 A (<0,1%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	60	Limonita	44	Limonita	48
		Andaluzita	30	Ilmenita	27	Cassiterita	30
		Granada limonitizada	10	Andaluzita*	17	Andaluzita	15
		Epidoto	Tr	Columbita-tantalita	11	Turmalina	5
		Turmalina	Tr	Turmalina	1	Óxido/hidróxido Mn*	2
		Xenotímio	Tr	Cassiterita	Tr	Gahnita	Tr
		Zircão	Tr	Estauroлита*	Tr	Monazita	Tr
		Estauroлита*	Tr	Xenotímio	Tr	Estauroлита*	Tr
		Granada	Tr	Epidoto	Tr	Epidoto	Tr
				Monazita	Tr		
				Zircão	Tr		
0,8 A (11,4%)		1,0 A (0,7%)		1,8 A (1,3%)		NÃO ATRAÍVEL (22,2%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Cassiterita	35	Andaluzita	62	Andaluzita	79	Andaluzita	50
Andaluzita	25	Cassiterita	35	Cassiterita	17	Cassiterita	35
Limonita	21	Turmalina	2	Turmalina	1	Zircão	10
Turmalina	18	Óxido/hidróxido Mn*	1	Zircão	3	Microlita*	5
Óxido/hidróxido Mn*	1	Gahnita	Tr	Estauroлита*	Tr		
Gahnita	Tr	Zircão	Tr				
Estauroлита*	Tr	Muscovita	Tr				
Epidoto	Tr	Estauroлита*	Tr				
Zircão	Tr						

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-11 ocorrem, em grande quantidade, columbita-tantalita (frações 0,3 A e 0,5 A), monazita (fração 0,6 A), gahnita (fração 0,8 A) e zircão (frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível). As frações magnética, 0,3 A, 0,5 A e 0,6 A são as mais representativas no concentrado, ocasionando a ampla presença de magnetita, columbita-tantalita, monazita e gahnita (Fig. 20). Foram também identificados ilmenita, granada rosa e limonitizada, xenotímio, limonita, epidoto, clinozoisita, óxidos/hidróxidos de Mn, turmalina castanha, muscovita, rutilo e cianita (Tab. 16). Microlita e cassiterita ocorrem em baixíssima quantidade e só foram identificadas através de análises por MEV/EDS, enquanto cianita, rutilo e clinozoisita foram caracterizados por microsonda Raman.

Tabela 16 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-11.

Amostra FA-11		Procedência Pegmatito intrusivo em anfíbolitos da SMVS Rio das Mortes		Observações Mineral identificado por *Raman, **MEV/EDS Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 2,99 gramas							
Magnético (7,3%)		0,3 A (23,1%)		0,5 A (35,8%)		0,6 A (28,0%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Columbita - tantalita	87	Columbita - tantalita	50	Monazita	60
		Ilmenita	8	Monazita	31	Gahnita	40
		Granada limonitizada	3	Xenotímio	10	Limonita	Tr
		Granada rosa	2	Granada limonitizada	6	Turmalina castanha	Tr
		Gahnita	Tr	Gahnita	3	Epidoto	Tr
		Xenotímio	Tr	Epidoto	Tr	Óxido/hidróxido Mn	Tr
		Monazita	Tr	Granada rosa	Tr		
		Limonita	Tr	Óxido/hidróxido Mn	Tr		
		Epidoto	Tr	Clinozoisita*	Tr		
		Zircão	Tr	Turmalina castanha	Tr		
		Clinozoisita	Tr				
0,8 A (2,2%)		1,0 A (0,1%)		1,8 A (0,7%)		NÃO ATRAÍVEL (2,8%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Gahnita	94	Zircão	93	Zircão	100	Zircão	98
Monazita	5	Rutilo*	7	Rutilo	Tr	Rutilo*	2
Turmalina castanha	1	Turmalina castanha	Tr	Muscovita	Tr	Muscovita	Tr
Zircão	Tr	Gahnita	Tr	Cianita*	Tr	Cianita*	Tr
Rutilo*	Tr	Monazita	Tr	Gahnita	Tr	Cassiterita**	Tr
		Muscovita	Tr	Microlita**	Tr		

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-12 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), columbita-tantalita (fração 0,5 A), microlita (frações 0,6 A e 1,0 A), monazita (fração 0,8 A) e zircão (fração 1,8 A e não atraível). As frações 0,5 A e 0,8 A são as mais representativas no concentrado, fazendo com que columbita-tantalita, granada, limonita, microlita e monazita ocorram em proporção muito próxima (Fig. 20). Cassiterita está presente, mas ocorre em pequena quantidade. Monazita ocorre com coloração branca leitosa e amarela.

Foram ainda encontrados magnetita, granada rosa e limonitizada, limonita, pirita limonitizada, óxidos/hidróxidos de Mn, xenotímio, epidoto, anfibólio, rutilo, cassiterita, turmalina castanha e muscovita (Tab. 17). Microlita e rutilo foram caracterizados via microsonda Raman, enquanto a presença de columbita-tantalita nos produtos de menor susceptibilidade magnética (corrente mais alta) foi confirmada por MEV/EDS.

Tabela 17 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-12.

Amostra FA-12		Procedência Pegmatito intrusivo em anfíbolitos da SMVS Rio das Mortes		Observações Mineral identificado por *Raman, **MEV/EDS Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Massa do concentrado 1,36 gramas							
Magnético (2,1%)		0,3 A (7,9%)		0,5 A (53,6%)		0,6 A (3,9%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	70	Columbita-tantalita	36	Microlita/pirocloro**	40
		Granada limonitizada	20	Granada limonitizada	30	Óxido/hidróxido Mn	28
		Granada rosa	10	Limonita	25	Xenotímio	25
				Xenotímio	7	Monazita*	3
				Óxido/hidróxido Mn	2	Epidoto	3
				Granada rosa	Tr	Limonita	1
				Epidoto	Tr	Zircão	Tr
				Pirita limonitizada	Tr	Turmalina castanha	Tr
						Anfibólio	Tr
0,8 A (24,0%)		1,0 A (4,4%)		1,8 A (1,5%)		NÃO ATRAÍVEL (2,6%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Monazita Branca	56	Microlita/pirocloro**	68	Zircão	55	Zircão	99
Microlita/pirocloro**	43	Óxido/hidróxido Mn	20	Microlita*	44	Cassiterita	1
Óxido/hidróxido Mn	1	Monazita	10	Óxido/hidróxido Mn	1	Rutilo*	Tr
Zircão	Tr	Zircão	2	Muscovita	Tr		
Turmalina castanha	Tr	Turmalina castanha	Tr	Rutilo*	Tr		
Columbita-tantalita**	Tr	Muscovita	Tr				
		Columbita-tantalita**	Tr				

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-13 ocorrem, em grande quantidade, granada vermelha (fração 0,3 A e 0,5 A), xenotímio (fração 0,6 A), monazita (fração 0,8 A), microlita (frações 1,0 A e 1,8 A) e zircão (fração não atraível). Predominam as frações 0,3 A, 0,5 A e não atraível, sendo que granada vermelha e zircão são os minerais mais representativos, porém ilmenita também está presente em grande quantidade (Fig. 20). Foram ainda identificados magnetita, granada limonitizada, ilmenita, óxidos/hidróxidos de Mn, epidoto, turmalina, limonita, biotita/hidrobiotita e muscovita (Tab. 18). Não foram identificadas cassiterita e columbita-tantalita, enquanto microlita foi caracterizada por MEV/EDS.

No concentrado de minerais pesados da amostra FA-14 ocorrem, em grande quantidade, ilmenita (fração 0,3 A), granada vermelha (fração 0,5 A), xenotímio (frações 0,5 A e 0,6 A), monazita (fração 0,8 A) e zircão (frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível). Há um amplo predomínio da fração magnética e, conseqüentemente, de

magnetita no concentrado, porém granada vermelha, ilmenita, monazita e zircão também se destacam (Fig. 20). Foram também identificados granada limonitizada, epidoto, óxidos/hidróxidos de Mn, biotita, limonita, turmalina, rutilo e muscovita (Tab. 19). Não foi observada a presença de columbita-tantalita, microlita e cassiterita.

Tabela 18 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-13.

Amostra FA-13		Procedência		Observações			
Massa do concentrado 3,00 gramas		Pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita		Mineral identificado por *Raman, **MEV/EDS Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Magnético (0,2%)		0,3 A (24,1%)		0,5 A (36,0%)		0,6 A (2,3%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Granada vermelha	70	Granada vermelha	40	Xenotímio	47
		Granada limonitizada	20	Ilmenita alterada**	30	Óxido/hidróxido Mn	30
		Ilmenita	10	Granada limonitizada	23	Epidoto	20
				Óxido/hidróxido Mn	5	Biotita/hidrobiotita	2
				Xenotímio	2	Monazita	1
				Epidoto	Tr	Limonita	Tr
						Muscovita	Tr
0,8 A (1,4%)		1,0 A (0,5%)		1,8 A (4,0%)		NÃO ATRAÍVEL (31,5%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Monazita	53	Microlita/torita**	55	Microlita/torita**	53	Zircão	100
Óxido/hidróxido Mn	25	Monazita	35	Zircão	47	Microlita/torita**	Tr
Biotita/hidrobiotita	20	Biotita/hidrobiotita	10	Monazita	Tr		
Turmalina castanha	1	Zircão	Tr	Biotita/hidrobiotita	Tr		
Limonita	1	Turmalina castanha	Tr				
Zircão	Tr	Muscovita	Tr				
Epidoto	Tr	Epidoto	Tr				
Microlita	Tr						
Xenotímio	Tr						

Tabela 19 – Resumo das informações sobre o concentrado de minerais pesados da amostra FA-14.

Amostra FA-14		Procedência		Observações			
Massa do concentrado 4,05 gramas		Pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita		Mineral identificado por *Raman, **MEV/EDS Tr = identificado como traço (poucos grãos) Fração magnética (% do total)			
Magnético (74,2%)		0,3 A (4,2%)		0,5 A (9,9%)		0,6 A (1,2%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Magnetita	100	Ilmenita	80	Granada vermelha	58	Xenotímio	57
		Granada vermelha	15	Granada limonitizada	37	Monazita	25
		Granada limonitizada	5	Xenotímio	2	Epidoto	15
		Epidoto	Tr	Monazita	2	Óxido/hidróxido Mn	3
		Xenotímio	Tr	Epidoto	1	Zircão	Tr
				Zircão	Tr	Biotita	Tr
				Ilmenita	Tr	Limonita	Tr
				Óxido/hidróxido Mn	Tr		
0,8 A (7,2%)		1,0 A (0,2%)		1,8 A (1,2%)		NÃO ATRAÍVEL (2,0%)	
Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%	Mineral	%
Monazita	95	Zircão	75	Zircão	99	Zircão	100
Zircão	4	Muscovita	25	Muscovita	1	Rutilo	Tr
Óxido/hidróxido Mn	1			Torita**	Tr		
Biotita	Tr						
Muscovita	Tr						
Turmalina castanha	Tr						

10. RESULTADOS DOS ESTUDOS DE MINERALOGIA

10.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os principais resultados obtidos nos minerais estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei, sendo que alguns desses foram caracterizados apenas por estereomicroscopia ótica, enquanto outros foram submetidos a técnicas analíticas mais acuradas como microsonda Raman, microscopia eletrônica de varredura com análises EDS e microsonda eletrônica com análises WDS. A decisão de qual mineral seria estudado por determinada técnica se baseou na importância desse para o entendimento da província, sua relevância entre os outros minerais encontrados e a disponibilidade de informações na literatura para comparação dos resultados. Apesar da presença e importância dos minerais do grupo da columbita-euxenita e também do grupo da microlita na província, sendo que os mesmos são explorados na mina da Volta Grande, optou-se por não estudá-los por técnicas mais refinadas nesse momento devido à grande complexidade dos dados preliminares obtidos (item 10.8.2). A tabela 20 lista os minerais estudados e quais as técnicas analíticas que foram utilizadas.

Dos 25 minerais identificados e descritos por estereomicroscopia, cinco foram analisados em suas principais características por MEV (cassiterita, gahnita, granada, ilmenita e xenotímio) e destes, cassiterita, gahnita e ilmenita também foram analisadas por microsonda eletrônica em relação à sua química mineral. Análises por microsonda Raman foram realizadas com dois interesses principais: auxílio à classificação de grãos não identificados por estereomicroscopia (ferramenta de apoio com análises expeditas de forma puramente qualitativa); e caracterização espectroscópica do grupo mineral estudado, sendo esta realizada apenas nos grãos de gahnita e de granada.

10.2 Cassiterita

A cassiterita é um óxido de estanho, de fórmula SnO_2 , tipicamente contém Nb e Ta e geralmente apresenta Fe^{2+} e Fe^{3+} em concentrações importantes e Mn, Ti e Sc em concentrações menores (Deer *et al.*, 2013).

Tabela 20 – Lista de minerais, ocorrência e principais técnicas analíticas utilizadas.

Mineral	Amostras de ocorrência (corpos)	Técnicas analíticas utilizadas
Anatásio	FA-07, FA-09	EO, Raman
Andaluzita	FA-09, FA-10	EO
Anfibólio	FA-02, FA-03, FA-06, FA-07, FA-08, FA-12	EO
Apatita	FA-02, FA-07, FA-08	EO
Biotita/hidrobiotita	FA-08, FA-13	EO
Brookita	FA-07	EO, Raman
Cassiterita	FA-02, FA-03, FA-05, FA-06, FA-10, FA-12	EO, MEV/EDS, EMPA/WDS
Cianita	FA-11	EO, Raman
Clinozoisita	FA-02	EO
Columbita-tantalita	Todas, exceto FA-13 e FA14	EO
Epidoto	FA-03, FA-07, FA-08, FA-12, FA-13, FA-14	EO
Estaurolita	FA-09, FA-10	EO, Raman
Gahnita	FA-02, FA-03, FA-09, FA-11	EO, MEV/EDS, EMPA/WDS, Raman
Granada	Todas	EO, MEV/EDS, Raman
Ilmenita	Todas, exceto FA-02	EO, MEV/EDS, EMPA/WDS
Limonita/hematita	Todas, exceto FA-02 e FA-05	EO
Magnetita	Todas	EO
Microlita	FA-02, FA-05, FA-06, FA-07, FA-08, FA-10, FA-12, FA-13	EO, Raman
Monazita	Todas, exceto FA-06	EO
Muscovita	Todas	EO
Óxidos de Mn	FA-02, FA-06, FA-08, FA-09, FA-10, FA-12, FA-13, FA-14	EO
Rutilo	FA-11	EO, Raman
Turmalina	FA-08, FA-09, FA-10, FA-11, FA-13	EO, Raman
Xenotímio	FA-05, FA-07, FA-08, FA-11, FA-12, FA-13, FA-14	EO, MEV/EDS
Zircão	Todas	EO, MEV/EDS

EO - esteromicroscopia ótica

MEV/EDS - microscopia eletrônica de varredura com análises por espectroscopia dispersiva

EMPA/WDS - microsonda eletrônica com espectroscopia por comprimento de onda

Raman - microespectroscopia Raman

10.2.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

A cassiterita varia de translúcida a opaca e apresenta brilho desde adamantino nos cristais menores, a vítreo nos maiores. Sua tonalidade pode ser castanha clara (em diferentes tons), vermelha, marrom e bege, chegando até preta submetálica, sendo que esta última está relacionada aos cristais maiores e aos agregados cristalinos (Fig. 21). Nas amostras FA-02, FA-03, FA-05 e FA-06 a cassiterita é o mineral mais importante dos produtos 1,8 A e/ou não atraível, enquanto nas amostras FA-10 e FA-12, ela varia de comum (ocorrendo com proporção inferior a 20%) até rara. Destaca-se que a cassiterita está ausente dos concentrados FA-07, FA-08, FA-09, FA-11, FA-13 e FA-14. Ocorre principalmente a partir da fração 1,0 A porém alguns grãos podem ser encontrados desde a fração 0,5 A, como no caso das amostras FA-02 e FA-06. A forma de seus grãos varia muito, desde anédrica (fragmentos de cristal) até euédrica e comumente ocorre associada a um agregado

de cor branca (provável feldspato, por vezes caulinizado), amarela (provável varlamoffita) e ao quartzo. Cabe ressaltar que a presença de cristais bem formados (euédricos) em conjunto com os anédricos é um indício da presença de duas gerações de cassiterita que foram formadas em condições de cristalização diferentes. Frequentemente apresenta cristais geminados sob a forma de bico de estanho e seu tamanho pode chegar a 1 mm, mas em geral fica abaixo de 400 micrômetros. Pode ser detectada a partir do teste com Zn em pó e HCl, pois reage formando uma superfície prateada ou da cor do estanho. Sob luz transmitida, é possível observar a presença de inclusões.

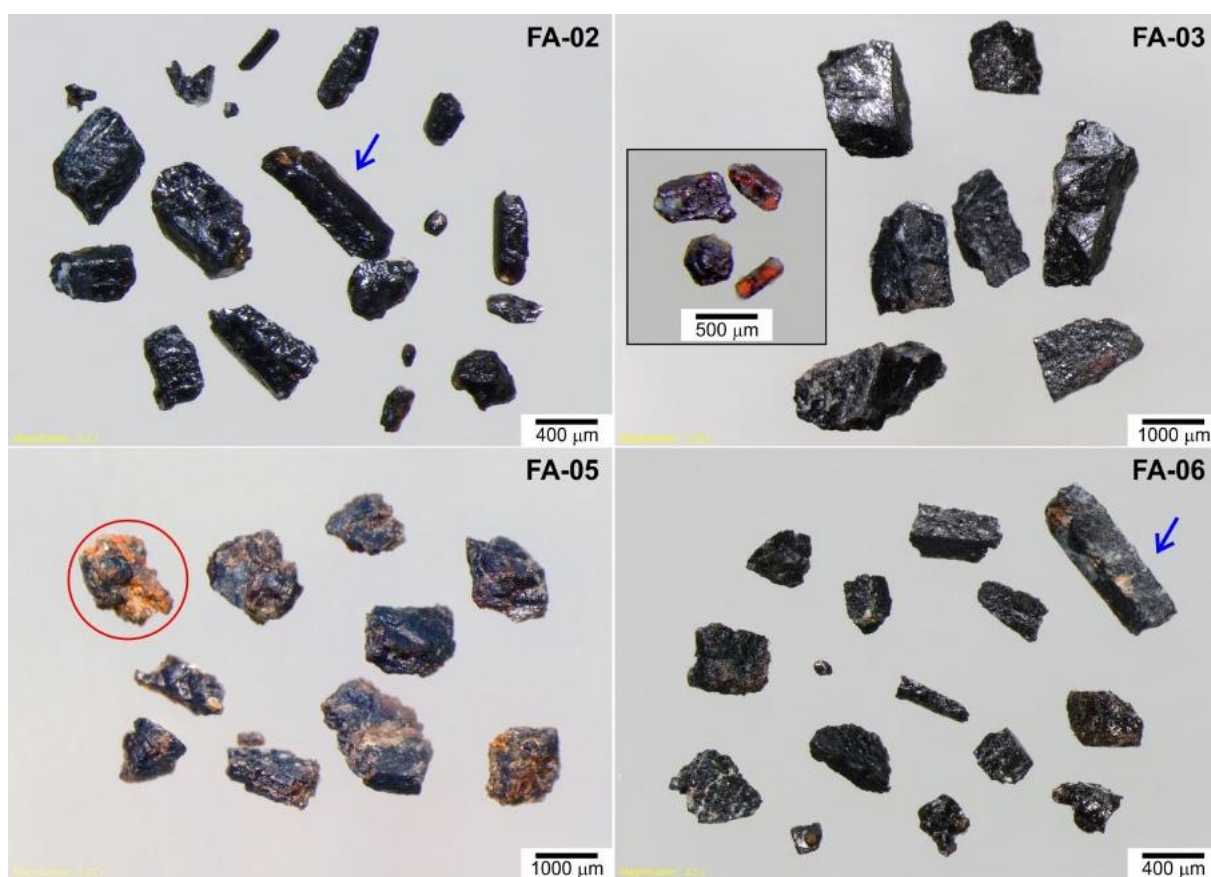


Figura 21 – Exemplos de grãos de cassiterita dos pegmatitos estudados. Na amostra FA-03 é possível ver um detalhe dos grãos menores de cassiterita que apresentam cor vermelha e são translúcidos em contraste com os grãos maiores que, em geral, apresentam cor preta. A seta azul indica cristais tabulares tetragonais característicos da cassiterita. Grão marcado com círculo vermelho mostra a associação de cassiterita com uma massa amarelada.

10.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

A cassiterita pode ocorrer límpida (Fig. 22a, b), mas é comum apresentar inclusões sólidas de diferentes minerais do grupo da columbita-euxenita, subgrupo da columbita [tantalita-(Fe), tantalita-(Mn), columbita-(Fe) e columbita-(Mn)], dos

grupos da microlita e do pirocloro (com teores variáveis de Pb e Sn) e ainda de ferrowodginita (Fig. 22c, d) além de quartzo, albita, biotita e zircão (Fig. 22e, f). As inclusões dos minerais de Nb e/ou Ta são anédricas e, em geral, possuem tamanho de poucos micrômetros, enquanto as inclusões de quartzo e feldspato apresentam-se subarredondadas e com tamanho médio maior (chegando a dezenas de micrômetros). Outras inclusões observadas foram de galena, esfalerita e bismita (óxido de Bi), mas elas ocorrem de forma restrita e só foram identificadas na amostra FA-05. Alguns dos grãos de cassiterita da amostra FA-10 estão intercrescidos com columbita-(Mn), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn) (Fig. 22d). A identificação e classificação das inclusões encontradas foram realizadas através de dados semiquantitativos obtidos por EDS e quantitativos de química mineral obtidos por WDS (Anexo II).

Além das inclusões acima citadas, é comum encontrar material de alteração em fraturas ou na borda dos grãos de cassiterita (Fig. 23a-d). Esse material pode ser dividido em dois tipos diferentes, sendo o primeiro formado por minerais silicáticos neoformados (caulinita, illita ou outros filossilicatos) que ocorrem em conjunto com quartzo e correspondem a produtos de alteração intempérica do pegmatito (Fig. 22e, 23a). O segundo é composto por diferentes minerais de Ta, Nb e Pb (podendo apresentar ainda Fe, Mn, Ca, Sr, Sn e Ba), e correspondem principalmente a plumbo/estanomicrolita e pirocloro/microlita (com Pb). Estes últimos corresponderiam ao resultado da mobilização e reprecipitação e/ou reconcentração de elementos presentes na própria cassiterita (Fig. 23a). Dois exemplos desse tipo de alteração foram identificados nas amostras FA-05 e FA-06. Na amostra FA-05 (Fig. 23b) é possível observar que o processo de dissolução ao longo de fraturas segue uma direção cristalográfica do grão de cassiterita, com a deposição de um material rico em Sn (40 a 50% em peso de SnO_2), com Nb, Fe e Ta (~10, 9 e 6% em peso de cada óxido, respectivamente) contendo ainda, de forma subordinada, Si, Ti, Ca e Al. Na amostra FA-06 (Fig. 23c, d) é possível observar a presença de um mineral de hábito botrioidal (plumbomicrolita) preenchendo uma fratura no grão de cassiterita. Grande parte das análises de EDS e WDS nos materiais que preenchem as fraturas ou nas inclusões presentes nos grãos de cassiterita indicaram composições químicas que apontam para a mistura de componentes (Anexo II).

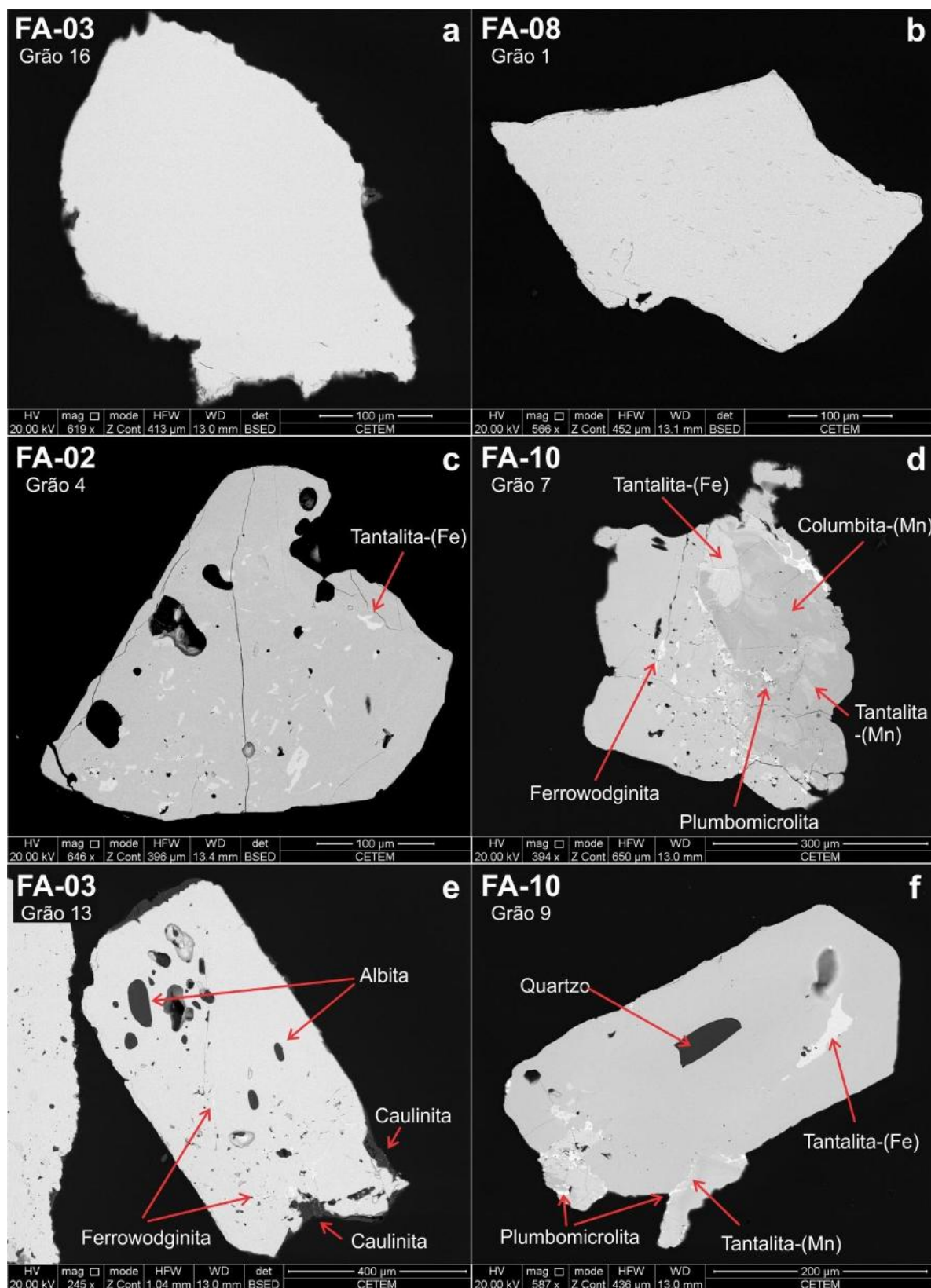


Figura 22 - Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de cassiterita estudados. Em (a) e (b) grãos de cassiterita límpidos e sem inclusões; em (c) grão de cassiterita com diversas inclusões de tantalita-(Fe); em (d) grão de cassiterita intercrescido com columbita-(Mn), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn) (em diferentes proporções) e com material de alteração nas fraturas (plumbomicrolita); em (e) e (f) presença de inclusões subarredondadas de silicatos, além dos minerais de Nb/Ta indicados.

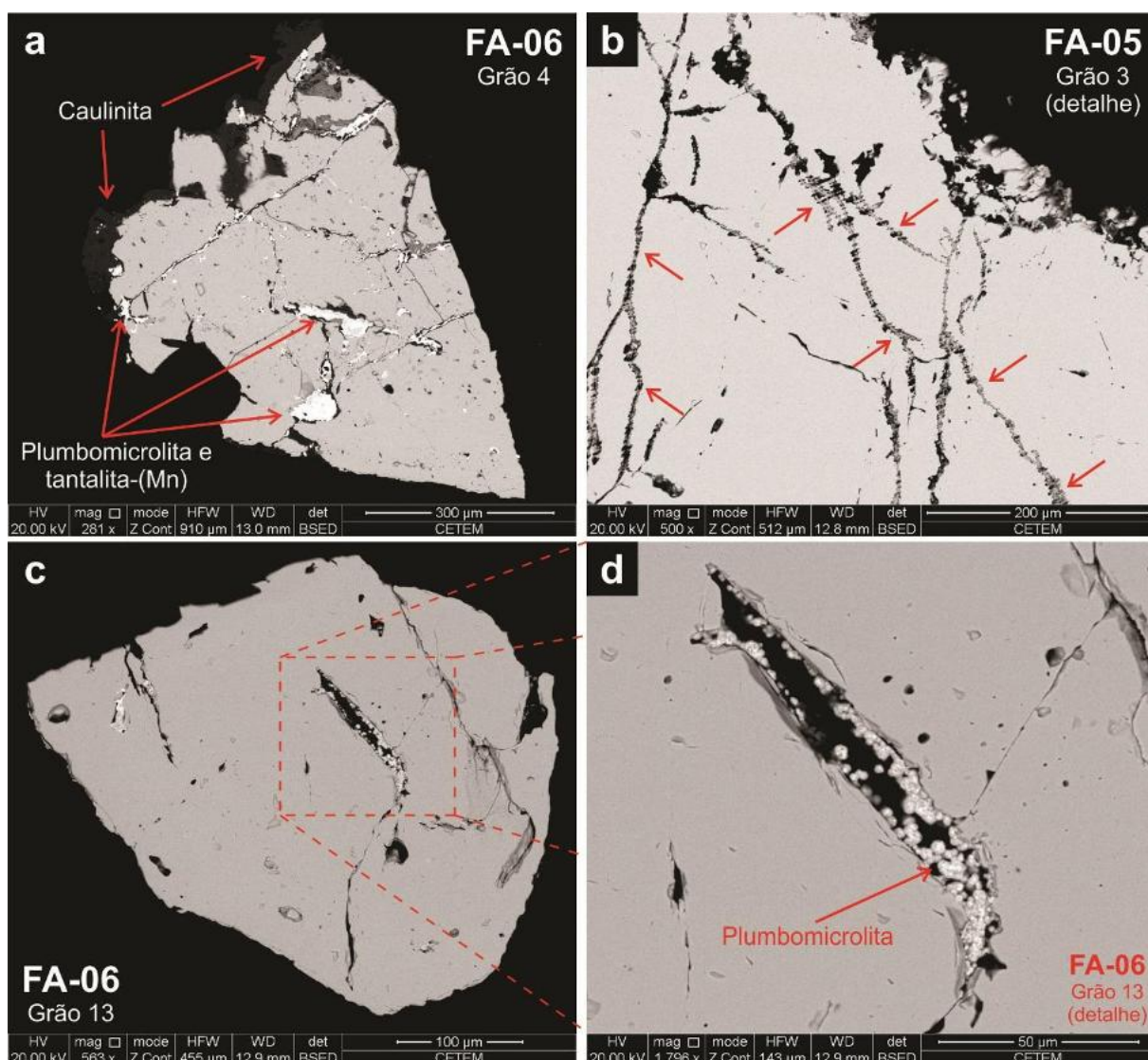


Figura 23 - Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos dos materiais de alteração encontrados nos grãos de cassiterita. Em (a), caulinita nas bordas e plumbomicrolita (fase mais clara) com tantalita-(Mn) (fase mais escura) preenchendo fraturas do grão; em (b), fraturas no grão de cassiterita com deposição de material rico em Sn com Nb, Ta, Fe, Al e Si (mineral não identificado indicado pelas setas); em (c) e (d), plumbomicrolita em fratura no grão de cassiterita.

10.2.3 Química mineral por MEV/EDS e ME/WDS

Um total de 102 análises por EDS (Anexo III) e 249 análises por WDS (Anexo IV) foram realizadas em diferentes grãos de cassiterita da Província Pegmatítica de São João del Rei, sendo que estes são muito ricos em SnO_2 (acima de 85,8% em peso), enquanto Ta_2O_5 (0 a 11,3% em peso), Nb_2O_5 (0 a 3,6% em peso), FeO (0,02 a 2,0% em peso), TiO_2 (0 a 0,55% em peso) e MnO (0 a 0,24 % em peso) são encontrados em menor proporção (Tab. 21 e Anexos III e IV). SiO_2 e Al_2O_3 ocorrem como traços (até 0,1% em peso de cada óxido) em quase todas as análises,

enquanto Sc_2O_3 e WO_3 (até 0,11 e 0,35% em peso, respectivamente) foram identificados em apenas em alguns poucos grãos. Em geral as amostras são enriquecidas em Ta com uma alta razão Ta/(Ta+Nb) e baixa razão Mn/(Fe+Mn).

Tabela 21 – Composição química representativa (valores mais próximos à média) obtida por microsonda eletrônica/WDS dos diversos grãos de cassiterita presentes nos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Tabela completa de análises é apresentada no Anexo IV, assim como as condições de análise e padrões utilizados.

Rocha encaixante do pegmatito	Metadiorito Brumado				Metagranitoide Ritápolis			¹ SMVS Rio das Mortes					
								Filito			Anfibolito		
Amostra	FA02B	FA03	FA06A	FA06B	FA05	FA05	FA08	FA10A	FA10A	FA10B	FA12	FA12	FA12
Nº da análise	23	19	21	16	13	32	7	10	28	4	1	4	8
<i>Óxidos (% em peso)</i>													
SiO ₂	0,03	0,03	0,01	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,02	0,04	0,06
TiO ₂	0,05	0,05	0,02	0,08	0,01	0,00	0,09	0,01	0,06	0,01	0,11	0,20	0,01
SnO ₂	96,77	97,87	97,74	98,61	99,68	99,46	98,94	95,69	93,99	96,84	98,62	98,44	99,90
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
FeO	0,67	0,33	0,42	0,28	0,15	0,14	0,23	0,66	0,91	0,57	0,43	0,36	0,13
MnO	0,08	0,00	0,08	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00
Nb ₂ O ₅	1,01	0,23	0,42	0,18	0,40	0,31	0,15	0,40	0,35	0,42	0,30	0,43	0,08
Ta ₂ O ₅	1,97	1,15	1,96	0,82	0,07	0,26	0,65	3,07	4,59	2,83	1,60	0,96	0,43
Sc ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00
WO ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Total	100,59	99,65	100,66	100,04	100,36	100,23	100,09	99,86	99,96	100,67	101,12	100,55	100,65
<i>Proporção atômica (2 oxigênios)</i>													
Si	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002
Ti	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,002	0,004	0,000
Sn	0,962	0,984	0,973	0,985	0,993	0,993	0,989	0,963	0,947	0,966	0,976	0,976	0,993
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe	0,014	0,007	0,009	0,006	0,003	0,003	0,005	0,014	0,019	0,012	0,009	0,008	0,003
Mn	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb	0,011	0,003	0,005	0,002	0,005	0,004	0,002	0,005	0,004	0,005	0,003	0,005	0,001
Ta	0,013	0,008	0,013	0,006	0,000	0,002	0,004	0,021	0,032	0,019	0,011	0,007	0,003
Sc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
W	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	1,004	1,003	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,004	1,003	1,003	1,002	1,001
<i>Razões (apfu)</i>													
Ta/(Ta+Nb)	0,54	0,75	0,74	0,73	0,08	0,34	0,71	0,82	0,89	0,80	0,77	0,58	0,76
Mn/(Fe+Mn)	0,11	0,00	0,15	0,05	0,09	0,22	0,02	0,01	0,06	0,02	0,03	0,00	0,00
(Ta+Nb)/(Fe+Mn)	1,58	1,50	1,71	1,24	1,44	1,43	1,29	1,82	1,73	1,99	1,52	1,51	1,41

¹SMVS refere-se à Sequência Metavulcano-Sedimentar

Dados obtidos por microsonda eletrônica/WDS

Em relação às rochas encaixantes dos pegmatitos, a composição dos grãos de cassiterita apresenta poucas variações quanto ao conteúdo dos elementos maiores (Sn, Ta e Nb) e menores (Fe, Mn, Al e Ti). As principais diferenças observadas foram em relação ao conteúdo mais elevado de Sn e mais baixo de Fe e Mn nos grãos de cassiterita dos corpos pegmatíticos intrusivos no metagranitoide Ritápolis, bem como no teor mais elevado de Nb encontrado nos grãos de cassiterita dos corpos pegmatíticos intrusivos no metadiorito Brumado e no conteúdo mais alto de

Ta caracterizado nos grãos de cassiterita presentes nos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Já no pegmatito intrusivo nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, os grãos de cassiterita apresentaram os maiores teores de Ti dentre todas as amostras estudadas (até 0,55% em peso), enquanto os teores de Sn, Ta e Nb são semelhantes aos encontrados nos grãos de cassiterita presente nos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis.

Em relação à substituição do Sn por outros elementos na estrutura dos grãos de cassiterita presentes nos corpos pegmatíticos estudados, caracterizou-se que esse processo ocorre envolvendo principalmente os pares (Ta,Nb) e (Fe,Mn). A entrada desses elementos pode ser explicada por dois mecanismos de substituição, sendo a primeira uma substituição direta do tipo $\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow (\text{Ta,Nb})^{4+}$ e a segunda, a substituição da cassiterita por columbita/tantalita com $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta,Nb})^{5+} + (\text{Fe,Mn})^{2+}$ (Černý *et al.*, 1985; Möller *et al.*, 1988). Essa última substituição pode ser caracterizada através da distribuição das análises da cassiterita em um diagrama ternário $\text{SnO} - (\text{Ta}_2\text{O}_5, \text{Nb}_2\text{O}_5) - (\text{FeO}, \text{MnO})$, sendo que o alinhamento dos resultados ao longo da linha $2(\text{Ta}_2\text{O}_5 + \text{Nb}_2\text{O}_5) + (\text{FeO} + \text{MnO})$ é indicativo da presença da columbita/tantalita inclusa e/ou exsolvida na cassiterita. A distinção entre substituição e exsolução neste caso torna-se muito complicado devido a limitações das técnicas analíticas empregadas e, segundo Möller *et al.* (1988), a incorporação de moléculas de $(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$ na estrutura da cassiterita é indistinguível da presença de inclusões submicroscópicas de niobo-tantalatos de mesma composição. Como é possível observar na figura 24a, as amostras estudadas apresentaram uma boa concordância com a linha columbita/tantalita (linha tracejada), principalmente nas amostras do pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes.

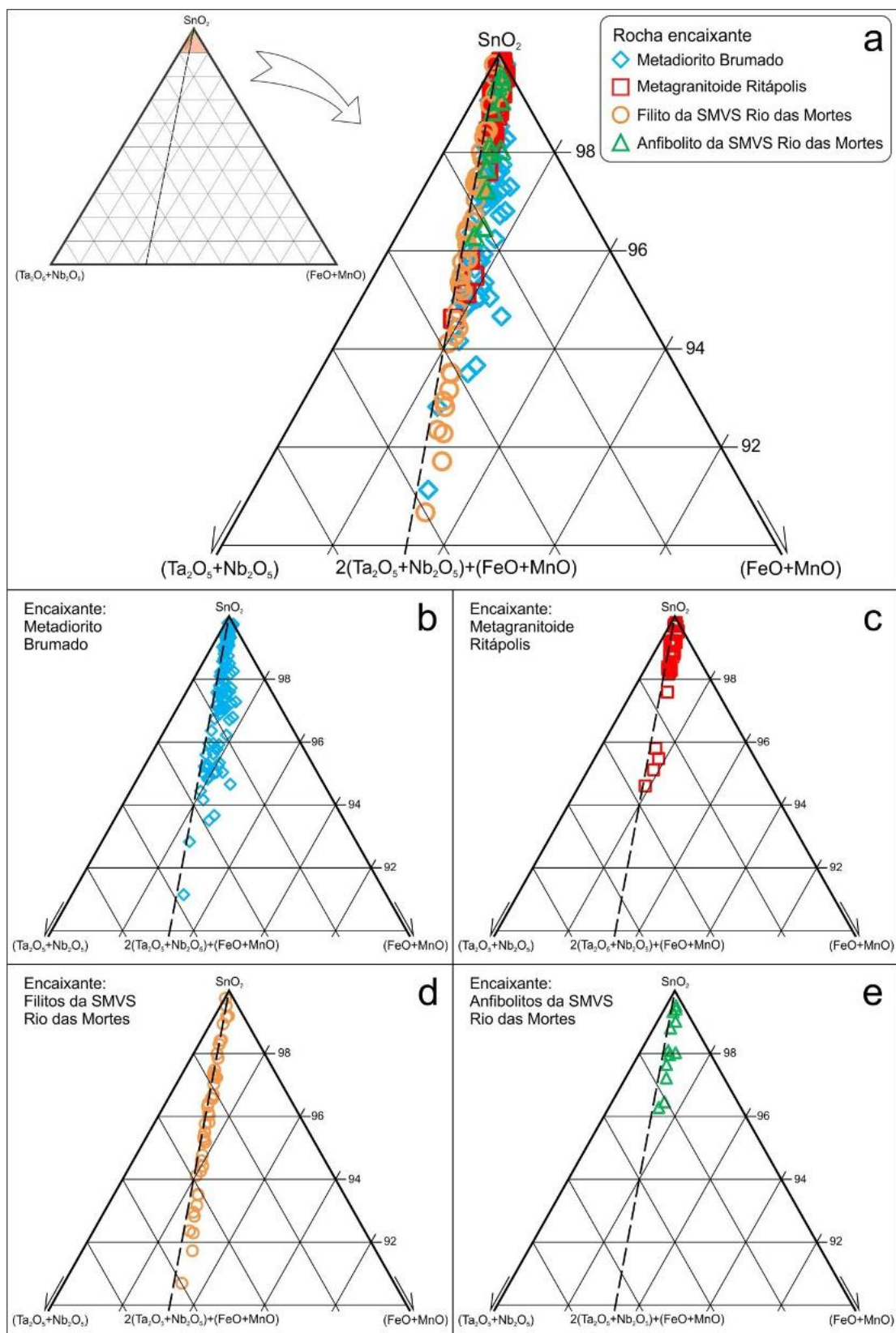


Figura 24 – (a) Diagrama ternário SnO_2 – $(\text{Ta}_2\text{O}_5+\text{Nb}_2\text{O}_5)$ – $(\text{FeO}+\text{MnO})$ com a distribuição das análises de microsonda eletrônica/WDS de diversos grãos de cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b - e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados pelo tipo de rocha encaixante do pegmatito. Linha tracejada corresponde à substituição $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta}+\text{Nb})^{5+} + (\text{Fe}+\text{Mn})^{2+}$ (Möller *et al.* 1988). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Quando observada a distribuição das análises em relação às diferentes rochas encaixantes dos pegmatitos é possível caracterizar que, apesar de todas as amostras se distribuírem praticamente ao longo da linha referente à substituição columbita/tantalita, existem grandes diferenças em relação aos teores de (Ta+Nb) e (Fe+Mn). Os grãos de cassiterita provenientes dos corpos pegmatíticos intrusivos tanto no metadiorito Brumado (Fig. 24b) quanto no metagranitoide Ritápolis (Fig. 24c) apresentaram uma maior variação nos teores relativos de Sn em relação ao (Ta+Nb) e ao (Fe+Mn), principalmente nos grãos de cassiterita do pegmatito intrusivo no primeiro, onde há um aumento sutil nos teores de (Fe+Mn), fazendo com que as análises se dispersem em relação à linha da substituição columbita/tantalita. As amostras de cassiterita associadas ao pegmatito que intrude os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 24d) apresentam os maiores teores de (Ta+Nb), enquanto que os grãos de cassiterita associados ao pegmatito que corta os anfibolitos da mesma sequência (Fig. 24e) apresentaram os menores teores desses elementos.

A utilização de um segundo diagrama ternário do tipo $2\text{Ta}_2\text{O}_5 - 2\text{Nb}_2\text{O}_5 - (\text{FeO}+\text{MnO})$ ajuda a visualizar melhor as diferenças apresentadas na composição química dos grãos de cassiterita em relação ao seu conteúdo de Nb-Ta-Fe-Mn de cada um dos corpos estudados (Fig. 25). A escolha de utilizar a soma (Fe+Mn) ao invés dos cátions divalentes separados advém dos baixos teores de manganês apresentados pelas amostras estudadas ($< 0,005 \text{ apfu}$ de Mn), o que implica na presença majoritária de tantalita-(Fe) e/ou columbita-(Fe) na estrutura da cassiterita, seja como microinclusão ou produto de exsolução. A figura 25a mostra que os grãos de cassiterita apresentam uma extensa substituição entre Ta e Nb (pontos se distribuem paralelamente ao longo da linha $2\text{Ta}_2\text{O}_5 - 2\text{Nb}_2\text{O}_5$) e, apesar de apresentar alguns pontos dispersos em direção ao vértice (FeO+MnO), elas são mais ricas em nióbio e/ou tântalo. As marcações X_1 , X_2 e X_3 na figura 25 representam as composições ideais de tantalita $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6]$, columbita/tantalita $[(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Ta},\text{Nb})_2\text{O}_6]$ e columbita $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6]$ respectivamente, e servem como parâmetros de comparação dos resultados obtidos.

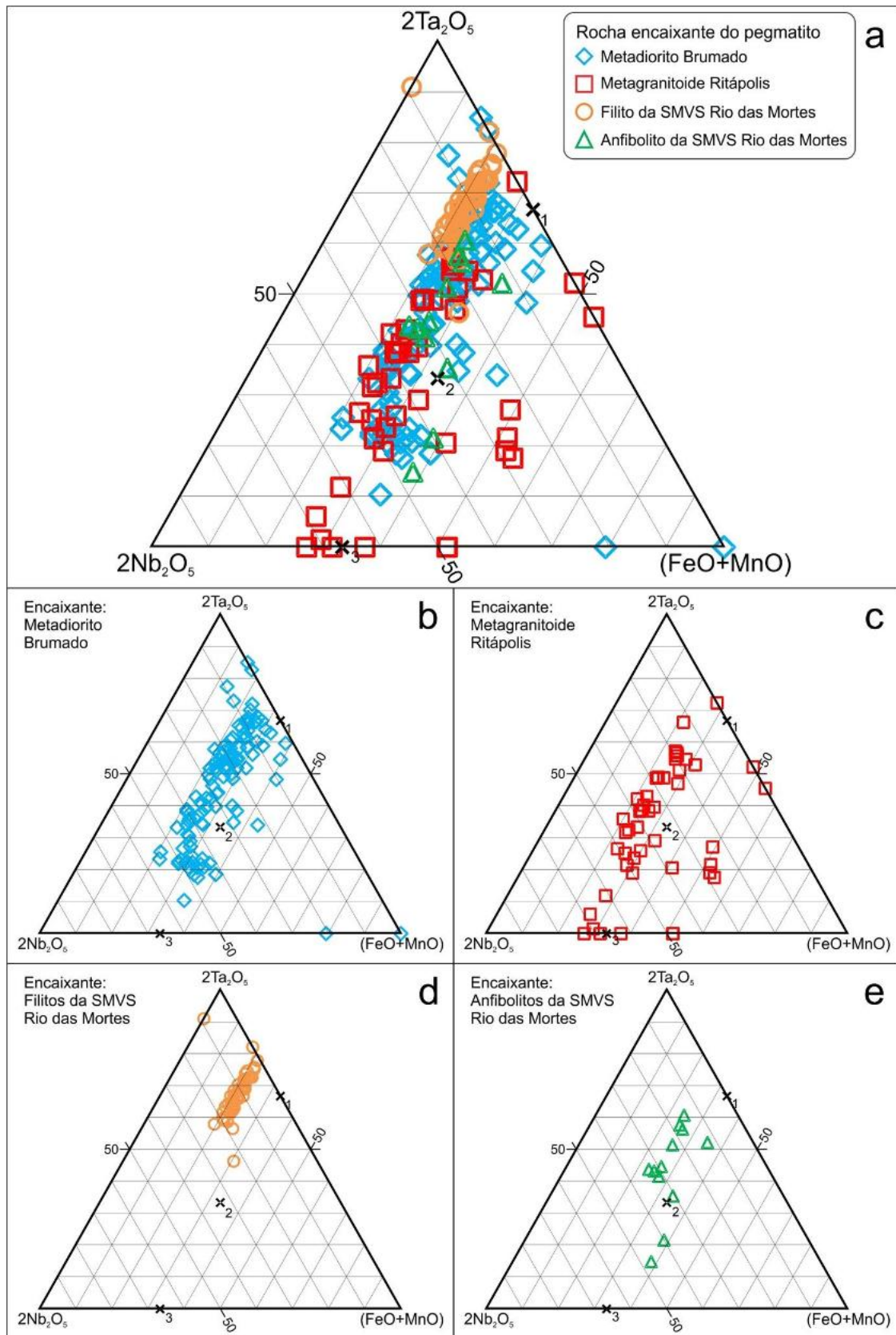


Figura 25 – (a) Diagrama ternário $2\text{Ta}_2\text{O}_5 - 2\text{Nb}_2\text{O}_5 - (\text{FeO}+\text{MnO})$ com a distribuição das análises de microsonda eletrônica/WDS da cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b - e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados por encaixante do pegmatito. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar; X_1 = tantalita - $(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$; X_2 = columbita/tantalita - $(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Ta},\text{Nb})_2\text{O}_6$; X_3 = columbita - $(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$.

Ao verificarmos a composição da cassiterita em relação à rocha encaixante do pegmatito é possível caracterizar que as amostras associadas ao pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 25d) apresentam muito mais moléculas de tantalita do que de columbita e menos (Fe+Mn) em comparação aos outros pegmatitos. Para os outros corpos, a composição da cassiterita apresenta-se dispersa com tantalita e columbita ocorrendo em proporções variadas, mas com um enriquecimento em columbita maior nas amostras associadas ao metagranitoide Ritápolis (Fig. 25c). Os pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (Fig. 25b), no metagranitoide Ritápolis (Fig. 25c) e nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 25d) apresentaram ainda alguns poucos grãos de cassiterita com composições extremas em relação ao conteúdo de nióbio e de tântalo, ou seja, têm apenas columbita ou tantalita e não uma mistura de ambas as fases. As amostras dos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 25e) apresentaram uma baixa dispersão dos dados, com uma composição mais próxima a uma intermediária columbita/tantalita.

Como foi observado anteriormente, a principal substituição que ocorre na cassiterita estudada é a saída de Sn para a entrada de Nb-Ta-Fe-Mn segundo a equação $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta,Nb})^{5+} + (\text{Fe,Mn})^{2+}$. Porém ao compararmos essa substituição com aquela que envolve todos os outros cátions identificados nas análises por microsonda eletrônica/WDS (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Nb, Ta, Sc, W), observa-se uma melhor concordância para o segundo caso (Fig. 26a, b). Esse fenômeno aponta que, na realidade, ocorre uma diversidade de substituições na estrutura da cassiterita além daquela envolvendo somente os pares (Nb+Ta) e (Fe+Mn), conforme apontado pela figura 24.

Černý *et al.* (1985) afirmam que uma razão (Ta+Nb)/(Fe+Mn) próxima a 2 indica uma substituição direta do Sn pelos elementos Nb-Ta-Fe-Mn em concentrações compatíveis com a química mineral encontrada em minerais do tipo columbita/tantalita, enquanto Neiva (1996) sugere que uma razão < 2 apontaria que o conteúdo de Nb e Ta na estrutura da cassiterita não seria controlado apenas por microinclusões (ou exsolução) de columbita/tantalita. Nesse caso, as amostras de cassiterita analisadas da Província Pegmatítica de São João del Rei mostram, em

geral, razão $(\text{Ta}+\text{Nb})/(\text{Fe}+\text{Mn}) < 2$ (Tab. 21 e Anexo IV), com média por volta de 1,5 caracterizando a diversidade de substituições do Sn por outros elementos (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Nb, Ta, Sc, W). Cabe destacar que os grãos de cassiterita do pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes concentram-se com valores mais próximos de 2, o que indica um possível predomínio de microinclusões e/ou exsolução de columbita/tantalita (Fig. 27).

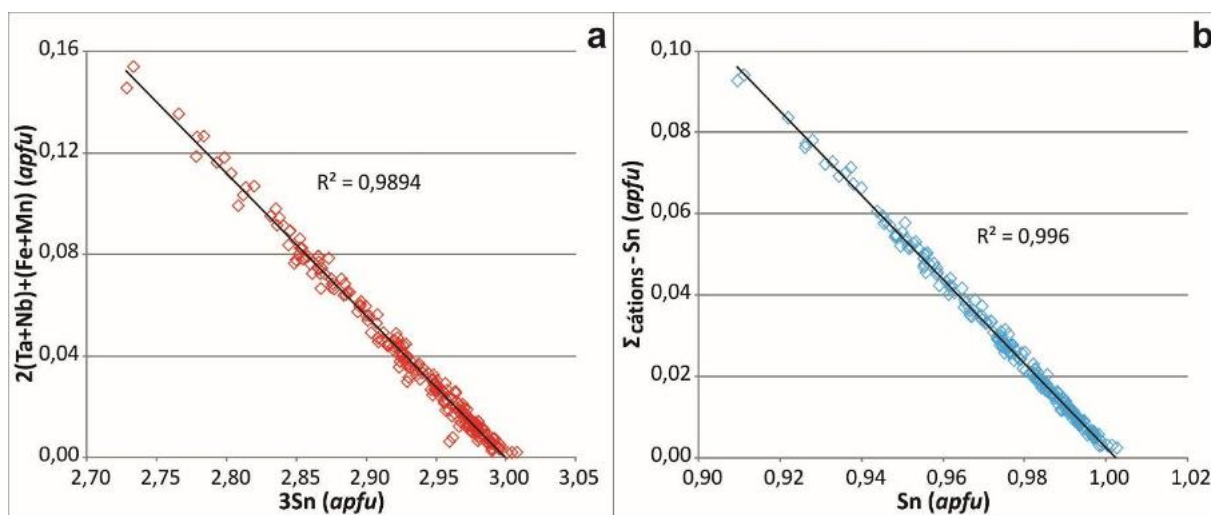


Figura 26 – Mecanismos de substituição do Sn na cassiterita dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Em (a), substituição $3\text{Sn}^{4+} \leftrightarrow 2(\text{Ta}+\text{Nb})^{5+}+(\text{Fe}+\text{Mn})^{2+}$ (Möller *et al.* 1988). Em (b), substituição do Sn por todos os outros cátions presentes ($\Sigma \text{ cátions} - \text{Sn}$).

Ao compararmos as composições químicas das inclusões de columbita/tantalita encontradas (item 10.2.2) com a composição dos grãos de cassiterita em um diagrama do tipo $\text{Ta}/(\text{Ta}+\text{Nb}) \times \text{Mn}/(\text{Mn}+\text{Fe})$ é possível observar que tanto as inclusões quanto os grãos de cassiterita apresentam teores variados de Nb e Ta (presença de columbita e tantalita) e um predomínio das fases ricas em Fe em relação ao Mn (Fig. 28a e b). A grande diferença é que as inclusões encontradas na cassiterita proveniente dos filitos da sequência Rio das Mortes (Fig. 28b) mostram um maior conteúdo das fases manganesíferas [columbita-(Mn) e tantalita-(Mn)] em relação às ricas em Fe [columbita-(Fe) e tantalita-(Fe)]. Neste contexto, parte dos niobo-tantalatos encontrados inclusos nos grãos de cassiterita dos corpos pegmatíticos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes representariam inclusões de minerais pré-existentes e não uma fase exsolvida, já que esse mineral era originalmente deficiente em Mn.

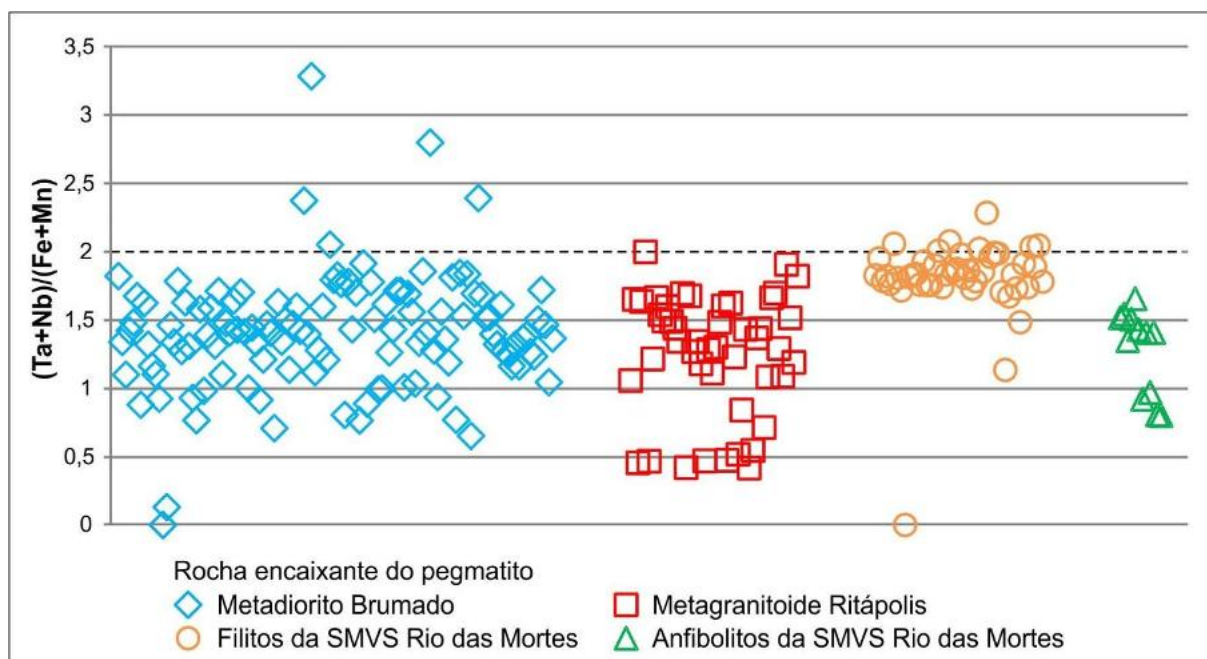


Figura 27 – Razão $(Ta+Nb)/(Fe+Mn)$ dos grãos de cassiterita dos diferentes corpos pegmatíticos estudados na Província Pegmatítica de São João del Rei. A razão = 2 (linha tracejada) indica uma substituição do tipo $Sn^{4+} \leftrightarrow R^{2+} + 2R^{5+}$, ou seja, presença de microinclusões e/ou exsolução de columbita/tantalita na estrutura da cassiterita (Černý *et al.* 1985; Neiva, 1996).

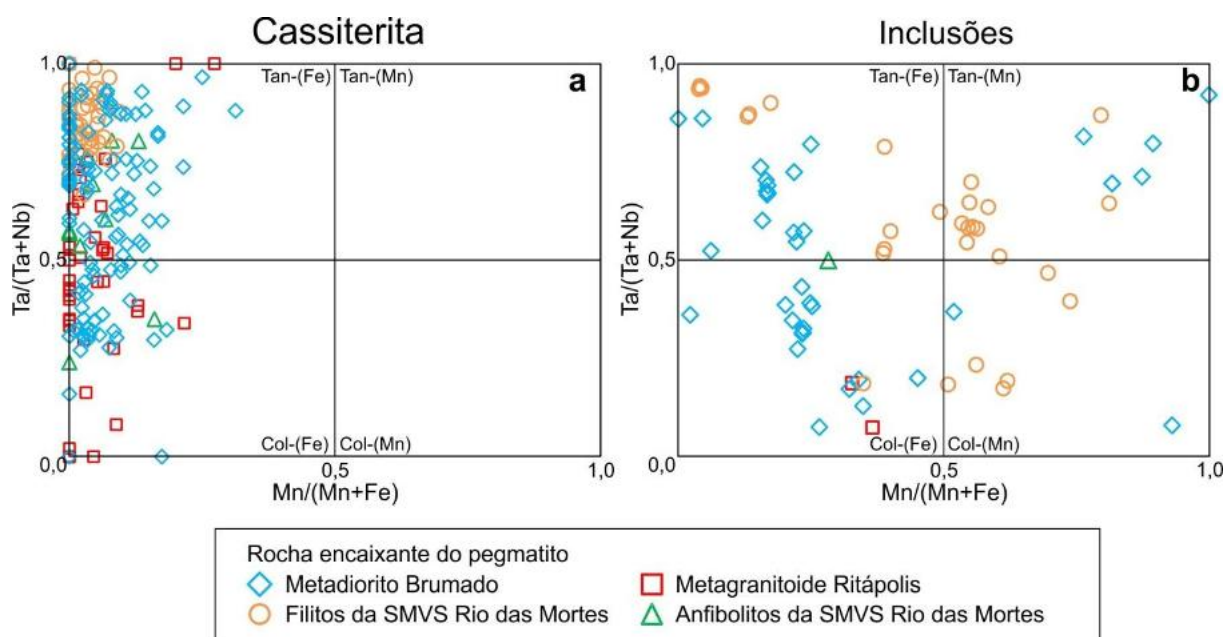


Figura 28 – Diagramas $Ta/(Ta+Nb) \times Mn/(Mn+Fe)$ com as análises de grãos de cassiterita (a) e de inclusões de columbita/tantalita na cassiterita (b) da Província Pegmatítica de São João del Rei. SMVS – sequência metavulcano-sedimentar. Tan – tantalita. Col – columbita.

10.3 Gahnita

A gahnita é um espinélio de Zn com fórmula química $A^{2+}B_2^{3+}O_4$ (ou $A_8B_{16}O_{32}$ por célula unitária). Nos membros do grupo do espinélio, o sítio A é ocupado principalmente por Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} enquanto o sítio B é preenchido por Al^{3+} ,

Cr^{3+} , Fe^{3+} , e mais raramente por Ga^{3+} , V^{4+} , Ti^{4+} e Si^{4+} (Deer *et al.*, 2013; Soares *et al.*, 2007, Bowles *et al.*, 2011, Klein & Dutrow, 2012).

10.3.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

A gahnita ocorre em cristais desde transparentes a translúcidos, possui brilho vítreo, grãos límpidos (sem inclusões visíveis) e sua cor pode variar entre verde escura (musgo), verde azulada ou azul escura. Geralmente pode ser encontrada como fragmentos de cristais anédricos de tamanhos de até 900 micrômetros, mas é possível de se observar alguns cristais euédricos (octaedros) ou subédricos (faces de octaedros) de tamanho inferior a 500 micrometros (Fig. 29). Encontrada preferencialmente nas frações 0,6 A e 0,8 A, pode ser diferenciada do anfibólio pela ausência de clivagem e da turmalina pela forma dos seus cristais. Nas amostras FA-03, FA-09 e FA-11, a gahnita é um mineral importante nas frações 0,6 A e/ou 0,8 A, enquanto nas amostras FA-02, FA-05, FA-06, FA-07, FA-08 e FA-10, pode variar de comum até rara. Cabe destacar que nas amostras FA-12, FA-13 e FA-14 não foram encontrados grãos de gahnita.

10.3.2 Microscopia eletrônica de varredura

Através das imagens de elétrons retroespalhados (Fig. 30) foi possível observar que todos os grãos de gahnita dos corpos pegmatíticos estudados apresentaram um padrão de tons de cinza homogêneo, indicando a ausência de zoneamento químico, como é esperado para grãos associados a sistemas pegmatíticos (Spry, 1987). As principais inclusões sólidas observadas foram esfalerita (Fig. 30a, b, e) e albita (Fig. 30d), enquanto biotita (Fig. 30c), quartzo e muscovita são mais raras. Caulinita é comumente encontrada nas bordas ou preenchendo fraturas dos grãos. Somente uma amostra (FA-09) apresentou trilhas de microinclusões de bismita (óxido de bismuto - confirmado por análises de microsonda eletrônica) bem como a associação com minerais de Nb-Ta (Fig. 30e). Na amostra FA-06 não foram encontradas inclusões minerais e sim trilhas de cavidades vazias indicando que algum tipo de processo de dissolução possa ter ocorrido, principalmente porque as amostras estudadas foram coletadas a partir de material saprolítico.

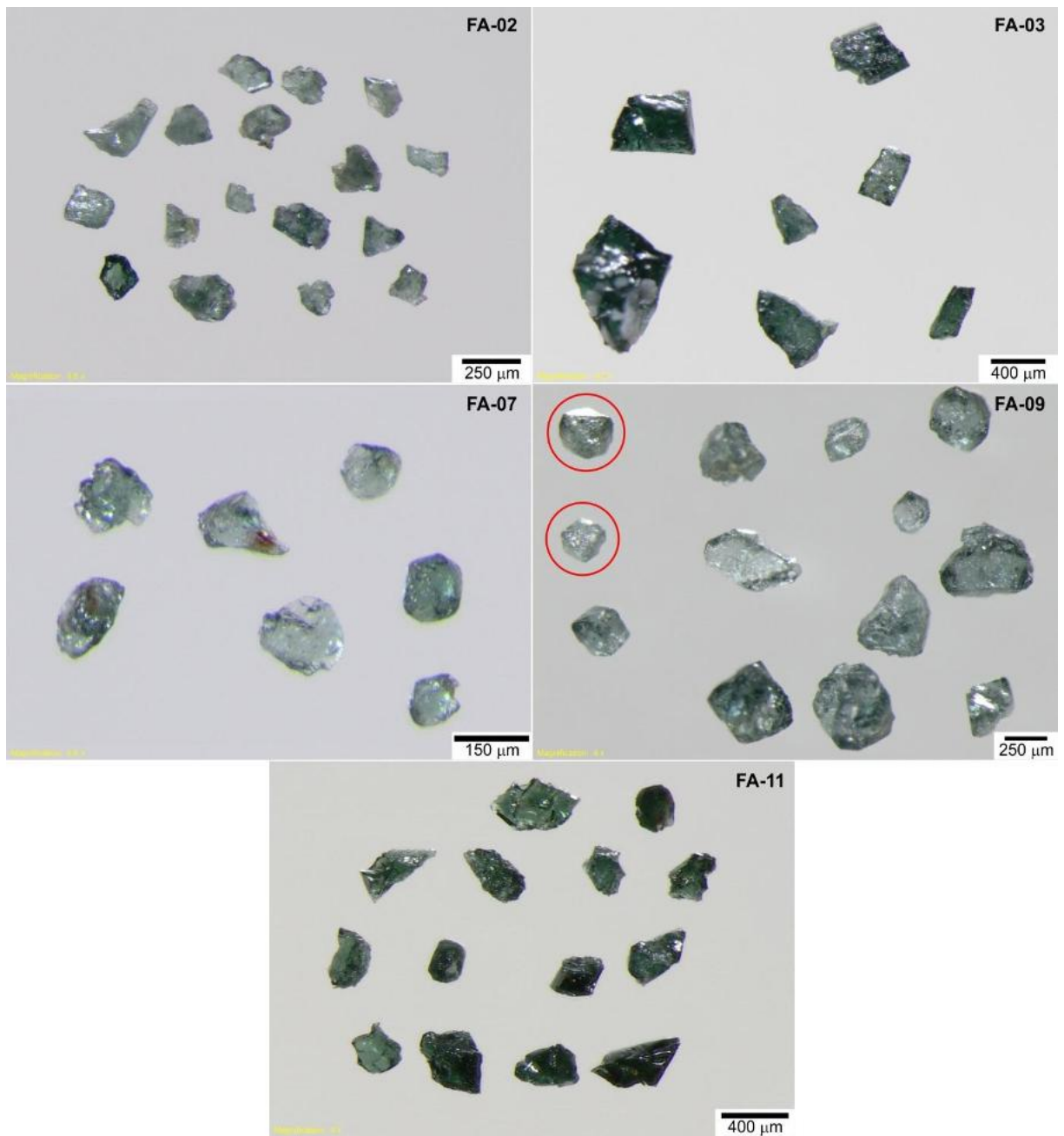


Figura 29 – Exemplos de grãos de gahnita dos pegmatitos estudados com diversas tonalidades de verde. Grãos marcados com um círculo vermelho são octaedros, mas em geral a gahnita ocorre como fragmentos de cristais.

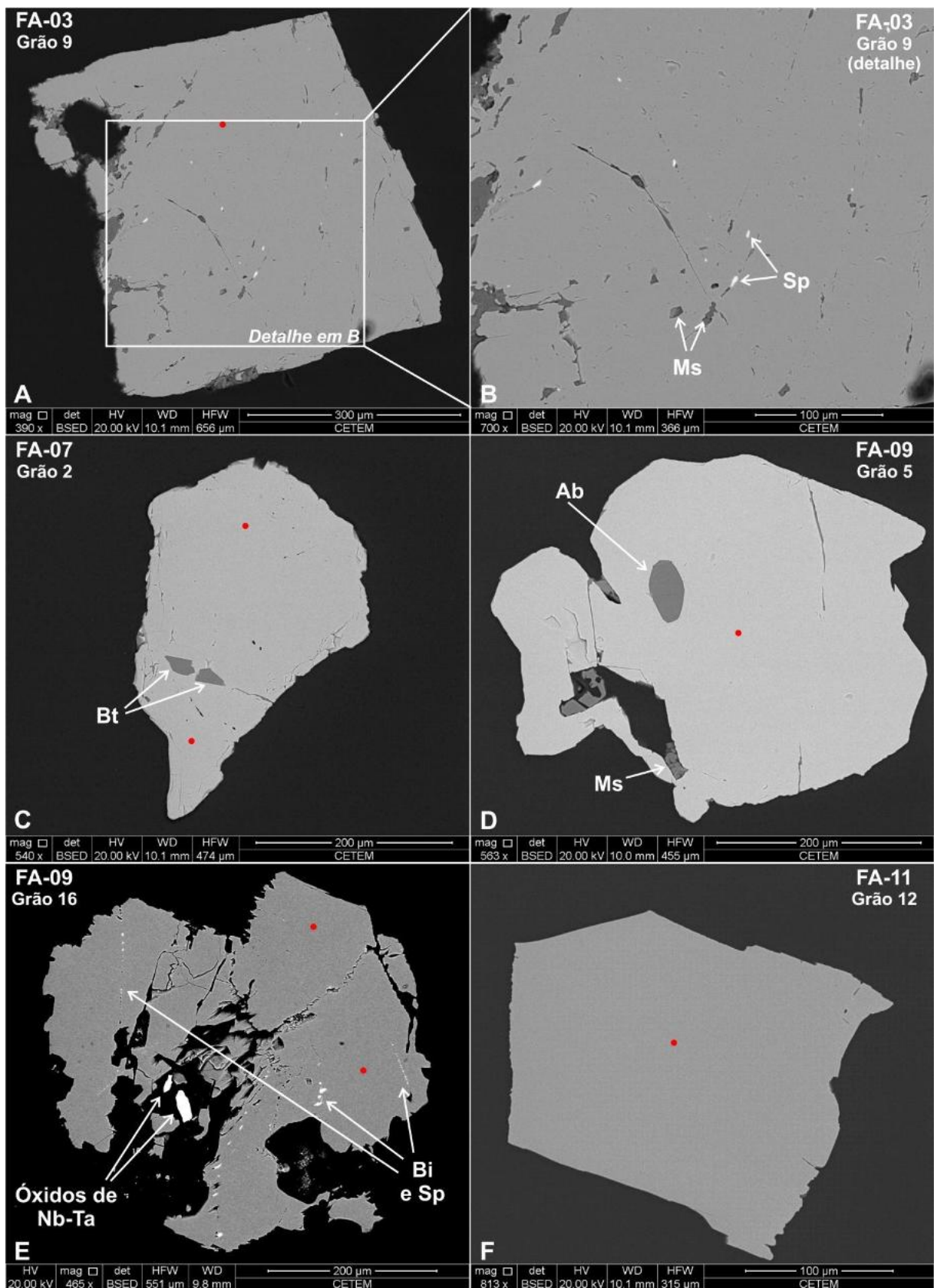


Figura 30 – Imagens de elétrons retroespalhados exemplificando a homogeneidade dos grãos de gahnita e exemplos das inclusões minerais encontradas: esfalerita (Sp), muscovita (Ms), biotita (Bt), albite (Ab) e bismite (Bi). Círculos vermelhos indicam o ponto de análise por MEV/EDS. Destaque para a presença de escassas inclusões nos grãos das imagens A-E e ausência destas no grão da imagem F.

10.3.3 Química mineral por MEV/EDS e ME/WDS

Um total de 86 análises por EDS (Anexo V) e 61 análises por WDS (Anexo VI) foram realizadas em diferentes grãos do grupo do espinélio. Os resultados obtidos mostram que os grãos possuem uma composição química variável, principalmente em relação ao conteúdo de Fe^{2+} e Zn, com predominância dos componentes gahnita (Ghn) e hercinita (hc) e quantidades menores de espinélio (Spl), jacobsita (Jac), magnesioferrita (Mfr) e galaxita (Glx) (Tab. 22 e Anexos V e VI). Dados de EDS mostram que a ocupação do sítio A é dominada pelo Zn^{2+} e pelo Fe^{2+} , e uma relação direta inversa entre a concentração destes dois elementos indicam uma substituição do Zn^{2+} pelo Fe^{2+} . Essa relação não foi observada para o Mg e o Mn, mesmo quando estes elementos estão acima dos limites de detecção do método. Os dados mais precisos apresentados pelas análises por WDS permitiram observar que as substituições entre os cátions bivalentes ocorrem com o par (Zn + Mn) sendo substituído por (Fe^{2+} + Mg). No sítio B, o Fe^{3+} substitui o Al^{3+} como o cátion trivalente (Fig. 31).

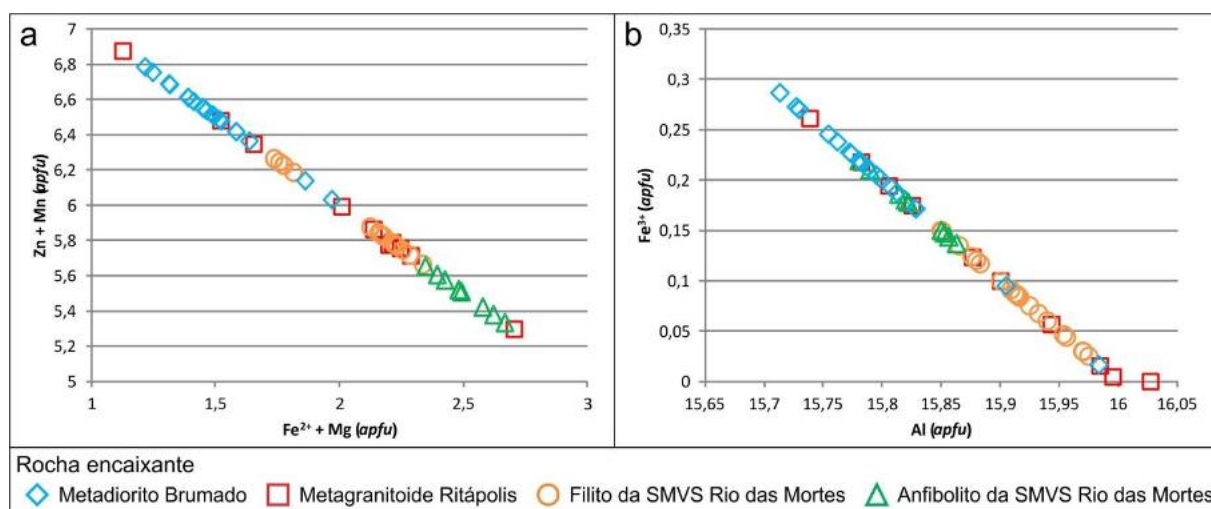


Figura 31 – Substituições em *apfu* observadas nos sítios A e B da gahnita estudada. Em (a) substituição no sítio A entre (Zn+Mn) ↔ (Fe²⁺+Mg). Em (b) substituição Al ↔ Fe³⁺ no sítio B. Dados obtidos por microsonda eletrônica/WDS. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Em termos de proporção molecular dos membros finais (Tab. 22 e Anexo VI), os grãos de espinélio estudados têm uma composição definida como $\text{Ghn}_{65,52-85,38}\text{Spl}_{0-2,16}\text{Hc}_{13,71-31,92}\text{Jac}_{0-0,92}\text{Mfr}_{0-1,22}\text{Glx}_{0-1,11}$ (em mol. %). Ao se colocar os dados de gahnita dos diferentes corpos pegmatíticos e suas rochas encaixantes no diagrama ternário gahnita – espinélio – hercinita (Fig. 32), é possível observar um

agrupamento dos pontos em direção ao vértice da gahnita (caracterizando um enriquecimento em Zn), o que indica um fracionamento mais elevado dos pegmatitos encaixados no metadiorito Brumado. As amostras se alinham quase paralelamente à linha hercinita – gahnita, com um pequeno enriquecimento no membro espinélio nas amostras menos diferenciadas (com menos Zn e associadas aos pegmatitos hospedados por anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes), caracterizando a substituição do Zn por Fe, que pode ser acompanhada por um pequeno aumento do Mg a medida que o Fe excede 25 mol. %.

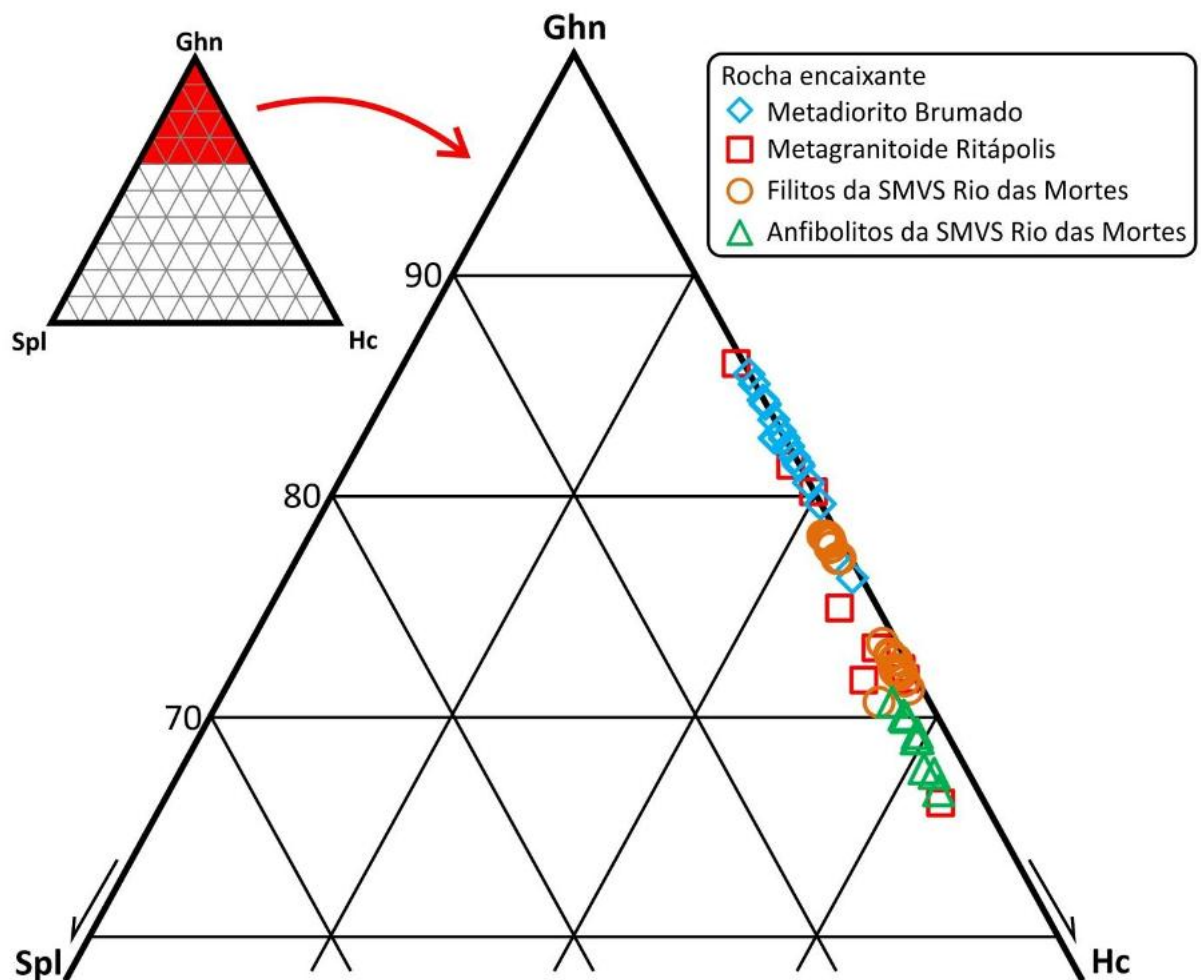


Figura 32 – Diagrama ternário mostrando a composição dos minerais do grupo do espinélio estudados em termos dos membros finais gahnita (Ghn), espinélio (Spl) e hercinita (Hc) (em mol. %). SMVS: sequência metavulcano-sedimentar.

Tabela 22 – Composição química representativa (valores mais próximos à média) da gahnita estudada obtida por microsonda eletrônica/WDS. A tabela completa com os dados obtidos é apresentada no Anexo VI, assim como as condições de análise e padrões utilizados.

Rocha encaixante	Metadiorito Brumado			Metagranitoide Ritapolis			SMVS Rio das Mortes*			
							Filito		Anfibolito	
Amostra (ponto de análise)	FA02(4)	FA03(9)	FA06(1)	FA05(5)	FA05(7)	FA07(1)	FA09(9)	FA09b(6)	FA11(4)	FA11(9)
<i>Wt. % oxide</i>										
Al ₂ O ₃	55,61	55,45	55,74	55,81	55,35	55,82	56,08	56,41	56,13	55,91
FeO	7,15	8,33	9,76	10,74	5,87	11,28	9,11	11,15	12,86	12,77
MgO	0,09	0,06	0,29	0,09	0,08	0,60	0,11	0,12	0,40	0,43
MnO	0,23	0,25	0,24	0,40	0,21	0,27	0,37	0,39	0,32	0,25
ZnO	36,64	36,03	34,31	31,78	37,96	31,90	34,64	31,96	30,28	30,87
Total	99,73	100,12	100,34	98,81	99,47	99,87	100,31	100,02	99,99	100,23
<i>Proporção atômica (32 O)</i>										
Al	15,91	15,81	15,79	16,00	15,90	15,81	15,90	15,97	15,86	15,78
Fe ³⁺	0,09	0,19	0,21	0,00	0,10	0,19	0,10	0,03	0,14	0,22
Fe ²⁺	1,36	1,49	1,76	2,18	1,10	2,07	1,73	2,21	2,43	2,34
Mg	0,03	0,02	0,10	0,03	0,03	0,21	0,04	0,04	0,14	0,15
Mn	0,05	0,05	0,05	0,08	0,04	0,05	0,08	0,08	0,06	0,05
Zn	6,56	6,43	6,09	5,71	6,83	5,66	6,15	5,67	5,36	5,46
<i>Membros finais (mol %)**</i>										
Ghn	82,05	80,66	76,12	71,32	85,38	70,72	76,90	70,84	66,97	68,22
Spl	0,40	0,00	0,63	0,41	0,28	2,16	0,49	0,54	1,70	1,18
Hc	16,95	18,43	21,97	27,25	13,71	25,90	21,66	27,63	30,43	29,23
Jac	0,59	0,64	0,61	0,03	0,54	0,69	0,62	0,19	0,81	0,63
Mfr	0,00	0,27	0,67	0,00	0,08	0,53	0,00	0,00	0,09	0,74
Glx	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,32	0,81	0,00	0,00

* SMVS refere-se a Sequência Metavulcano-Sedimentar

** Abreviações dos minerais segundo Whitney & Evans (2010) e Beard & Tracy (2002)

Dados obtidos por EPMA/WDS

A gahnita proveniente dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (composição Ghn_{74,91-84,47}Spl_{0-0,63}Hc_{14,41-23,05}Jac_{0,1-0,9}Mfr_{0-1,22}Glx_{0-0,45}) tem, em média, uma contribuição maior da molécula gahnita (até a 84,5 mol. %), enquanto que a sua componente hercinita é a mais baixa (14,4 mol. %) entre as amostras estudadas. A proporção molecular dos membros finais de Mn (jacobsita e galaxita) e Mg (espinélio e magnesioferrita) são os mais baixos entre os pegmatitos estudados. O mineral do grupo do espinélio dos corpos pegmatíticos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (composição Ghn_{65,84-69,98}Spl_{1,18-1,7}Hc_{27,66-31,46}Jac_{0,63-0,84}Mfr_{0,09-0,74}) apresentou a menor proporção do membro final gahnita (65,8 - 70,0 mol. %) e as mais elevadas proporções dos membros finais compostos de Fe²⁺ e Mg. Hercinita (27,7 - 31,5 mol. %), espinélio (1,2 - 1,7 mol. %) e magnesioferrita (0,1 - 0,7 mol. %) são componentes importantes desse espinélio. Outra característica da gahnita associada aos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da SMVS Rio das Mortes é a ausência de galaxita como um membro final, apontando para um baixo conteúdo de manganês. Os grãos de espinélio presentes nos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das

Mortes (composição $\text{Ghn}_{70,08-77,51}\text{Spl}_{0,4-2,05}\text{Hc}_{21,06-28}\text{Jac}_{0,16-0,92}\text{Mfr}_{0-0,12}\text{Glx}_{0-0,82}$) podem ser separados em dois grupos, dependendo do seu conteúdo relativo de membros finais. O primeiro grupo tem maior proporção de gahnita e menores conteúdos de hercinita em sua composição (77,5 e 21,1 mol. %, respectivamente) e são mais semelhantes à gahnita dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado. O segundo grupo tem proporção de gahnita menor (70,1 mol. %) e maior de hercinita (28,0 mol. %) e são mais próximos, em relação aos seus componentes, aos grãos dos pegmatitos intrusivos nas rochas anfibolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. As proporções dos membros finais espinélio, jacobita e galaxita são baixas (<1,5 mol. %) e apresentam as mesmas variações nos dois grupos. O mineral do grupo do espinélio associado aos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritópolis (composição $\text{Ghn}_{65,52-85,38}\text{Spl}_{0-2,16}\text{Hc}_{13,71-31,92}\text{Jac}_{0-0,86}\text{Mfr}_{0-0,58}\text{Glx}_{0-1,11}$) apresenta os maiores teores de gahnita, hercinita, espinélio e galaxita como membros finais (85,4; 31,9; 2,16 e 1,1 mol. %, respectivamente). Porém o conteúdo dos demais membros finais está dentro da média encontrada nos pegmatitos estudados.

Diagramas binários em *apfu* utilizando os principais cátions divalentes (Zn, Fe^{2+} , Mg e Mn) gerados a partir dos dados obtidos por WDS foram usados para distinguir os diferentes grupos de gahnita dos pegmatitos estudados (Fig. 33). A gahnita associada aos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado e nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes é facilmente separada dos grãos dos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, que mostram maiores conteúdos de Mg e Fe^{2+} . Este mineral na amostra FA-09 (pegmatito intrusivo nos filitos da sequência Rio das Mortes) é separado em dois grupos em relação aos teores de Fe^{2+} e Zn, enquanto a gahnita presente nos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado é mais rica em Zn e empobrecida em Fe^{2+} , em relação aos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência Rio das Mortes. O conteúdo de Mn na gahnita da Província Pegmatítica de João del Rei, quando comparado ao de Zn e ao de Fe^{2+} , é muito baixo e não é útil para distinguir diferentes grupos (Fig. 33). As análises dos grãos de gahnita em pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritópolis estão espalhadas em todos os quatro diagramas, sem formar nenhum agrupamento definido.

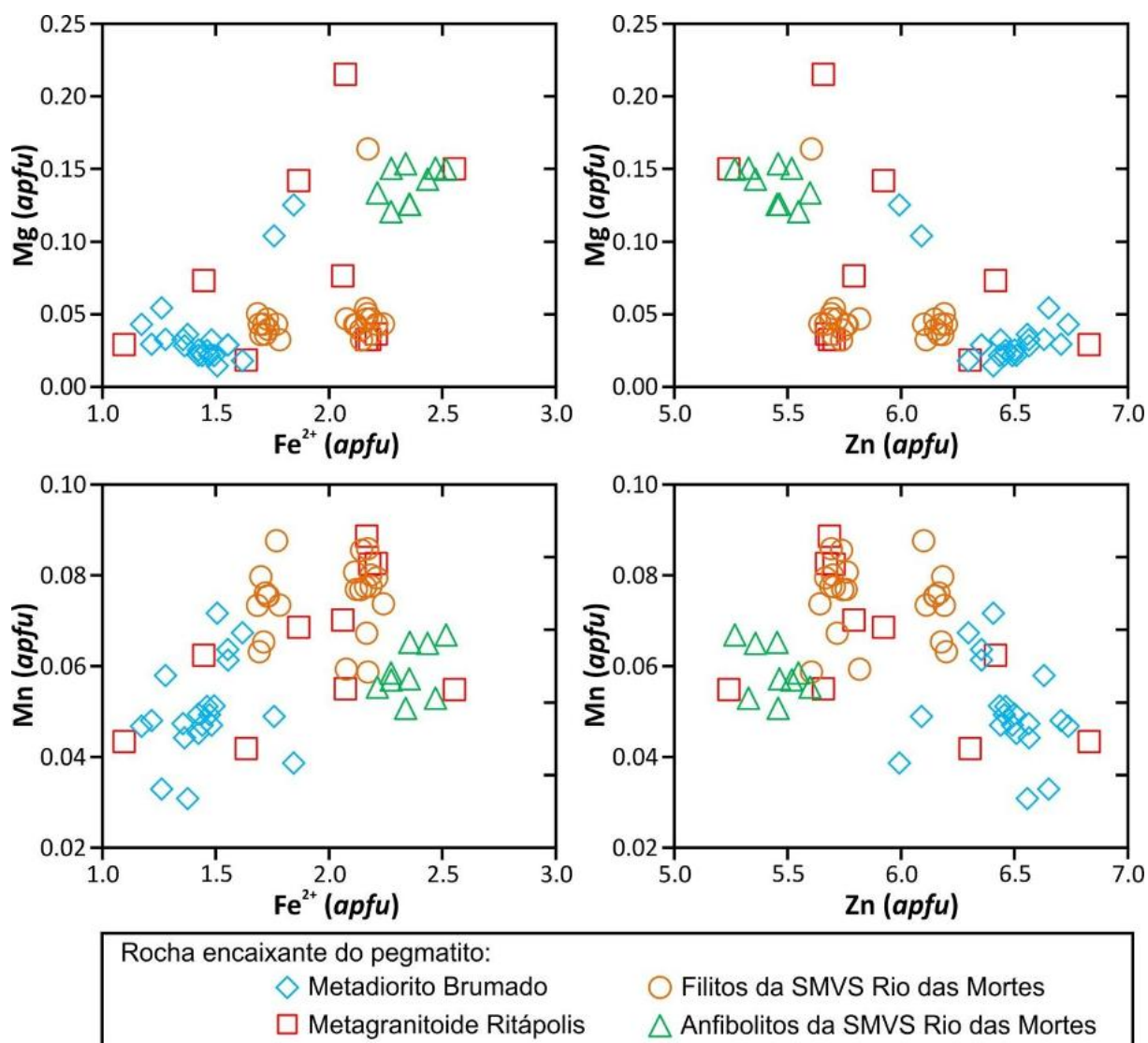


Figura 33 – Diagramas binários em *apfu* (32 oxigênios) representando as composições de gahnita dos pegmatitos estudados. SMVS: sequência metavulcano-sedimentar.

10.3.4 Espectroscopia Raman

O espectro Raman da gahnita, previsto pela teoria de grupos, possui cinco modos ativos: $A_{1g} + E_g + 3T_{2g}$. Suas posições variam tanto teórica, quanto experimentalmente dependendo dos autores consultados (Cynn *et al.*, 1992; Fang *et al.*, 2002; López-Moreno *et al.*, 2011; D'Ippolito *et al.*, 2013) e são apresentadas na tabela 23. Para Fang *et al.* (2002) e López-Moreno *et al.* (2011) as baixas frequências ($< 250 \text{ cm}^{-1}$) estão associadas aos íons de Zn, enquanto as vibrações mais altas ($240 - 840 \text{ cm}^{-1}$) estão relacionadas a movimentos O-Al. Segundo Chopelas & Hofmeister (1991) ainda é possível observar outras duas bandas largas e pouco intensas em torno de 620 e 708 cm^{-1} , que provavelmente correspondem ao resultado de combinações de vibrações já existentes ou modos proibidos. Através

de estudos em cristais de espinélio (*sensu strictu*) naturais e sintéticos, Cynn *et al.* (1992) demonstraram que com o aumento da desordem na estrutura ocorre um alargamento da banda E_g presente em 410 cm^{-1} (correspondente a 420 cm^{-1} na gahnita) e também o aparecimento de um ombro, gerando uma assimetria nesta banda.

Neste estudo foram coletados 37 espectros Raman em diferentes cristais de cada amostra disponível. Os resultados demonstraram que todo conjunto amostral é homogêneo, apresentando quatro das cinco bandas previstas na teoria e pelo menos mais três bandas adicionais bem marcadas. Suas posições relativas mudaram muito pouco (Tab. 23), enquanto as intensidades das principais bandas observadas variaram conforme a direção cristalográfica do cristal analisado. Essa variação impossibilitou o uso de razões entre intensidades relativas como parâmetro de distinção entre diferentes amostras.

Tabela 23 – Comparativo dos dados publicados (teóricos e experimentais) de espectroscopia Raman em gahnita com os resultados experimentais obtidos neste trabalho. nd = não detectado.

Modos	Chopelas & Hofmeister (1991)	Fang <i>et al.</i> (2002)	López-Moreno <i>et al.</i> (2011)		D'Ippolito <i>et al.</i> (2013)	Presente tese		
	Experimental	Teórico	Teórico	Experimental	Experimental	Média de 37	Range	Desv. Padrão
T2g	196	197	194	195	nd	195,5	193,7-200,1	1,40
-	nd	-	-	nd	nd	403,5	391,1-411,6	5,21
E_g	417	442	427	418	420	414,7	412,7-416,0	0,80
T2g	509	520	513	488	510	nd	-	-
-	620	-	-	nd	nd	623,9	618,7-631,6	2,79
T2g	658	665	655	659	661	656,8	655,9-657,7	0,42
-	708	-	-	708	nd	704,2	701,7-706,9	1,23
A1g	758	784	775	nd	nd	757,2	755,1-761,7	1,40

As bandas encontradas estão próximas às descritas em trabalhos anteriores (Tab. 23), principalmente àquelas apresentadas em Chopelas & Hofmeister (1991). As bandas em 620 cm^{-1} (624 cm^{-1} neste trabalho) e 708 cm^{-1} (704 cm^{-1} neste trabalho) citadas por esses autores também estão presentes, assim como uma banda em 403 cm^{-1} descrita por Cynn *et al.* (1992). Essa última gera o ombro e assimetria na banda E_g em 414 cm^{-1} (Fig. 34), indicando a presença de desordem na estrutura desses cristais. Outras bandas observadas, geralmente largas e de baixa intensidade, podem ser o resultado da interação do laser com a resina utilizada para montagem das seções polidas.

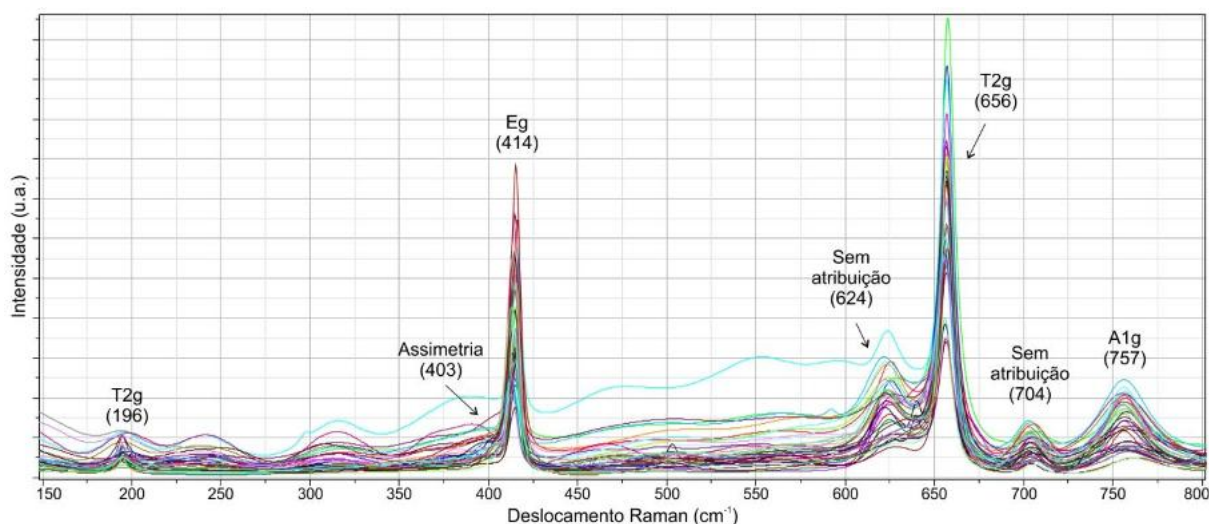


Figura 34 – Espectros Raman de 37 grãos de gahnita de diferentes pegmatitos da região de Ritápolis, com indicação das bandas observadas. Número em parênteses se refere à posição média em cm^{-1} das bandas. Bandas não assinaladas são o resultado da interação do laser com a resina epóxi utilizada na montagem da seção polida.

10.4 Ilmenita

A ilmenita é um óxido de Fe e Ti com composição química ABO_3 onde o sítio A é ocupado pelo Fe^{2+} e o sítio B pelo Ti^{4+} sendo que sua fórmula é mais bem expressa como $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{TiO}_3$. Há extensa solução sólida entre a ilmenita (FeTiO_3), geikielita (MgTiO_3) e pirofanita (MnTiO_3) e restrita em relação a hematita (Fe_2O_3). Outras substituições comumente encontradas são de V e Cr substituindo o Fe^{3+} e de Zr^{4+} substituindo o Ti (Deer *et al.*, 2013).

10.4.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

A ilmenita é um mineral opaco que possui brilho metálico reluzente, cor desde preta até cinza grafite (amostra FA-10), apresenta, normalmente, forma tabular achatada ou pseudo-hexagonal, bem como exibe fratura conchoidal e partição, pois não possui clivagem. Seus cristais variam amplamente de tamanho, desde 50 μm até cerca de 1 mm, predominando a faixa entre 200 e 500 μm . Comumente, seus grãos são anédricos e podem estar alterados com a formação de uma fina capa ou aglomerados esbranquiçados e/ou amarelados em sua superfície que, comumente, são chamados de “leucoxênio” (Fig. 35). Porém, essa massa foi caracterizada por microsonda Raman como composta de brookita e anatásio (diferentes polimorfos de TiO_2). Outra alteração muito comum na ilmenita é a presença de manchas de coloração avermelhada (amostra FA-08) na sua superfície, que estariam

possivelmente associadas a um processo de oxidação do ferro presente na sua composição. A ilmenita está presente somente nas frações 0,3 A e 0,5 A, sendo que nas amostras FA-07, FA-08, FA-09, FA-10, FA-12 e FA-14 é o mineral mais importante da fração 0,3 A, enquanto nas amostras FA-03, FA-05, FA-06, FA-11, FA-13 varia de um mineral comum até raro. Cabe destacar que na amostra FA-02 não foi encontrado qualquer grão de ilmenita.

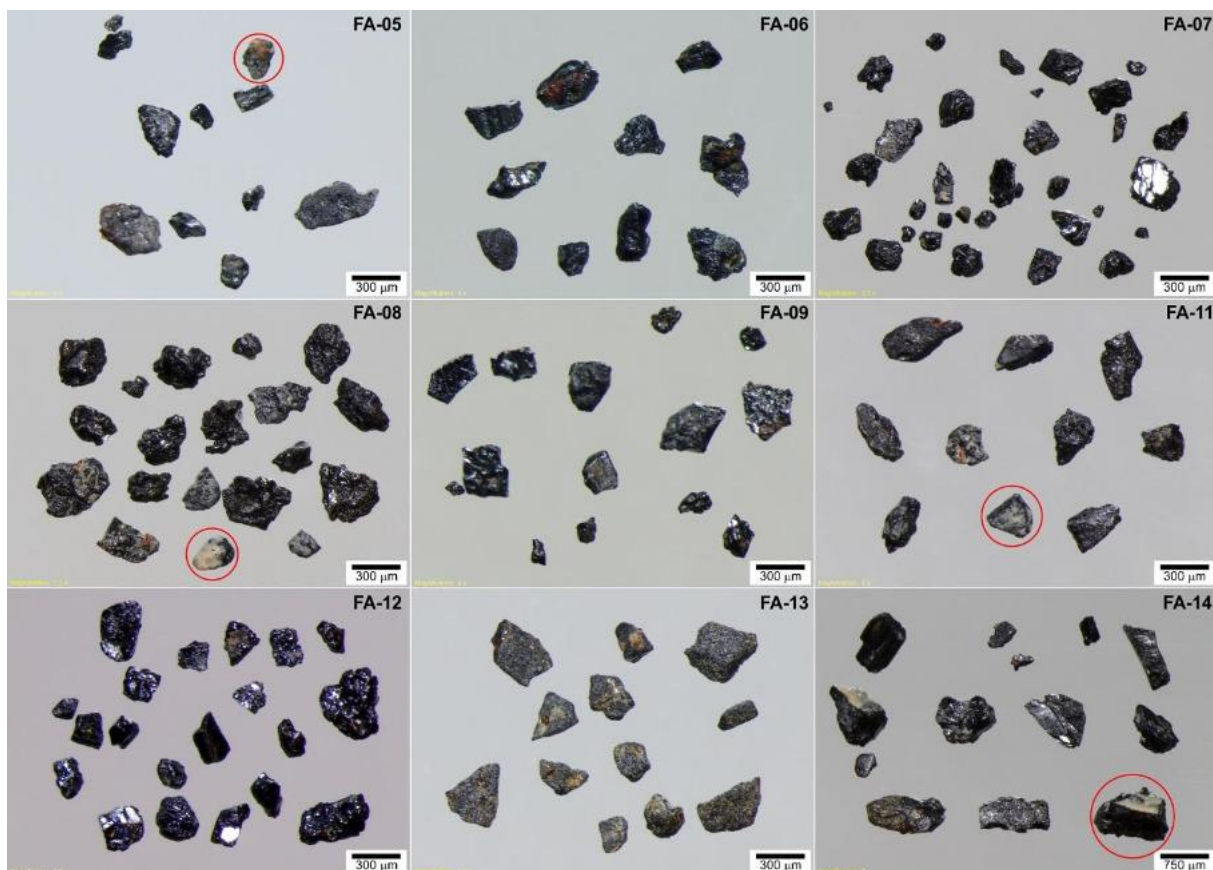


Figura 35 – Exemplos de grãos de ilmenita dos pegmatitos estudados onde é possível de se observar a variação de cores entre o preto e o cinza grafite assim como seu habito tabular achatado. O brilho metálico característico pode ser observado nas amostras FA-07 e FA-12, mas fica mascarado quando a alteração na superfície do grão é mais intensa (FA-05 e FA13). A presença de leucoxênio pode ser observada nos grãos marcados com um círculo vermelho.

10.4.2 Microscopia eletrônica de varredura

Os grãos de ilmenita dos pegmatitos estudados foram separados em dois conjuntos diferentes, segundo a presença ou não de inclusões minerais ou feições de alteração. O primeiro é composto por grãos limpos, sem inclusões ou alterações (Fig. 36a, b) e o segundo agrupa tanto os grãos que apresentam material de alteração quanto os grãos com inclusões variadas, sendo as mais comuns de zircão, titanita, quartzo, feldspato, biotita (Fig. 36c - f), óxido de ferro e columbita. Outras

inclusões encontradas, mas que ocorrem de forma restrita, foram de cromita (amostra FA-05), apatita (FA-08, FA-09, FA-12), galena (FA-12, FA-14), scheelita (FA-07, FA-10) e cassiterita (FA-08, FA-14). As inclusões de óxidos de Fe (Fig. 37 a - c), de columbita (Fig. 37d, e) e de cromita (Fig. 37f) foram interpretadas como o resultado de um processo de exsolução desses elementos na estrutura da ilmenita, pois as inclusões ocorrem seguindo as direções cristalográficas do grão (nas imagens "c", "d" e "e" da figura 37 é possível observar até duas direções de orientação dessas exsoluções). As demais inclusões anteriormente citadas ocorrem de forma aleatória e, geralmente, apresentam formas subarredondadas (e.g. Fig. 36d, e). Algumas das inclusões de óxido de Fe apresentam forma arredondada e alongada (Fig. 37a, b), mas a sua distribuição também segue as direções cristalográficas da ilmenita, sendo então também interpretadas como exsolução decorrentes da movimentação do Fe presente na estrutura da ilmenita. Vale salientar que a identificação e classificação das inclusões foram realizadas apenas através de análises químicas semiquantitativas obtidas por MEV/EDS.

Ilmenita de todas as amostras pode ou não ocorrer associada a minerais de alteração dela mesma (óxidos de Ti com teores variados de Al e Fe) quanto do pegmatito (filossilicatos, comumente caulinita). O início da alteração dos cristais de ilmenita para diferentes óxidos de Ti e Fe, com ou sem Al e/ou Mn pode ser observado ao longo de fraturas distribuídas de forma aleatória nos grãos (Fig. 38a) ou a partir da presença de fraturas radiais (Fig. 38b). Esse tipo de alteração foi bem caracterizado na amostra FA-07, onde temos um perfil desde a amostra sã até o produto final, composto por óxido de Fe (Fig. 38c, d). No início há um pequeno aumento no teor de Ti e diminuição do Fe, sendo que o processo é revertido com a continuidade da alteração (sai Ti, aumenta Fe). Se houver Mn presente, este diminui gradativamente com o aumento da alteração, pois é um elemento bastante móvel.

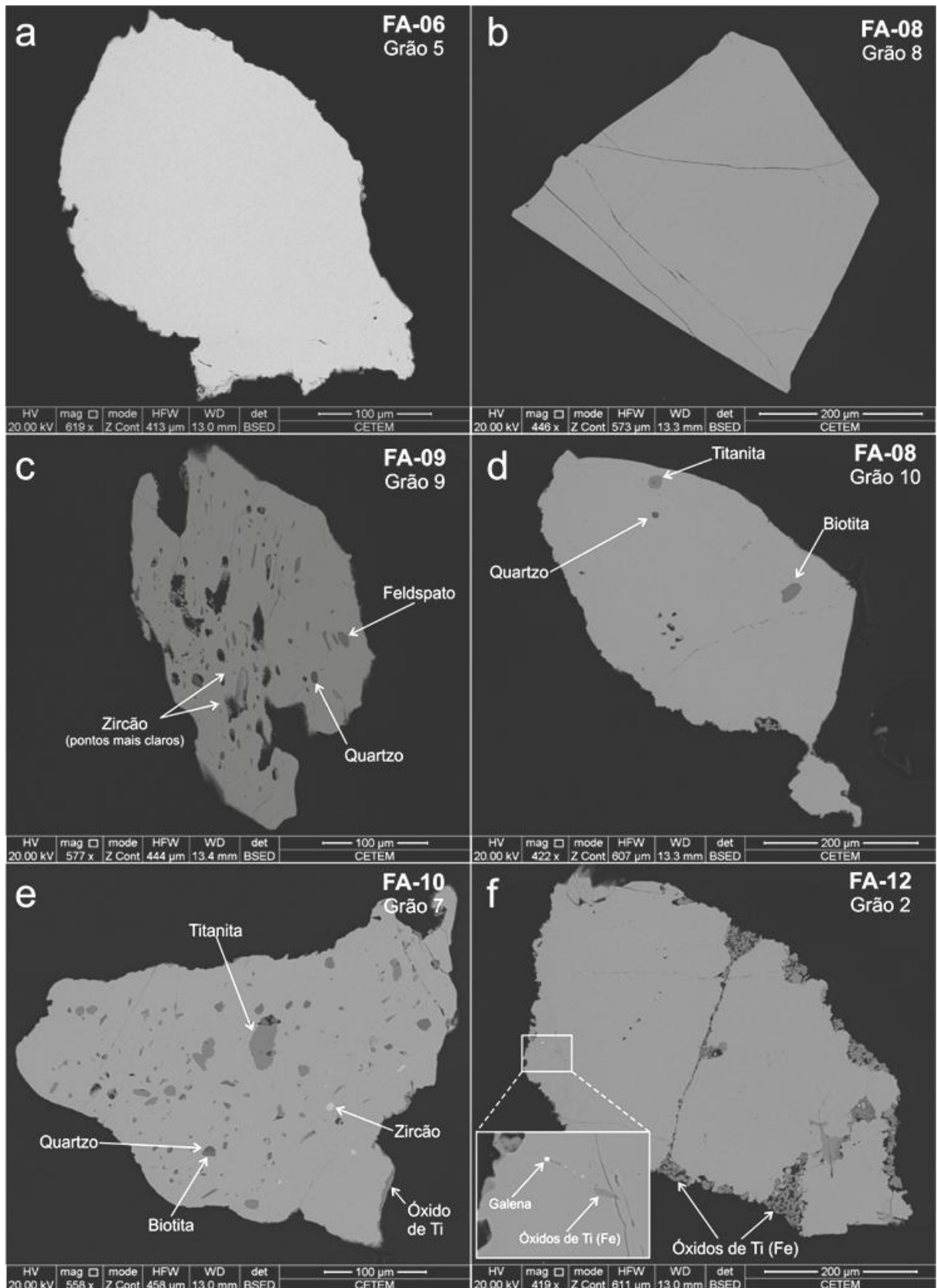


Figura 36 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. Em (a) e (b) grãos de ilmenita límpidos, sem inclusões ou alteração. Em (c) e (d) exemplos dos principais tipos de inclusões encontradas. Em (e) e (f) presença de material de alteração (óxidos de Ti com Fe) nas bordas dos grãos de ilmenita, além das inclusões minerais.

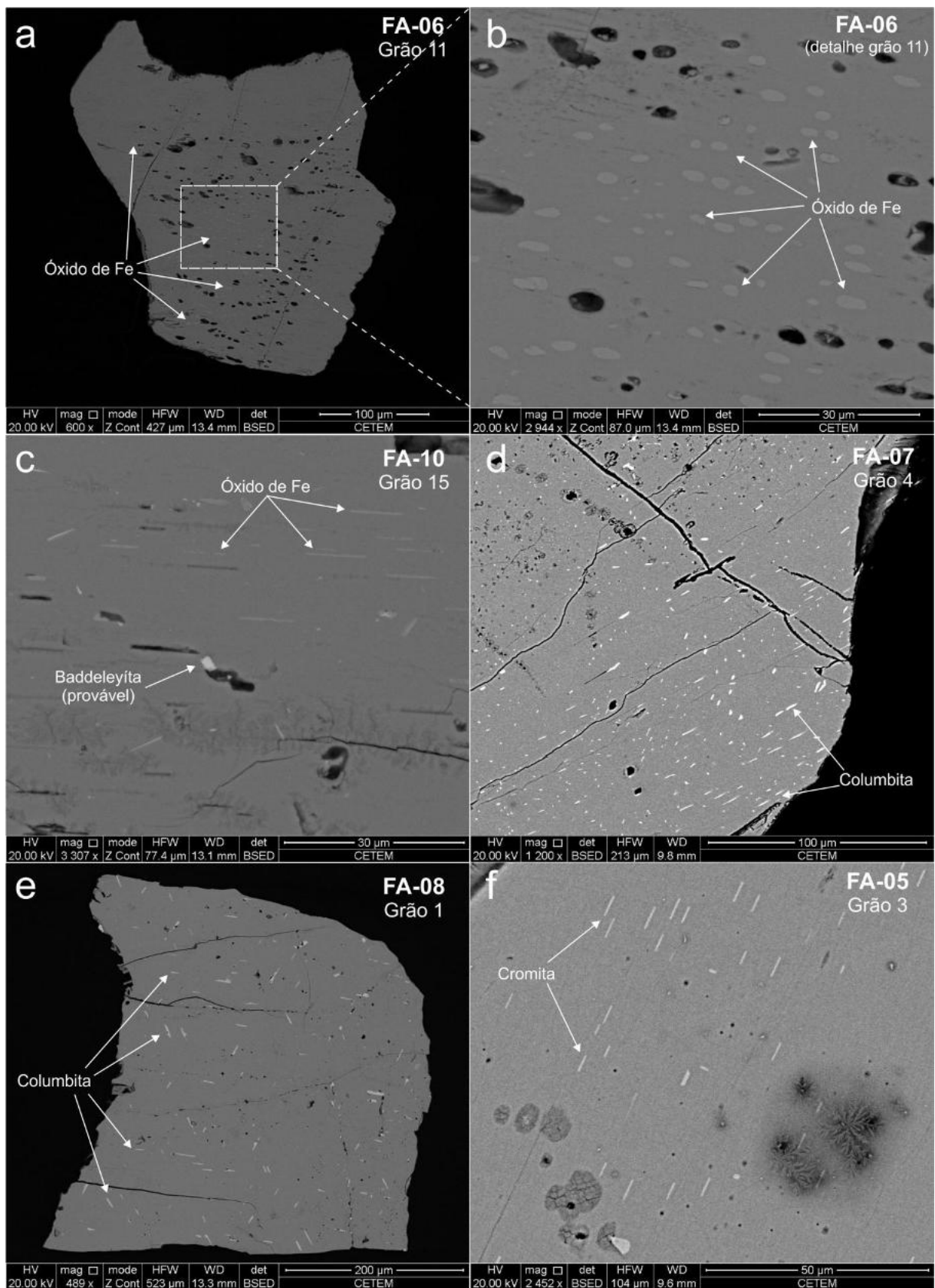


Figura 37 – Imagem de elétrons retroespalhados com exemplos das inclusões interpretadas como processo de exsolução na ilmenita. Em (a) e (b) inclusões subarredondadas de óxido de Fe orientadas em um grão de ilmenita. Nas outras imagens, inclusões tabulares orientadas de óxido de Fe (c), columbita (d, e) e cromita (f) também em grãos de ilmenita.

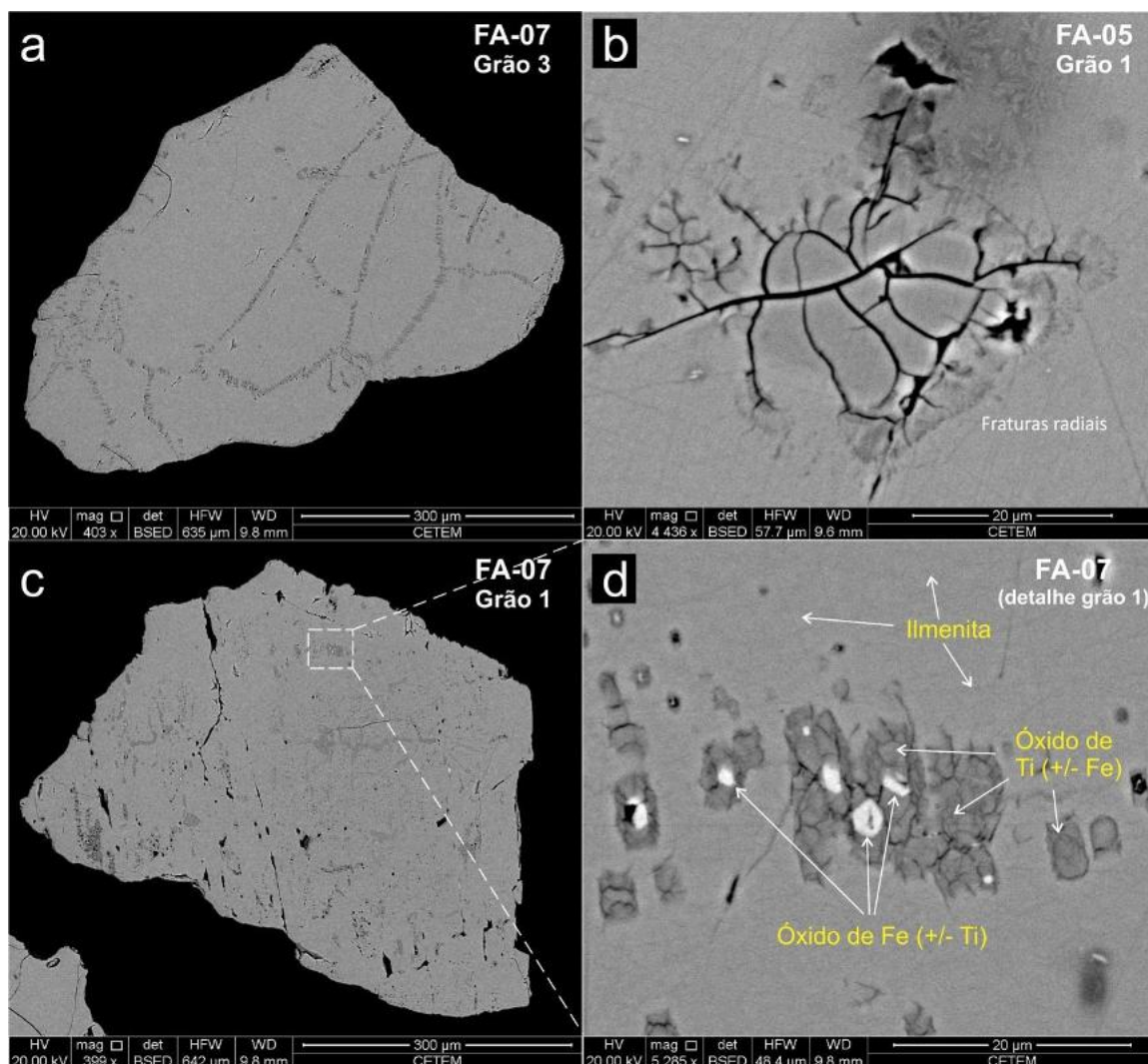


Figura 38 – Imagem de elétrons retroespalhados com diferentes exemplos de alterações encontradas nos grãos de ilmenita estudados. Em (a), início de alteração ao longo de fraturas em um grão; em (b), detalhe de uma fratura radial com início de alteração em suas bordas. Em (c) e (d), exemplo de alteração avançada com a formação de óxido de Fe como produto final.

10.4.3 Química mineral por ME/WDS

Foram realizadas 183 análises pontuais WDS (Anexo VII) em grãos de ilmenita dos diferentes corpos pegmatíticos estudados e um resumo com as composições químicas representativas obtidas é apresentado na tabela 24. Durante o processamento dos dados foram calculados os teores de Fe^{2+} e Fe^{3+} , segundo o método apresentado por Droop (1987), de modo a se obter a proporção dos membros finais ilmenita (FeTiO_3), geikielita (MgTiO_3) e pirofanita (MnTiO_3), assim como a presença de moléculas de coríndon (Al_2O_3) ou de hematita (Fe_2O_3), que podem ocorrer quando há excesso de Al ou Fe^{3+} na estrutura da ilmenita. Segundo Droop (1987), o teor de Fe^{3+} em determinado mineral pode ser calculado a partir de critérios estequiométricos assumindo que o ferro é o único elemento presente com

valência variável e que o oxigênio é o único ânion. O número de íons Fe^{3+} para X oxigênios para um determinado mineral é então obtido através da equação:

$$F = 2X(1-T/S)$$

Onde F é o numero de íons Fe^{3+} , X é o número de oxigênios, T é o número ideal de cátions por fórmula unitária (valor teórico) e S é o total de cátions observados (soma de todos os cátions presentes).

Tabela 24 – Análises químicas representativas (valores mais próximos às médias) de grãos de ilmenita de diferentes corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei, obtidos por microsonda eletrônica/WDS. Tabela completa de dados é apresentada no Anexo VII, assim como as condições de análise e padrões utilizados.

Rocha encaixante do pegmatito	Metadiorito Brumado			Metagranitoide Ritápolis			¹ SMVS Rio das Mortes				Ortognaisse Cassiterita		
							Filito		Anfibolito				
	FA-03	FA-06	FA-06	FA-05	FA-07	FA-08	FA-09	FA-10	FA-11	FA-12	FA-13	FA-14	FA-14
Nº da análise	4	1	10	8	4	7	23	12	5	16	3	2	16
<i>Oxidos (% em peso)</i>													
SiO ₂	0,07	0,08	0,11	0,11	0,09	0,05	0,07	0,02	0,04	0,09	0,06	0,09	0,06
TiO ₂	50,40	49,22	51,56	52,14	52,10	52,45	52,61	52,85	51,39	53,07	52,52	50,89	51,44
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
V ₂ O ₃	0,23	0,53	0,20	0,28	0,26	0,20	0,22	0,23	0,29	0,19	0,23	0,22	0,23
Cr ₂ O ₃	0,03	0,13	0,00	0,01	0,07	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	2,84	4,70	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00	0,00	2,21	0,00	0,00	0,79	0,16
FeO	42,18	42,83	41,17	42,21	45,08	43,50	43,97	44,29	44,59	44,13	41,63	38,56	38,90
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
MnO	2,83	1,45	5,52	2,35	1,56	3,29	2,56	1,82	1,46	2,09	5,28	7,90	7,73
MgO	0,21	0,03	0,07	0,39	0,20	0,07	0,16	0,22	0,12	0,22	0,06	0,03	0,05
CaO	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Nb ₂ O ₅	0,00	0,01	0,39	0,02	0,05	0,15	0,03	0,01	0,03	0,11	0,25	0,67	0,49
Total	98,79	99,01	99,03	97,53	99,93	99,72	99,66	99,48	100,12	99,91	100,03	99,15	99,09
<i>Proporção atômica (6 oxigênios)</i>													
Si	0,004	0,004	0,005	0,006	0,004	0,002	0,003	0,001	0,002	0,005	0,003	0,005	0,003
Ti	1,936	1,892	1,977	2,012	1,977	1,994	1,999	2,008	1,950	2,006	1,990	1,953	1,972
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
V	0,009	0,022	0,008	0,012	0,010	0,008	0,009	0,009	0,012	0,008	0,009	0,009	0,009
Cr	0,001	0,005	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,109	0,181	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000	0,084	0,000	0,000	0,030	0,006
Fe ²⁺	1,802	1,830	1,755	1,812	1,902	1,839	1,857	1,871	1,881	1,855	1,754	1,645	1,658
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Mn	0,123	0,063	0,239	0,102	0,067	0,141	0,109	0,078	0,062	0,089	0,225	0,341	0,334
Mg	0,016	0,003	0,005	0,030	0,015	0,005	0,012	0,017	0,009	0,017	0,004	0,002	0,004
Ca	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Nb	0,000	0,000	0,009	0,000	0,001	0,003	0,001	0,000	0,001	0,002	0,006	0,016	0,011
Total	4,000	4,000	4,000	3,975	4,000	3,994	3,992	3,986	4,000	3,982	3,993	4,000	4,000
<i>Membros finais</i>													
MgTiO ₃ (geikielita)	0,77	0,12	0,27	1,54	0,76	0,27	0,60	0,86	0,45	0,85	0,21	0,10	0,19
MnTiO ₃ (pirofanita)	5,98	3,03	11,93	5,26	3,32	7,10	5,53	3,96	3,06	4,55	11,35	16,91	16,68
FeTiO ₃ (ilmenita)	87,91	88,14	87,79	93,20	94,91	92,64	93,87	95,18	92,37	94,60	88,41	81,50	82,83
Fe ₂ O ₃ (hematita)	5,34	8,71	0,00	0,00	1,01	0,00	0,00	0,00	4,12	0,00	0,00	1,50	0,30
Al ₂ O ₃ (córindon)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00

¹SMVS refere-se à Sequência Metavulcano-Sedimentar

Dados obtidos por microsonda eletrônica/WDS

A ilmenita encontrada nos pegmatitos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei (Tab. 24 e Anexo VII) é caracterizada por um alto teor de Ti (48,2 a 54% em peso de TiO_2) e de Fe^{2+} (37,5 a 46,2% em peso de FeO). O Mn, assim como o Fe^{3+} , são elementos importantes em apenas alguns dos grãos analisados e, conseqüentemente, seus teores variam bastante. Os valores de MnO ocorrem entre 0,3 a 8,4% em peso e os de Fe_2O_3 entre 0 e 6,4% em peso. Nb, V, Mg, Si e Cr ocorrem como elementos menores (máximos de 0,89; 0,53; 0,43; 0,14; e 0,13% em peso de cada óxido, respectivamente) enquanto Ca, Ni e Al ocorrem como traço em apenas alguns dos grãos analisados (<0,1% em peso do óxido). Ao se observar a relação entre a rocha encaixante do pegmatito e a composição da ilmenita analisada, as principais diferenças apresentadas foram: valores maiores de Fe^{3+} nos grãos de ilmenita dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (até 6,36% em peso de Fe_2O_3 , com uma média de 1,89% em peso); teores mais baixos de Mn e de Fe^{3+} nos grãos de ilmenita dos pegmatitos intrusivos tanto nos filitos quanto nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (médias de 2,47% e 0,13% em peso de MnO e Fe_2O_3 , respectivamente); e teores mais altos de Nb e Mn nos pegmatitos intrusivos no ortogranisso Cassiterita (média de 0,42% em peso de Nb_2O_5 e de 7,04% de MnO).

Substituições entre os cátions divalentes que ocupam o sítio A (fórmula química da ilmenita como $A^{2+}B^{4+}\text{O}_3$) são comuns e, entre as amostras analisadas, é possível observar uma correlação direta entre o Fe^{2+} e o Mn (Fig. 39a). Essa correlação não foi observada entre o Fe^{2+} e o Mg (Fig. 39b), provavelmente devido aos baixos teores desse último nas amostras analisadas. Na figura 39a, os grãos de ilmenita dos pegmatitos que intrudem o metadiorito Brumado e o ortogranisso Cassiterita apresentam uma dispersão maior dos dados e não se alinham perfeitamente ao longo da linha formada pelo restante dos pontos. Essa dispersão pode estar associada aos baixos teores de Mn ou do par Mn- Fe^{2+} apresentados por essas amostras. Essa segunda hipótese, observada principalmente nos grãos de ilmenita dos pegmatitos intrusivos no ortogranisso Cassiterita, ganha maior embasamento quando são interpretadas em conjunto com as substituições que ocorrem no sítio B.

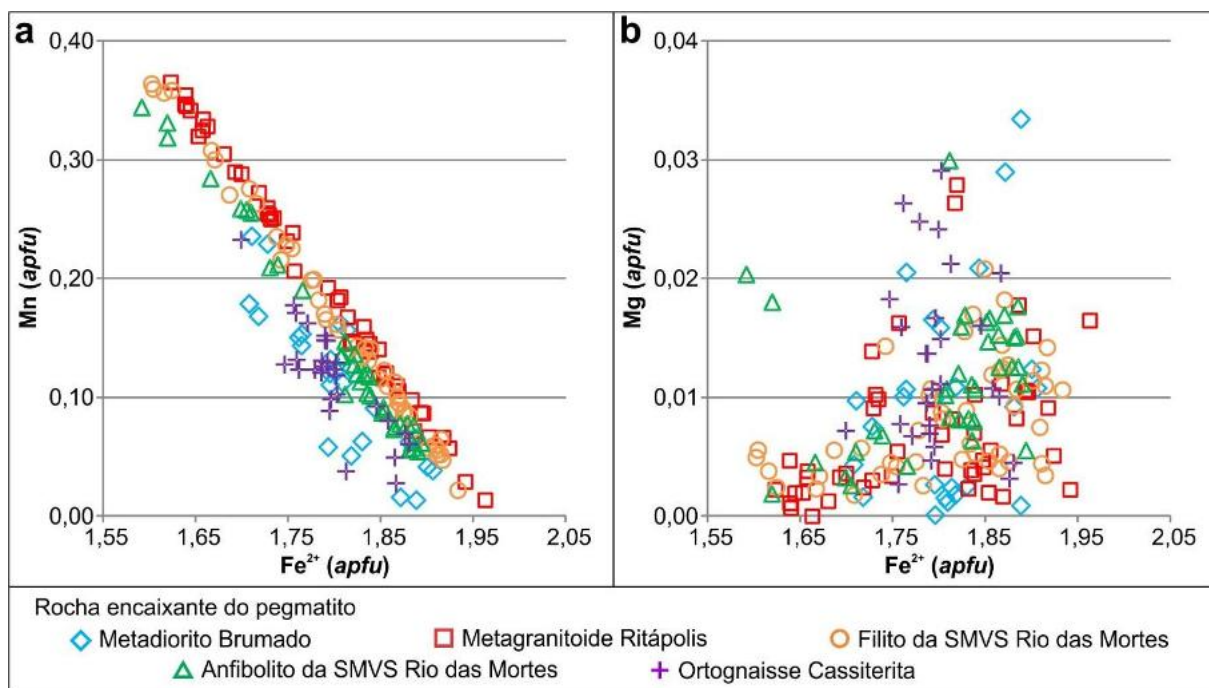


Figura 39 – Gráficos de substituição no sítio A dos grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. (a) Gráfico Mn x Fe²⁺ (apfu) mostrando a correlação da substituição entre os cátions divalentes Fe e Mn. (b) Gráfico Mg x Fe²⁺ (apfu) das mesmas amostras caracterizando a falta de correlação entre os cátions Mg e Fe. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

As substituições observadas no sítio B (Fig. 40a, b) estão principalmente relacionadas à troca entre o Ti⁴⁺ e os cátions Fe³⁺ e Nb⁵⁺ e, subordinadamente, com a entrada dos cátions V³⁺ e Cr³⁺. Para os cátions Fe³⁺ e Nb⁵⁺, os principais mecanismos de substituição foram os descritos por Chakhmouradian & Mitchell (1999) que são:

- (1) $2\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Nb}^{5+}$;
- (2) $\text{R}^{2+} + 2\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow \square + 2\text{Nb}^{5+}$, com $\text{R}^{2+} = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg}$

Cada um dos mecanismos de substituição pode ser aplicado para conjuntos diferentes de amostras, sendo que a equação 1 (Fig. 40a), que aponta uma substituição direta entre Ti e (Fe+Nb), foi aplicada nas amostras em que a soma dos cátions fechou em 4 (com base em 6 oxigênios) indicando a ausência de vacâncias. A equação 2 (Fig. 40b) foi aplicada nas amostras onde a soma dos cátions ficou abaixo de 4 (para 6 oxigênios), justificando as vacâncias geradas. É possível observar que grande parte dos resultados obtidos em grãos de ilmenita provenientes dos pegmatitos que intrudem o ortognaisse Cassiterita se alinharam com a equação 2, indicando a presença de vacâncias geradas pela saída de cátions R²⁺ e Ti⁴⁺, conforme havia sido observado anteriormente na substituição que ocorre no sítio A

(Fig. 39a). Para a maior parte dos grãos analisados não foi possível observar nenhuma das duas relações de substituição indicando que, na verdade, as substituições devem ocorrer de forma acoplada entre esses e os outros cátions, incluindo o V^{3+} e o Cr^{3+} quando presentes. Outra característica dessas amostras é que não foi possível encontrar nenhum padrão entre as substituições que ocorrem no sítio *B* e os corpos pegmatíticos e suas encaixantes.

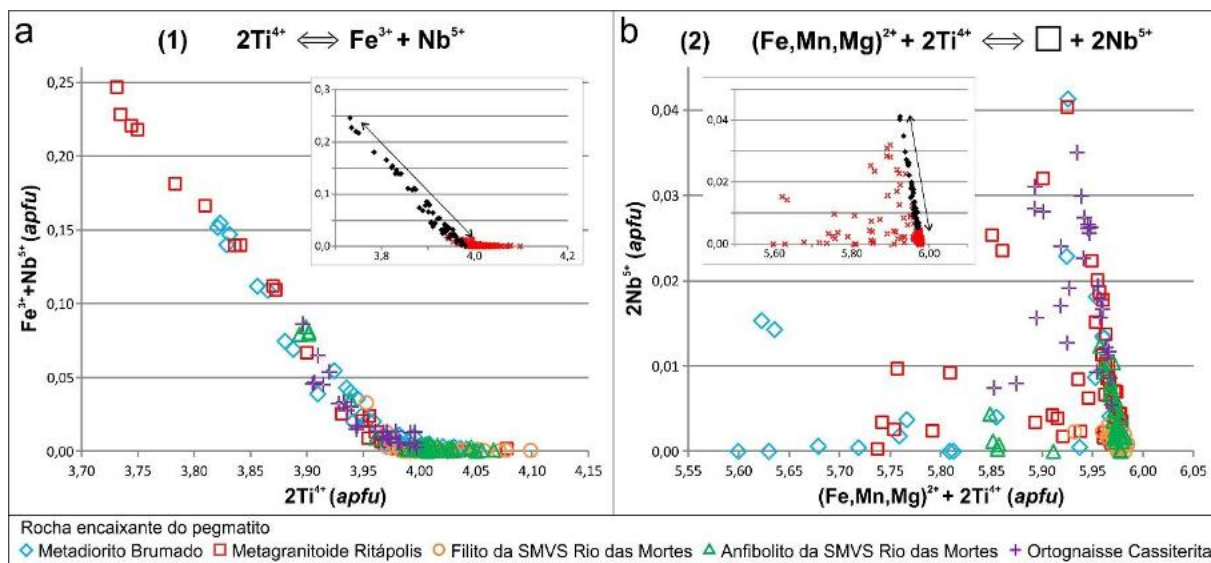


Figura 40 – Gráficos de substituição no sítio *B* dos grãos de ilmenita da Província Pegmatítica de São João del Rei. (a) Gráfico $Fe^{3+} + Nb^{5+} \times 2Ti^{4+}$ (em *apfu*) mostrando a substituição apresentada na equação (1). (b) Gráfico $2Nb^{5+} \times (Fe,Mn,Mg)^{2+} + 2Ti^{4+}$ (em *apfu*) mostrando a ocorrência da substituição apresentada na equação (2). Os gráficos menores inseridos apresentam os mesmos dados dos gráficos maiores, porém são realçados os dados que se alinham (pontos pretos) indicando a ocorrência da substituição de cada equação apresentada. Os pontos em vermelho indicam a não concordância com a substituição apresentada pelas equações sugeridas ou teores muito baixos dos elementos de interesse Nb e Fe^{3+} ($<0,01$ *apfu*). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Gráficos de correlação entre a ocupação dos sítios *A* (Fe^{2+} , Mn, Mg) e *B* (Ti, Fe^{3+} , Nb, V, Cr) mostram que há duas tendências de distribuição dos dados obtidos (Fig. 41a-f), ambas indicando um aumento na proporção de cátions que ocupam o sítio *B* em relação aos cátions divalentes que ocupam o sítio *A*. A reta inferior indica uma relação de aproximadamente 1:2 (diminuição de 1 cátion do sítio *A* para a entrada de 2 cátions no sítio *B*) enquanto a reta superior indica uma relação de aproximadamente 1:1 (Fig. 41a). Os grãos de ilmenita provenientes dos pegmatitos que intrudem o metadiorito Brumado (Fig. 41b) e o metagranitoide Ritópolis (Fig. 41c) encontram-se distribuídas entre as duas tendências observadas. Os grãos de ilmenita associadas aos pegmatitos que intrudem o ortognaisse Cassiterita (Fig. 41f) também apresentam uma distribuição semelhante, porém com menor espalhamento

(próximo à razão 1:1 entre os cátions do sítio A e B). Já os grãos de ilmenita provenientes tanto dos pegmatitos que intrudem os filitos quanto dos pegmatitos que intrudem os anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes se alinham preferencialmente à reta de substituição 1:2 (Fig. 41d, e).

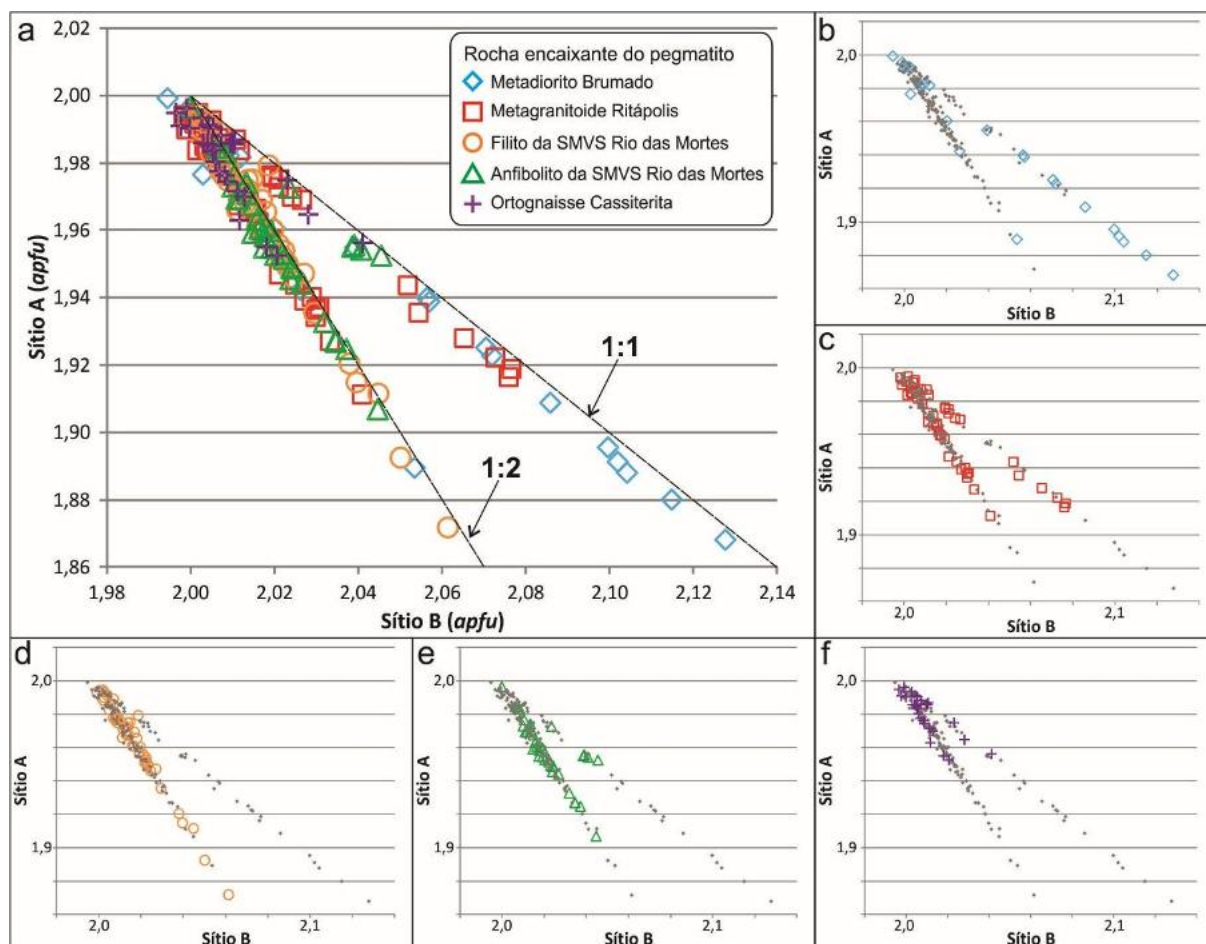


Figura 41 – Gráficos de ocupação dos sítios A e B (em apfu para 6 oxigênios) na estrutura da ilmenita (ABO_3) presente nos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. O sítio A pode ser ocupado por Fe^{2+} , Mn^{2+} e/ou Mg^{2+} e o sítio B por Ti^{4+} , Fe^{3+} , Nb^{5+} , V^{3+} e/ou Cr^{3+} . Em (a), todos os dados obtidos em um único gráfico. Gráficos (b) a (f) dados separados segundo a rocha encaixante do pegmatito. Os pontos cinza representam as amostras dos outros corpos para comparação. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

A existência dos dois tipos de tendência observados nos gráficos da figura 41 está diretamente relacionada à presença do cátion Fe^{3+} na estrutura da ilmenita. Na figura 42 é possível observar que as amostras que possuem esse cátion se alinham preferencialmente à reta 1:1 e é um forte indicativo de que há diferentes ambientes de formação para esses grãos, segundo o estado de oxidação do fluido.

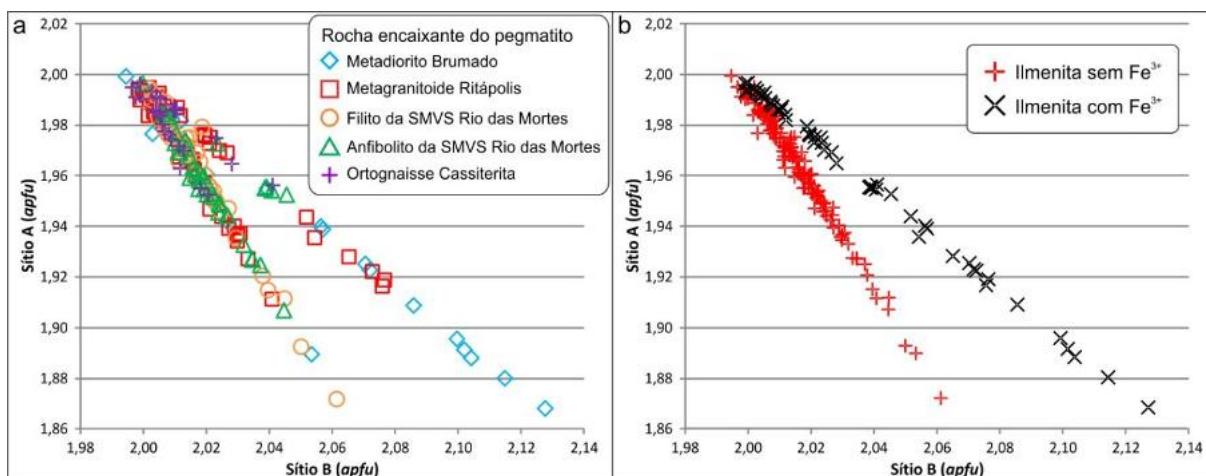


Figura 42 – Gráficos de ocupação dos sítios A e B (em *apfu* para 6 oxigênios) na estrutura da ilmenita. Em (a), todos os resultados plotados em um único gráfico (idem à figura 41a). Em (b), mesmo gráfico identificando as amostras pela presença ou não de Fe^{3+} em sua estrutura, onde é possível observar as duas tendências presentes. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

O cálculo dos membros finais (Tab. 24 e Anexo VII) indica que as amostras são compostas basicamente por ilmenita (membro final entre 81,2 e 98,4% mol) com pirofanita, geikielita e hematita subordinadas. Alguns poucos grãos de ilmenita apresentaram ainda moléculas de coríndon em sua estrutura. Apesar de ocorrerem os cinco membros finais citados em muitos dos grãos de ilmenita estudados, foi utilizado o diagrama ternário ilmenita – pirofanita – hematita para se interpretar as amostras devido aos baixos teores dos membros geikielita e coríndon. Através do diagrama (Fig. 43a) é possível observar uma maior concentração dos dados ao longo da linha ilmenita – pirofanita com uma dispersão em direção ao vértice da hematita. A ilmenita associada a pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (Fig. 43b) e no metagranitoide Ritápolis (Fig. 43c) apresentaram o mesmo padrão, com teores do membro ilmenita entre 85 e 95% mol (em sua maioria), teores do membro pirofanita entre 5 e 15% mol e os maiores teores do membro hematita entre os corpos estudados podendo atingir 11,7% mol. Os teores do membro geikielita variaram de 0 até 0,8% mol nos grãos de ilmenita dos corpos pegmatíticos intrusivos no metadiorito Brumado e até 1,6% mol nos grãos de ilmenita dos corpos pegmatíticos intrusivos no metagranitoide Ritápolis. A ilmenita proveniente dos corpos pegmatíticos que intrudem tanto os filitos (Fig. 43d) quanto os anfibolitos (Fig. 43e) da sequência metavulcano-sedimentar também apresentaram características semelhantes entre si com uma distribuição praticamente restrita à linha dos membros finais ilmenita – pirofanita com teores de ilmenita em sua grande maioria acima de 90% mol de ilmenita. Os teores de geikielita foram, em média, os maiores

observados entre os corpos estudados e variaram de 0,2 a 1,3% mol. A diferença encontrada entre esses dois grupos de amostras é que alguns grãos de ilmenita dos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar chegaram a apresentar até 4% mol do membro final hematita, enquanto que na ilmenita associada aos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar, esses valores não passaram de 1,6% mol. Os grãos de ilmenita associados aos pegmatitos intrusivos no ortognaisse Cassiterita (Fig. 43f) apresentaram os maiores teores do membro final pirofanita (até 18,5% mol), teores de ilmenita mais baixos se comparados aos outros corpos pegmatíticos (entre 81,3 e 88,4% mol) e teores do membro final hematita podendo chegar até a 4% mol. Os teores de geikielita variam entre 0,03 e 0,48% mol e, em média, foram os menores encontrados entre os corpos pegmatíticos estudados.

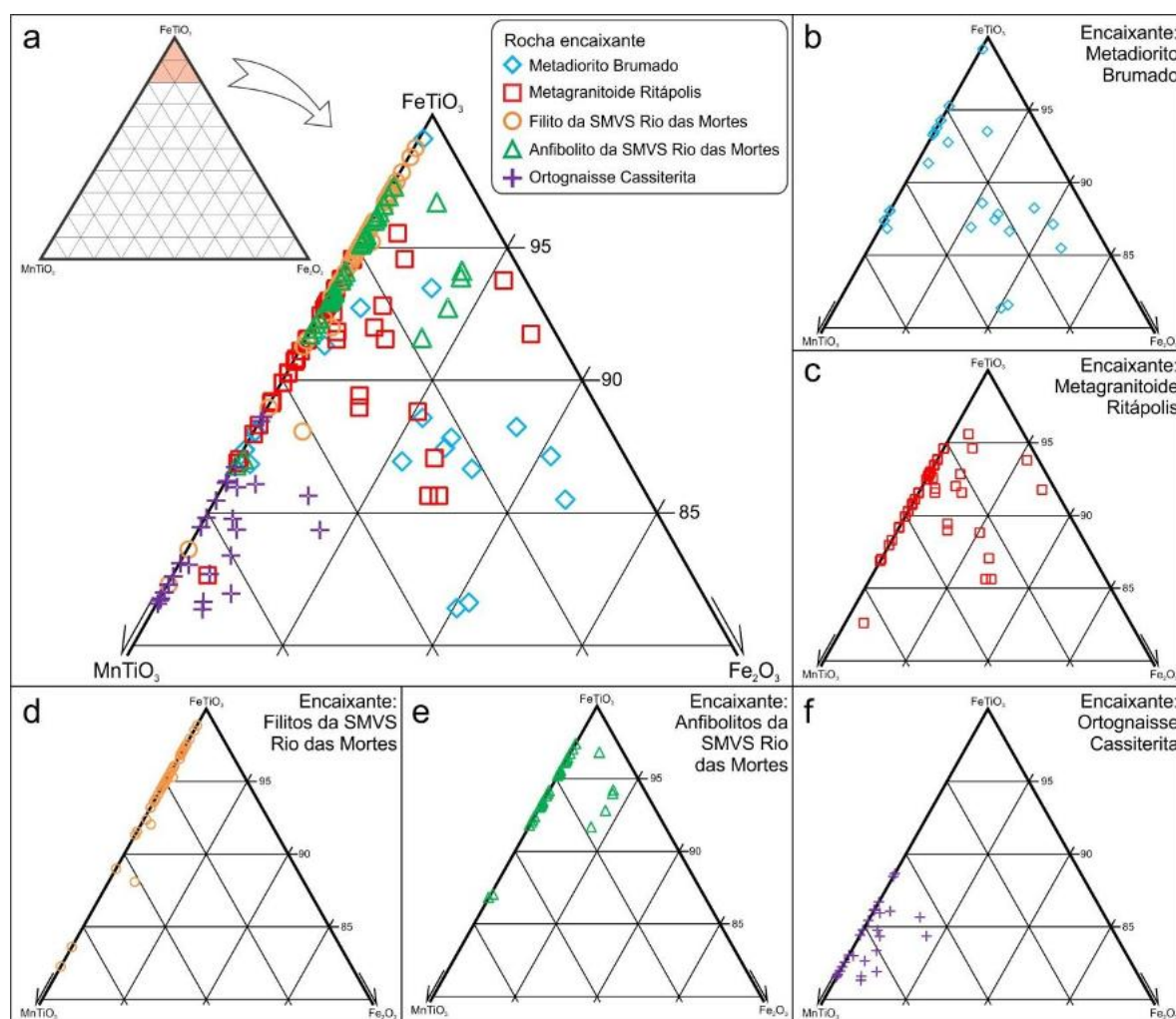


Figura 43 – (a) Diagrama ternário dos membros finais ilmenita (FeTiO₃) – pirofanita (MnTiO₃) – hematita (Fe₂O₃) dos grãos de ilmenita dos pegmatitos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei; (b-e) mesmos dados apresentados em (a), porém separados por encaixante do pegmatito. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

10.5 Granada

A granada é um grupo de minerais de composição $A_3B_2Si_3O_{12}$, onde os sítios *A* e *B* são ocupados por cátions di e trivalentes, respectivamente. São seis as espécies mais comuns, mas teoricamente existem dezesseis espécies possíveis de serem formadas onde cada um dos cátions divalentes Ca, Mg, Fe e Mn se combinam com os cátions trivalentes Al, Fe, Mn e Cr (Deer *et al.*, 2013). As espécies mais comuns são: spessartina ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$), piropo ($Mg_3Al_2Si_3O_{12}$), almandina ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$), grossulária ($Ca_3Al_2Si_3O_{12}$), andradita ($Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$), e uvarovita ($Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$).

10.5.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

Os grãos de granada geralmente são transparentes, apresentam cor desde rosa clara até vermelha alaranjada, brilho vítreo e varia de euédricos (cubos, dodecaedros) a anédricos (fragmentos de cristal), implicando em grãos de aspecto anguloso, subarredondado e, principalmente, arredondado. A maioria dos fragmentos angulosos apresenta dimensão abaixo de 500 μm , porém alguns podem ser maiores, alcançando até 2 mm de diâmetro, bem como cristais dodecaédricos perfeitos podem atingir esse tamanho. Alguns grãos apresentam superfície rugosa e capa de alteração intempérica (oxidação) de coloração desde avermelhada escura até marrom, o que acarreta em um brilho submetálico a terroso (Fig. 44). Destaca-se que quando retirada a capa de alteração, os grãos de granada voltam a apresentar a cor rosa e o brilho vítreo originais, podendo ser classificados como pertencente à série almandina ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$) - spessartina ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$). Essa alteração também pode ser penetrativa nos grãos a partir de pequenas fraturas ou irregularidades nas faces, o que confere uma tonalidade alaranjada em porções do cristal. Os grãos de granada apresentam fratura irregular ou subconchoideal e encontram-se, na maioria dos casos, límpidos, não tendo sido identificadas inclusões sólidas visíveis. Porém, nas amostras FA-05 e FA-09, foram observadas raras inclusões de minerais opacos de coloração preta (Fig. 44). Nas amostras FA-13 e FA-14 os grãos de granada apresentam cor alaranjada, enquanto na amostra FA-10, a cor dos grãos varia de rosa pálido a levemente incolor. Nas amostras FA-02, FA-03, FA-05, FA-06, FA-13 a granada é o mineral mais importante da fração 0,3 A, enquanto nas amostras FA-07, FA-08, FA-09, FA-10, FA-11, FA-12, FA-14 ela varia de comum (ocorrendo em

proporção inferior a 20%) até rara. Destaca-se que a granada está presente em todos os concentrados.

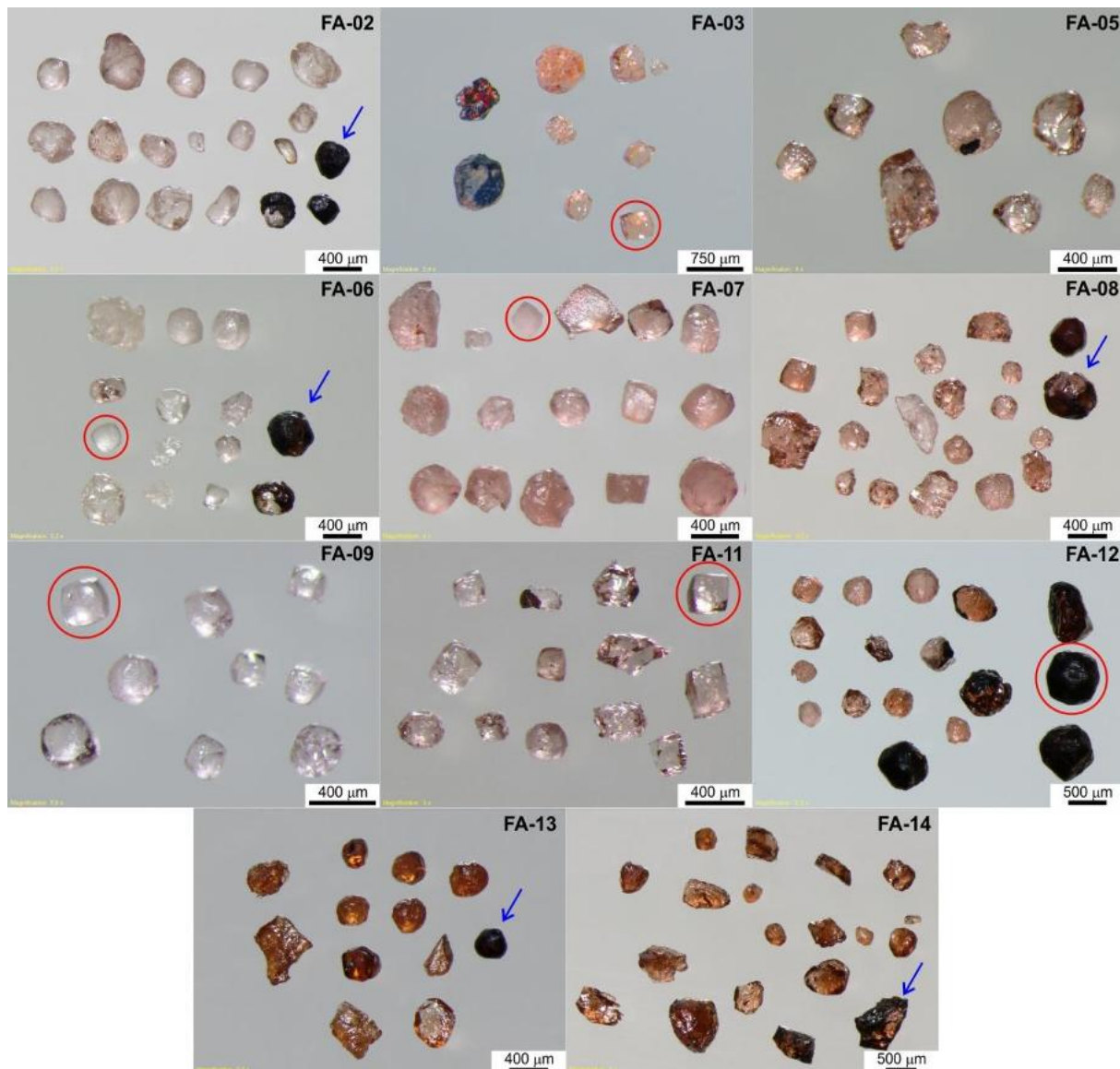


Figura 44 – Exemplos de grãos de granada dos pegmatitos estudados com diferentes tonalidades de rosa (FA-02 a FA-12) e tons de vermelho/laranja (FA-13 e FA-14). A presença da capa de oxidação pode ser observada em grãos escuros indicados por uma seta azul. Cristais podem apresentar formas variadas, sendo comum encontrar grãos cúbicos ou dodecaédricos (círculo vermelho).

10.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

Foram confeccionadas 14 seções polidas de monocamada com grãos de granada para estudos de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia Raman (Tab. 25). As amostras FA-05, FA-08 e FA-10 apresentaram dois conjuntos de grãos de granada de coloração diferentes (rosa/amostra A e incolor/amostra B) e

por esse motivo tiveram duas seções confeccionadas objetivando verificar as possíveis diferenças químicas entre elas.

Tabela 25 – Lista de amostras de grãos de granada estudados por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia Raman. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Corpo hospedeiro do pegmatito	Amostras estudadas
Metadiorito Brumado	FA-02, FA-03, FA-06
Metagranitoide Ritápolis	FA-05 (A e B), FA-07, FA-08 (A e B)
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA-09, FA-10 (A e B)
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA-11, FA-12
Ortognaisse Cassiterita	FA-13, FA-14

Através de imagens de elétrons retroespalhados é possível observar que os grãos de granada apresentam um nível de cinza homogêneo em praticamente todas as amostras estudadas, indicando a ausência de um zonamento químico (Fig. 45a-f). A única exceção ficou com a amostra FA-08B, que apresentou uma leve mudança nos tons de cinza indicando a presença de uma variação na sua composição química (Fig. 46e; Fig. 47). Em geral os grãos estão limpos, com poucas inclusões minerais que, quando ocorrem, podem ser de quartzo (FA-02, FA-07, FA-08B, FA-09, FA-10A e B, FA-11 a FA-14) (Fig. 45c, f; Fig. 46e, f), feldspato (FA-02, FA-08B, FA-10B), zircão (FA-05A, FA-07, FA-10B) (Fig. 45d) e xenotímio (FA-07, FA-08B). Outras inclusões observadas, mas que ocorrem de forma mais restrita, são: minerais de Ta/Nb (FA-05A, FA-08A, FA-10B), cassiterita (FA-10B), biotita (FA-08A) e apatita (FA-10A). Associação com caulinita, óxido de ferro e material de alteração rico em Fe, Al e Mn são comuns (e.g. Fig. 45d).

Utilizando ainda imagens de elétrons retroespalhados (Fig. 46), caracterizou-se que a maior diferença observada entre os grãos de granada rosa (FA-08A e FA-10A) e de granada incolor (FA-08B e FA-10B) está associada à presença de uma maior quantidade de inclusões minerais na própria granada, que são essencialmente representadas por quartzo (Fig. 46d, f). Outra diferença corresponde à presença do leve zonamento químico nos grãos de granada incolor.

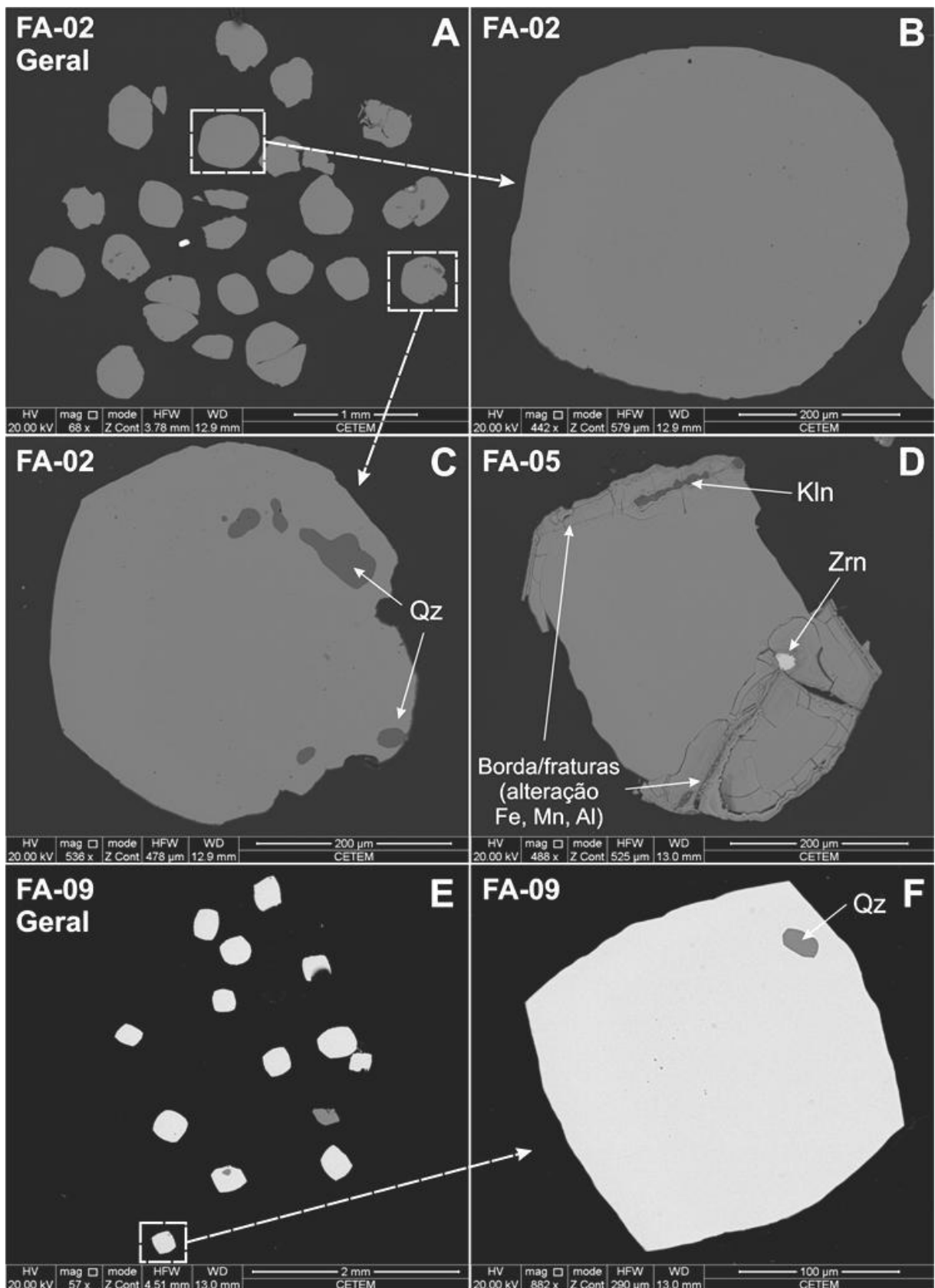


Figura 45 – Imagens de elétrons retroespalhados com exemplos de grãos de granada estudados e as suas inclusões minerais e alterações mais comuns. Qz – quartzo, Kln – caulinita, Zrn – zircão. Diferença no tom de cinza dos grãos de granada nas diferentes amostras é decorrente do contraste e brilho utilizados no momento da aquisição da imagem.

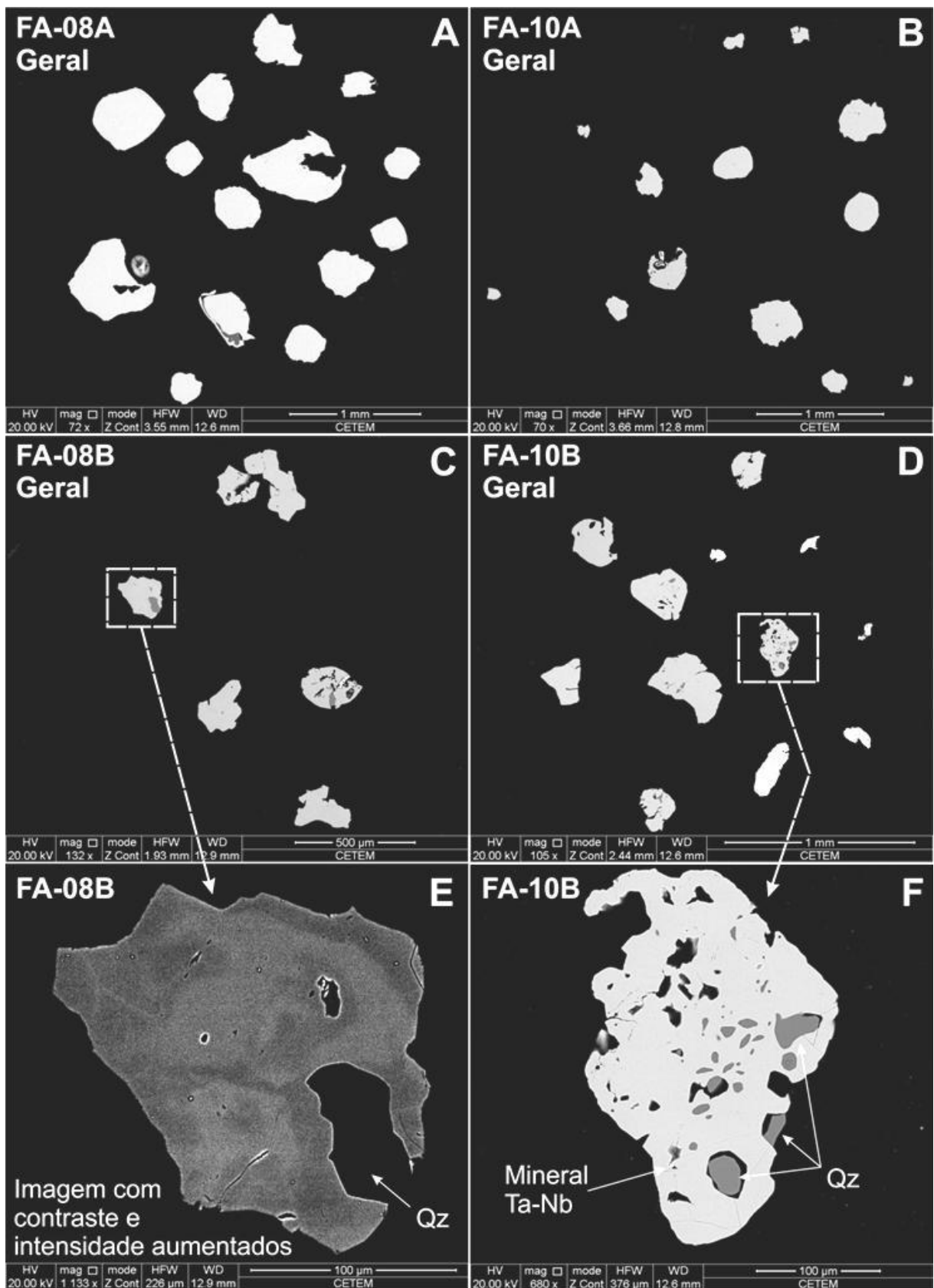


Figura 46 – Imagens de elétrons retroespalhados dos grãos de granada rosa (FA-08A e FA-10A) e incolor (FA-08B e FA-10B). Em (e) grão com leve zonamento composicional e em (f) detalhe de grão com diversas inclusões de quartzo (Qz).

O zonamento químico na amostra FA-08B foi verificado através de um mapeamento químico elementar por EDS (Fig. 47) onde foi possível observar que a distribuição dos elementos Si, Al e Fe no grão analisado é homogênea, enquanto o Ca apresenta-se mais concentrado em algumas zonas. O comportamento do Mn é inverso ao do Ca, apresentando uma maior concentração nas zonas onde o Ca está menos presente indicando uma substituição direta desses dois elementos. Essas zonas correspondem às diferentes tonalidades de cinza observadas na figura 46e. Cabe ressaltar que as imagens em falsa cor obtidas pelo mapeamento para cada elemento tiveram ainda o brilho e contraste alterados de modo a realçar as diferenças entre os resultados obtidos. Infelizmente as diferenças de concentração entre os elementos são muito baixas e não permitiram a semiquantificação da substituição.

10.5.3 Química mineral por MEV/EDS

As análises de EDS para obtenção da química mineral foram realizadas em todas as amostras disponíveis, gerando um total de 210 resultados (Tab. 26 e Anexo VIII). Para cada amostra foi realizada uma análise crítica dos dados obtidos e sete deles, que apresentaram valores anômalos (*outliers*) em relação aos seus pares, foram excluídos. Para o cálculo dos membros finais do grupo da granada (fórmula geral $A_3B_2Si_3O_{12}$) foi utilizada a planilha Excel disponibilizada por Locock (2008) e os seguintes membros foram obtidos: spessartina (Sps) - $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$; piropo (Prp) - $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$; almandina (Alm) - $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$; grossulária (Grs) - $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$; e andradita (Adr) - $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$.

A granada proveniente dos corpos pegmatíticos da província é composta principalmente por Si, Al, Fe, Mn, Ca e Mg (valores médios apresentados na figura 48), sendo que os teores relativos variam, principalmente, em relação aos elementos divalentes Fe e Mn e subordinadamente em relação aos teores de Ca e Mg (Tab. 26 e Anexo VIII). Essas substituições no sítio X ocorrem em pares, sendo $Mn^{2+} + Ca$ substituídos por $Fe^{2+} + Mg$, conforme pode ser observado na figura 49. A substituição do Al por Fe^{3+} (sítio Y) ocorre de forma restrita e foi observada em apenas alguns dos grãos provenientes de pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (amostras FA-02 e FA-06; Anexo VIII).

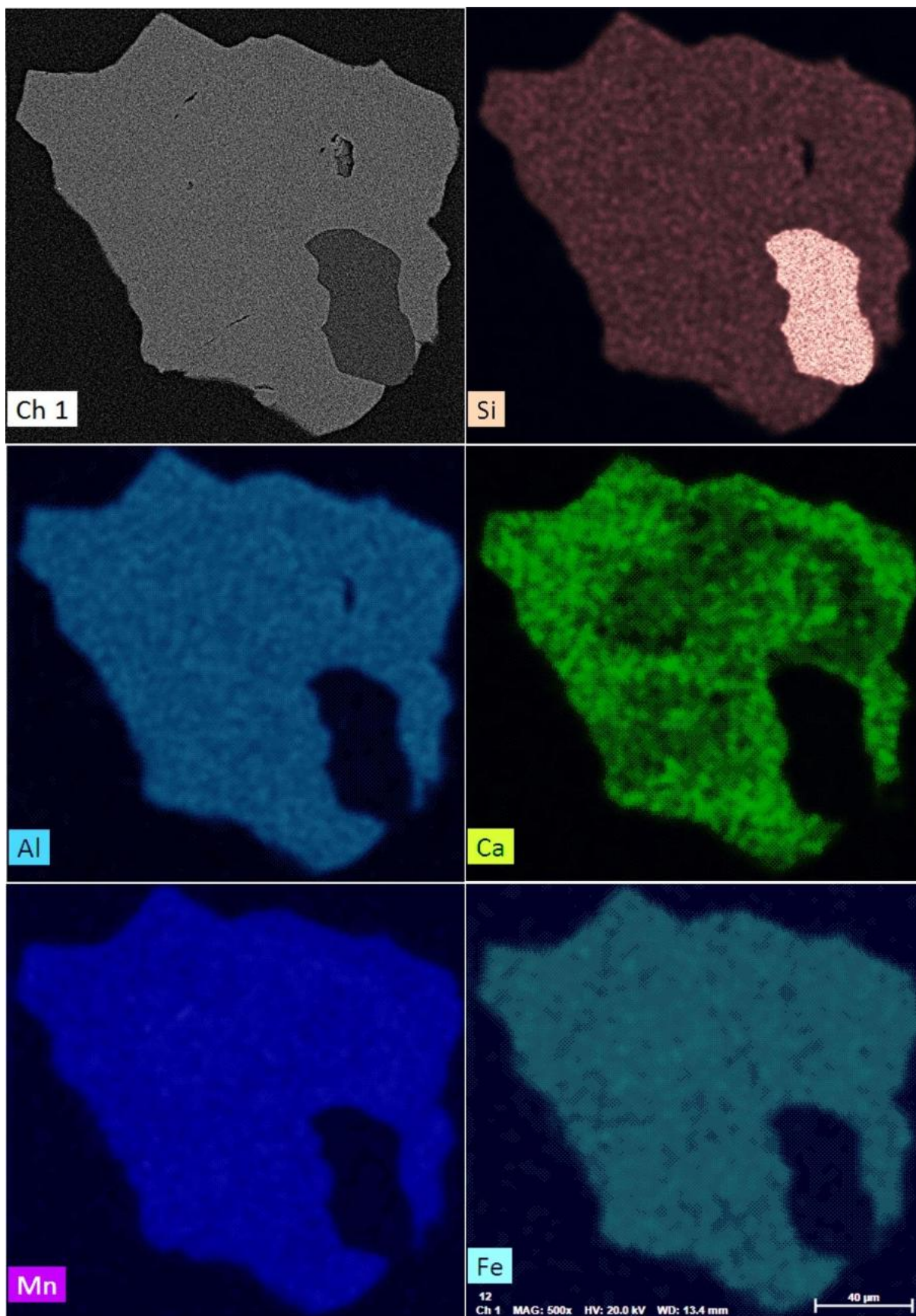


Figura 47 – Imagem de elétrons retroespalhados (Ch 1) e imagens de mapeamento químico dos elementos Si, Al, Ca, Mn e Fe de um grão de granada incolor da amostra FA-08B. No mapa do cálcio é possível observar a concentração irregular deste elemento no grão analisado.

Tabela 26 – Resultados representativos de química mineral (valores mais próximos às médias), proporção atômica e membros finais de diferentes grãos de granada dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Uma análise de cada amostra mais próxima da média dos resultados foi selecionada para compor a tabela. Os dados completos são apresentados no Anexo VIII.

<i>Rocha hospedeira do pegmatito</i>	Metadiorito Brumado			Metagranitoide Ritópolis					SMVS Rio das Mortes					Ortognaisse Cassiterita	
									Filito		Anfibolito				
<i>Amostra</i>	FA02	FA03	FA06	FA05A	FA05B	FA07	FA08A	FA08B	FA09	FA10A	FA10B	FA11	FA12	FA13	FA14
<i>Nº da análise</i>	16	6	8	2	2	9	8	4	10	4	5	8	14	3	10
<i>Óxidos (% em peso)</i>															
SiO ₂	36,9	36,8	35,9	37,0	36,8	36,5	36,8	37,7	36,6	36,6	36,7	36,9	36,8	37,0	37,0
TiO ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Al ₂ O ₃	21,4	21,1	20,6	21,3	21,5	21,8	21,5	21,8	21,6	21,5	21,5	21,5	21,3	21,3	21,1
FeO / FeO _{tot}	9,5	26,1	24,7	21,6	18,5	28,6	28,9	7,3	24,9	26,5	4,0	30,6	28,3	18,0	18,8
Fe ₂ O ₃ / calc	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MnO	31,8	15,6	17,7	19,7	23,0	11,6	11,2	24,4	16,0	15,2	34,5	9,8	12,3	21,5	19,4
MgO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	1,1	2,4	0,6	0,0	0,0	0,9	0,8	1,0	1,2
CaO	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	6,3	0,4	0,2	3,2	0,2	0,5	1,2	2,4
Total (calc)	100,5	100,0	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>Proporção atômica (12 oxigênios)</i>															
Si	3,01	3,02	2,97	3,02	3,01	2,97	3,00	2,99	2,99	3,00	2,98	3,01	3,01	3,01	3,00
Ti	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	0,00	0,00
Al	2,06	2,04	2,01	2,05	2,07	2,09	2,06	2,04	2,08	2,08	2,06	2,07	2,04	2,04	2,02
Fe ²⁺	0,65	1,79	1,71	1,48	1,27	1,95	1,97	0,48	1,70	1,81	0,27	2,09	1,93	1,22	1,28
Fe ³⁺	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn ²⁺	2,20	1,08	1,24	1,36	1,59	0,80	0,77	1,64	1,11	1,05	2,38	0,68	0,85	1,48	1,33
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,13	0,28	0,07	0,00	0,00	0,11	0,10	0,12	0,15
Ca	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,04	0,04	0,54	0,03	0,02	0,28	0,02	0,05	0,10	0,21
<i>Membros finais (mol% normalizado)</i>															
Espessartita (Mn ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂)	76,2	37,2	41,7	47,3	55,2	27,5	26,6	55,6	38,0	36,5	81,0	23,4	29,1	50,5	44,8
Piropo (Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	4,6	9,7	2,5	0,0	0,0	3,8	3,3	4,2	5,0
Almandina (Fe ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂)	22,5	61,7	57,5	51,2	44,0	66,8	67,5	16,4	58,4	62,8	9,4	72,2	66,1	41,7	43,0
Grossulária (Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂)	1,3	1,1	0,7	1,6	0,9	1,3	1,4	18,3	1,1	0,7	9,6	0,7	1,6	3,6	7,2
Andradita (Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂)	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

*SMVS refere-se à sequência metavulcano-sedimentar

Dados obtidos por MEV/EDS

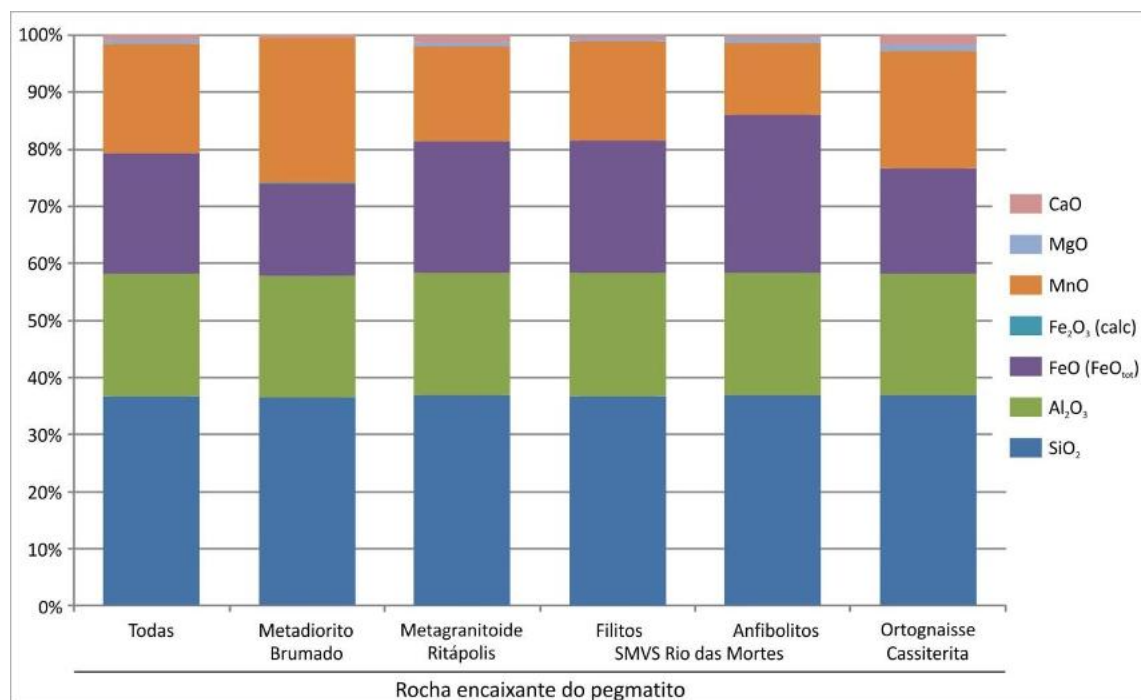


Figura 48 – Composição química em óxidos (valores médios) de diversos grãos de granada proveniente dos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Abaixo das colunas é indicada a litologia principal na qual os pegmatitos estão encaixados. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

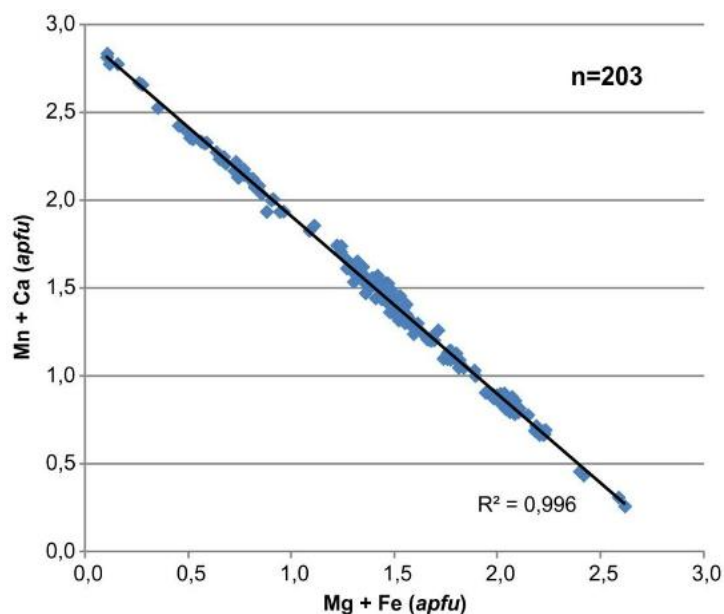


Figura 49 – Distribuição dos pares de elementos Mn+Ca x Mg+Fe (em *apfu*) mostrando uma alta correlação da substituição acoplada na composição química dos diversos grãos de granada dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João Del Rei.

O Fe e o Mn ocorrem em todos os grãos analisados e variam de 1,5 a 35,3% em peso de FeO e de 1,5 a 39,5% em peso de MnO. O Mg está ausente nas análises de granada dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado (FA-02, FA-03 e FA-06), assim como na amostra FA-05 (pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis que está intrudido no metadiorito Brumado), porém pode chegar a 3,5% em peso de MgO no restante dos grãos de granada de pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis, nos filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e no ortogneisse Cassiterita (amostras FA-07 a FA-13). O Ca ocorre em praticamente todas as amostras, sendo que em apenas sete grãos de pegmatitos intrusivos nos filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes este elemento não foi identificado. As amostras provenientes de pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita apresentaram teores constantes de Ca (de 1 a 2,5% em peso de CaO), enquanto as amostras FA-05B, FA-08B (pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes) apresentaram os maiores teores de cálcio encontrados (até 10,5% em peso de CaO na amostra FA-08B), porém seus valores não são constantes e variam muito entre os próprios grãos das populações analisadas. O Ti foi encontrado como elemento traço em poucos grãos da amostra FA-08B e serve apenas como indício de sua possível presença substituindo o Al no sítio B.

Em relação aos membros finais (Fig. 50a, b), a granada estudada é formada majoritariamente por moléculas de spessartina e almandina, apresentando uma composição definida pelos limites $\text{Sps}_{14,7-93,2}\text{Prp}_{0-11,9}\text{Alm}_{3,6-80,6}\text{Grs}_{0-30,2}\text{Adr}_{0-0,5}$ (mol. % normalizado). Uma parte dos grãos de granada dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado foram os únicos a apresentar a molécula andradita, pois possuem um elevado conteúdo de Fe e, em geral, não apresentam a molécula piropo por serem pobres em Mg. Sua composição é definida por $\text{Sps}_{37,2-82,8}\text{Alm}_{15,7-61,7}\text{Grs}_{0,7-2,2}\text{Adr}_{0-0,5}$ (mol. % normalizado). A granada dos corpos pegmatíticos intrusivos no metagranitoide Ritápolis apresenta uma composição definida por $\text{Sps}_{25,2-79,5}\text{Prp}_{0-11}\text{Alm}_{3,6-68,5}\text{Grs}_{0,9-30,2}$ (mol. % normalizado), sendo que o alto teor da molécula grossulária (entre 16,5 e 30,2% mol) foi encontrado exclusivamente na amostra FA-08B (Fig. 50b) cuja granada é incolor e muito rica em Ca. Os grãos de granada do pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis que intrude o metadiorito Brumado (amostra FA-05) apresentaram ausência da molécula piropo, indicando serem pobres em Mg, assim como o observado nos pegmatitos intrusivos diretamente no metadiorito Brumado. Os grãos de granada dos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentaram os maiores conteúdos de spessartina (até 93,2% mol) e têm uma composição definida por $\text{Sps}_{14,7-93,2}\text{Prp}_{0-11,9}\text{Alm}_{3,6-80,6}\text{Grs}_{0-9,6}$ (% mol normalizado) e, assim como observado nas amostras associadas ao metagranitoide Ritápolis, a amostra com os maiores teores da molécula grossulária e menores de almandina (Fig. 50b) foi a granada incolor (FA-10B). Alguns grãos de granada também apresentaram a ausência da molécula piropo, consequência da ausência de Mg em sua composição. Os grãos de granada associados aos corpos que estão encaixados nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentaram os menores teores de spessartina e um dos maiores de almandina entre as amostras estudadas (Fig. 50a, b), apontando para seu elevado conteúdo de Fe e um dos maiores de Mn. Sua composição é definida por $\text{Sps}_{22,4-30,0}\text{Prp}_{2,5-4,4}\text{Alm}_{65,4-73,1}\text{Grs}_{0-1,7}$ (% mol normalizado). Os grãos de granada dos pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita apresentaram baixa variação em sua composição que é definida por $\text{Sps}_{44,8-55,7}\text{Prp}_{3,4-5,8}\text{Alm}_{37,7-44,6}\text{Grs}_{3,0-7,3}$ (% mol normalizado). Essa granada, apesar de não apresentar os valores extremos de grossulária encontrados na amostra FA-08B, foi a que apresentou os maiores teores médios dessa molécula.

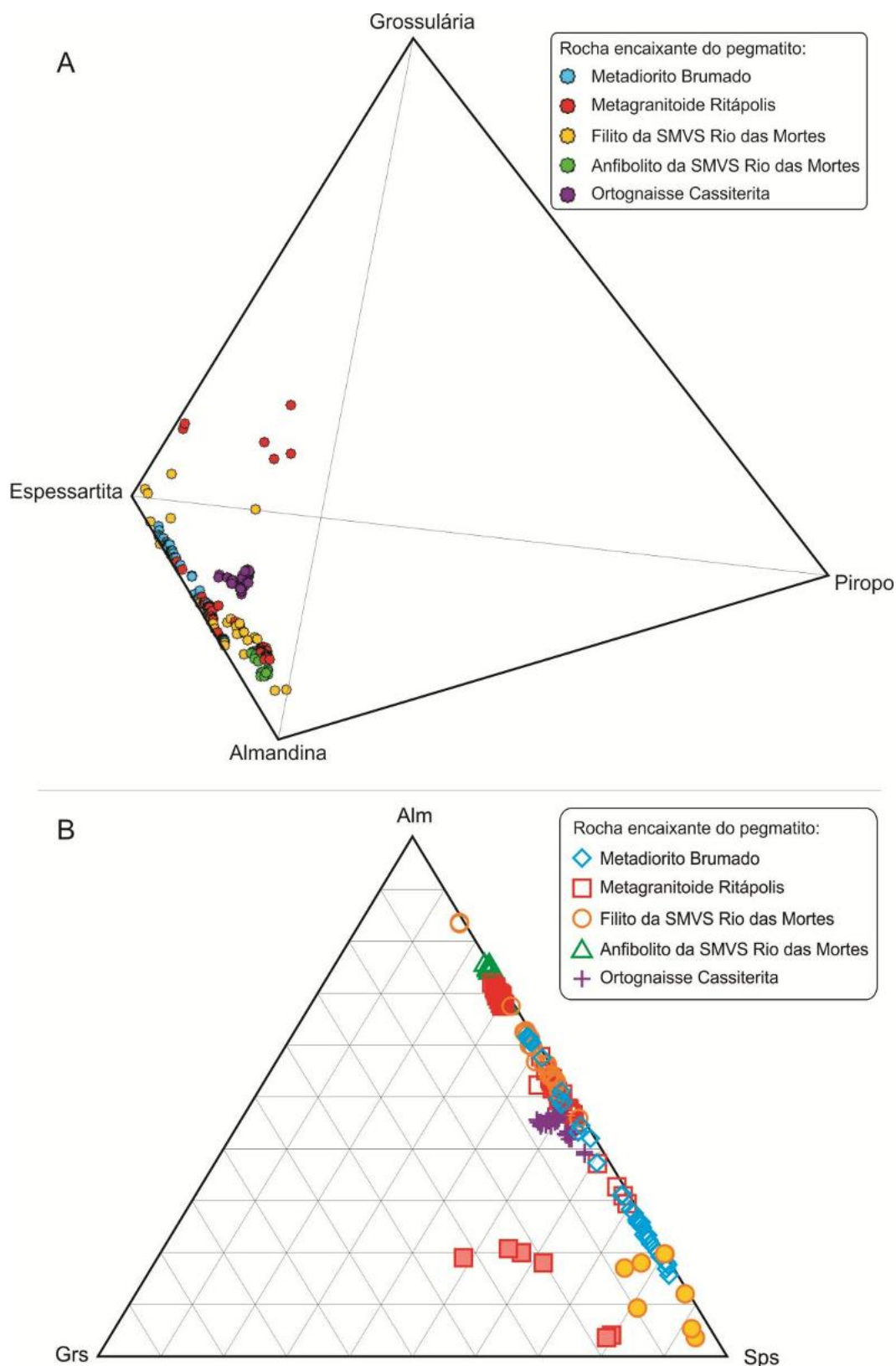


Figura 50 – (A) Diagrama tetraédrico com os membros finais grossulária-spessartina-almandina-piropo com a distribuição das análises dos diversos grãos de granada dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. (B) Diagrama ternário com os membros finais almandina-grossulária-spessartina. Símbolos preenchidos na figura (B) correspondem às amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Morte). SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

Segundo Černý *et al.* (1985) durante a diferenciação de um magma, a concentração de Fe e Mn decresce em conjunto com a cristalização de minerais máficos, porém em razões diferentes, sendo que a razão Fe/Mn é maior em rochas menos diferenciadas e menor em rochas pegmatíticas podendo chegar a valores tão baixos quanto 0,01. Na figura 51 é possível observar que as amostras estudadas se distribuem ao longo da curva apresentada por Černý *et al.* (1985) sendo que as amostras associadas aos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado apresentam a granada mais diferenciada, ou seja, com maior teor de Mn e menor razão Fe/Mn. A distribuição dos grãos de granada das amostras estudadas é coincidente com dados disponíveis na literatura de granadas magmáticas provenientes de pegmatitos e rochas graníticas de outras partes do mundo (Fig. 51b). As amostras FA-08B e FA-10B (símbolos preenchidos no gráfico da figura 51a) se alinham entre si e não coincidem perfeitamente com a linha de diferenciação apresentada por Černý *et al.* (1985) para grãos de granada associados a pegmatitos e rochas plutônicas félsicas (Fig. 51c) apontando para a possibilidade dos grãos dessas duas amostras apresentarem uma gênese distinta dos demais corpos, principalmente por apresentarem maior enriquecimento em Ca e, conseqüentemente, conteúdo mais elevado da molécula grossulária em sua composição (Fig. 50b).

Baldwin & Von Knorring (1983) e Sokolov & Khlestov (1990) correlacionaram os teores de (MnO + CaO) e (FeO + MgO), em grãos de granada de pegmatitos, de modo a definir zonas em corpos pegmatíticos complexos, sendo que Sokolov & Khlestov (1990) não apenas os classificaram, mas também separaram campos com informações sobre o grau de especialização de um pegmatito em relação ao seu conteúdo mineral ou suas zonas estruturais. Na presente tese foram estudados diferentes corpos pegmatíticos e não apenas um único corpo complexo e zonado e, por essa razão, o gráfico (MnO + CaO) x (FeO + MgO) foi usado para correlacionar os corpos da província entre si, seu grau de fracionamento (mais fracionado em direção ao vértice superior esquerdo do gráfico), assim como sua relação com outros dados de granada magmática (pegmatitos e rochas plutônicas félsicas) disponíveis na literatura. Na figura 52 é possível observar a grande correlação entre os dados disponíveis e os aqui obtidos mostrando que a granada estudada possui os teores de Mn, Fe, Ca e Mg esperados para granitoides e pegmatitos. Entre os corpos da província, podemos observar que os grãos de granada associados aos

pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado apresentaram os maiores teores relativos de (MnO + CaO) e os mais baixos de (FeO + MgO), indicando que esses se apresentam mais fracionados que os demais. De forma contrária, os grãos de granada presentes nos corpos pegmatíticos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentam os maiores teores de (FeO + MgO) e os mais baixos de (MnO + CaO) indicando que esses apresentam composição menos diferenciada. Os dados obtidos através da granada das amostras FA-08B e FA-10B (símbolos preenchidos na figura 52) encontram-se ainda mais próximos do vértice superior, porém isso é decorrente da presença de Ca em maior quantidade e não de um teor mais elevado de Mn (o que indicaria o seu maior fracionamento).

Mange & Morton (2007) utilizaram dados de química mineral de granada para estudos de proveniência em sedimentos recentes utilizando um gráfico ternário X_{Mg} - X_{Fe+Mn} - X_{Ca} (Fig. 53). Separam quatro tipos de granada, sendo: tipo A proveniente de rochas metassedimentares de alto grau (granulíticas) ou charnoquitos; tipo B, associado a rochas metassedimentares anfibolíticas; tipo C, provenientes de rochas metabásicas de alto grau; e tipo D, provenientes de rochas metassomáticas. O tipo B pode ser subdividido, dependendo do teor de cálcio presente, no subtipo Bi que tem $X_{Ca} < 10\%$ e representa granada proveniente de rochas ígneas intermediárias a ácidas (mais ricas em Mn), enquanto o subtipo Bii apresenta granadas com $X_{Ca} > 10\%$. O campo C também é subdividido, sendo que o tipo Cii representa granada com alto teor de Mg e sugere uma derivação de rochas ultramáficas como peridotitos ou piroxenitos. Os grãos de granada dos corpos pegmatíticos estudados, independentemente do litotipo encaixante, caíram quase que exclusivamente no campo Bi corroborando a proposta de Mange & Morton (2007) para este campo. Porém alguns resultados obtidos na amostra FA-08B caíram no campo Bii, pois a granada dessa amostra é mais rica em grossulária (Fig. 53). Ainda foi possível separar três grandes grupos neste diagrama: o primeiro é formado pelas amostras associadas aos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado, incluindo aquelas do pegmatito que intrude o metagranitoide Ritápolis intrusivo no metadiorito Brumado e que são pobres em Mg e ricas em Fe+Mn; o segundo é representado pelas amostras associadas ao ortogneisse Cassiterita (relativamente mais ricas em Mg e Ca); e o terceiro é composto pelo restante das amostras (teores variados de Mg e

Ca). A granada da amostra FA-10B apresentou teores menores que 10% de Ca e por isso caiu no campo Bi, mas mostra um comportamento semelhante aos grãos do pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado.

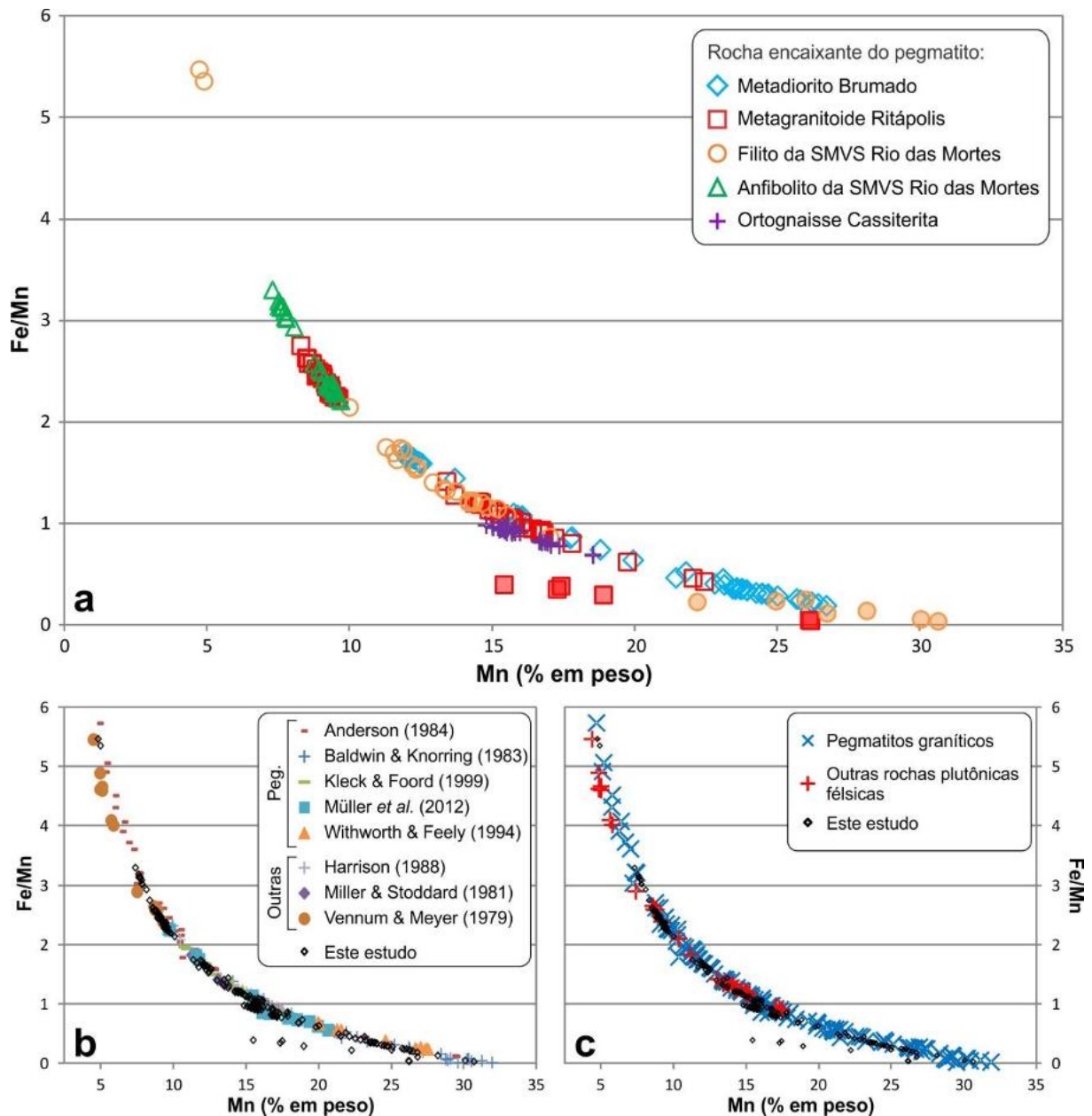


Figura 51 – (a) Diagrama Fe/Mn x Mn (% em peso) de diversos grãos de granada provenientes dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Símbolos preenchidos representam as amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes). (b) Mesmo diagrama para comparação com dados publicados de granada magmática proveniente de pegmatitos graníticos (Anderson, 1984; Baldwin & Von Knorring, 1983; Kleck & Foord, 1999; Müller *et al.* 2012; Withworth & Feely, 1994) e outras rochas plutônicas félsicas (Harrison, 1988; Miller & Stoddard, 1981; Vennum & Meyer, 1979). (c) Mesmos dados presentes em (b), separados pelos grupos de rochas. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

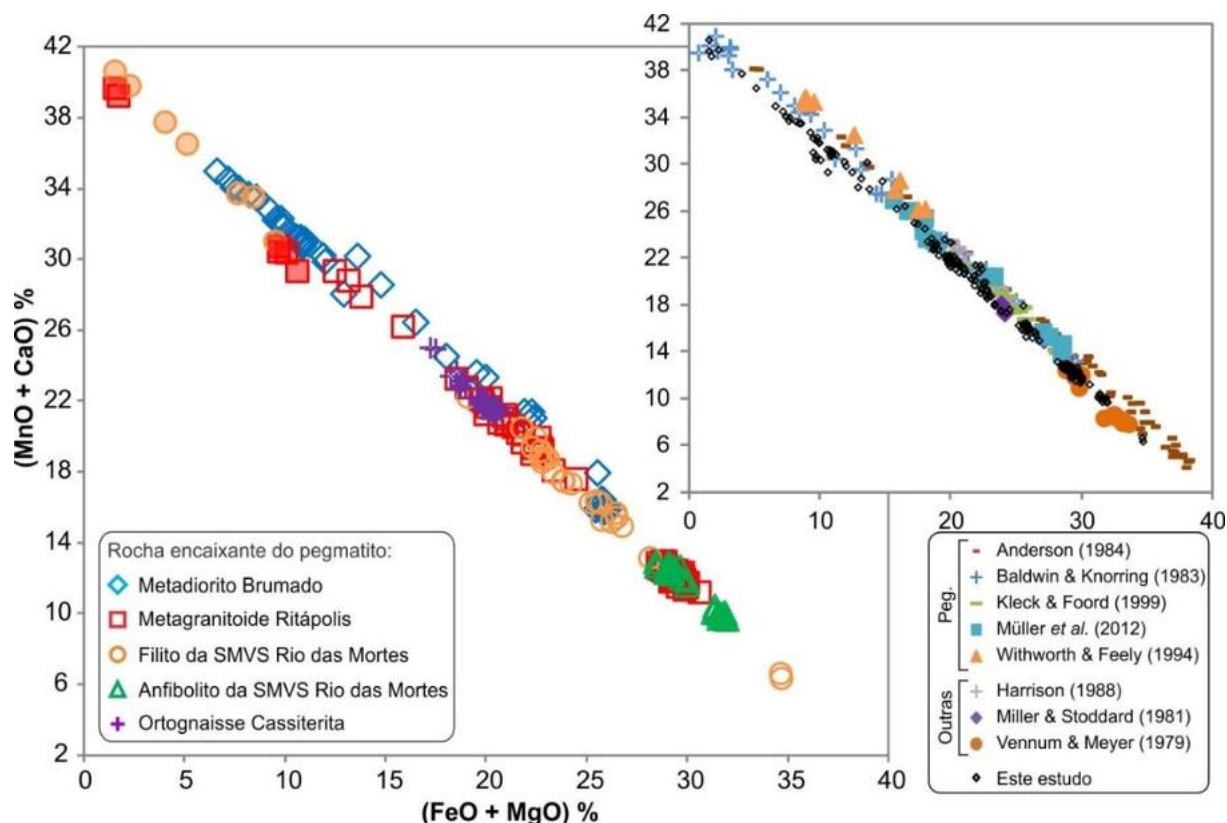


Figura 52 – Diagrama (MnO + CaO) x (FeO + MgO) (% em peso) de diversos grãos de granada provenientes dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Símbolos preenchidos representam as amostras FA-08B (encaixante do pegmatito é o metagranitoide Ritápolis) e FA-10B (encaixante do pegmatito são os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes). O gráfico menor mostra o mesmo diagrama para comparação com dados publicados de granada magmática proveniente de pegmatitos graníticos (Anderson, 1984; Baldwin & Von Knorring, 1983; Kleck & Foord, 1999; Müller *et al.* 2012; Withworth & Feely, 1994) e outras rochas plutônicas félsicas (Harrison, 1988; Miller & Stoddard, 1981; Vennum & Meyer, 1979).

A partir dos resultados apresentados é possível definir que a granada incolor é mais rica em Ca (grossulária) e pode ser considerada como uma fase mais precoce. Segundo Green (1977) o manganês e o cálcio apresentam comportamentos antagônicos em relação a sua entrada na estrutura da granada segundo a pressão litostática presente no momento da cristalização. Uma granada rica na molécula spessartina pode cristalizar em pressões tão baixas quanto 3 kb, enquanto fases ricas em grossulária precisam de pressões superiores a 5 kb. Feições de reabsorção e sobrecrecimento não foram observadas em nenhuma das amostras analisadas indicando que essa granada, depois de cristalizada, continuou em equilíbrio com o líquido pegmatítico. Estudos mais detalhados com microsonda eletrônica irão verificar se há realmente um zonamento químico na amostra FA-08B e ainda se este zonamento pode indicar a ordem de cristalização (enriquecimento de Mn em direção a borda indicaria que essa granada é realmente mais precoce). Quanto à sua cor,

Manson & Stockton (1981) apontaram que granada de composições piropo-almandina-spessartina apresenta tons variáveis de vermelho, rosa e púrpura, mas que essa cor não reflete diretamente a composição química dos membros finais e sim de elementos traço em sua composição. Aqui é possível observar que a granada incolor apresenta uma maior concentração do membro final grossulária e que essa deve ser a causa de sua ausência de cor. Quanto à sua abundância nas amostras estudadas, Morton & Hallsworth (2007) mostram que granada rica em Ca é menos estável ao intemperismo do que granada pobre em Ca. Como estamos trabalhando com saprólitos de pegmatitos, é possível que a granada mais rica em grossulária já tenha sido alterada e removida, sendo preservada em apenas alguns dos corpos estudados.

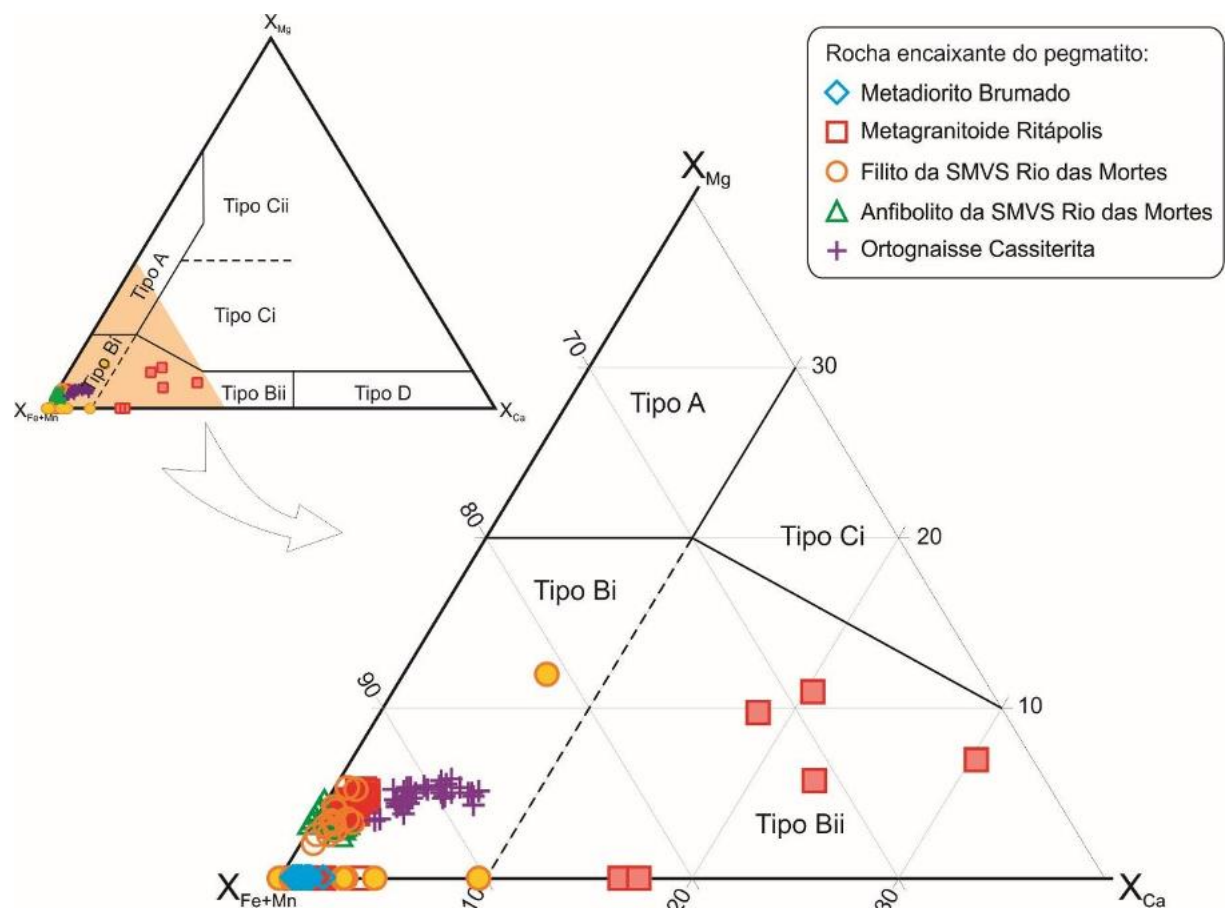


Figura 53 – Diagrama ternário X_{Mg} - X_{Fe+Mn} - X_{Ca} para estudos de proveniência apresentado por Mange & Morton (2007). Granada tipo A proveniente de rochas metassedimentares de alto grau (granulíticas) ou charnoquitos; tipo B, associado a rochas metassedimentares anfibolíticas; tipo C, provenientes de rochas metabásicas de alto grau; e tipo D, provenientes de rochas metassomáticas. Subtipos são discutidos no texto.

10.5.4 Espectroscopia Raman

Em geral os espectros Raman dos diferentes tipos de granada apresentam o mesmo comportamento, sendo formados por três regiões contendo bandas bem definidas (Hofmeister & Chopelas, 1991; Koselov & Geiger, 1998): região de baixa energia (160 – 415 cm^{-1}), média (450 – 660 cm^{-1}) e de alta (815 – 1062 cm^{-1} , Fig. 54). Além dessas três regiões geradas pelo tetraedro de silício [modo externo de rotação $R(\text{SiO}_4)^{4-}$, interno de dobramento $(\text{Si-O})_{\text{bend}}$ e interno de estiramento $(\text{Si-O})_{\text{str}}$, respectivamente], outros modos de vibração podem ocorrer de forma menos intensa, sendo que os movimentos de translação dos cátions com oxigênio (X-O) aparecem entre 100 e 500 cm^{-1} .

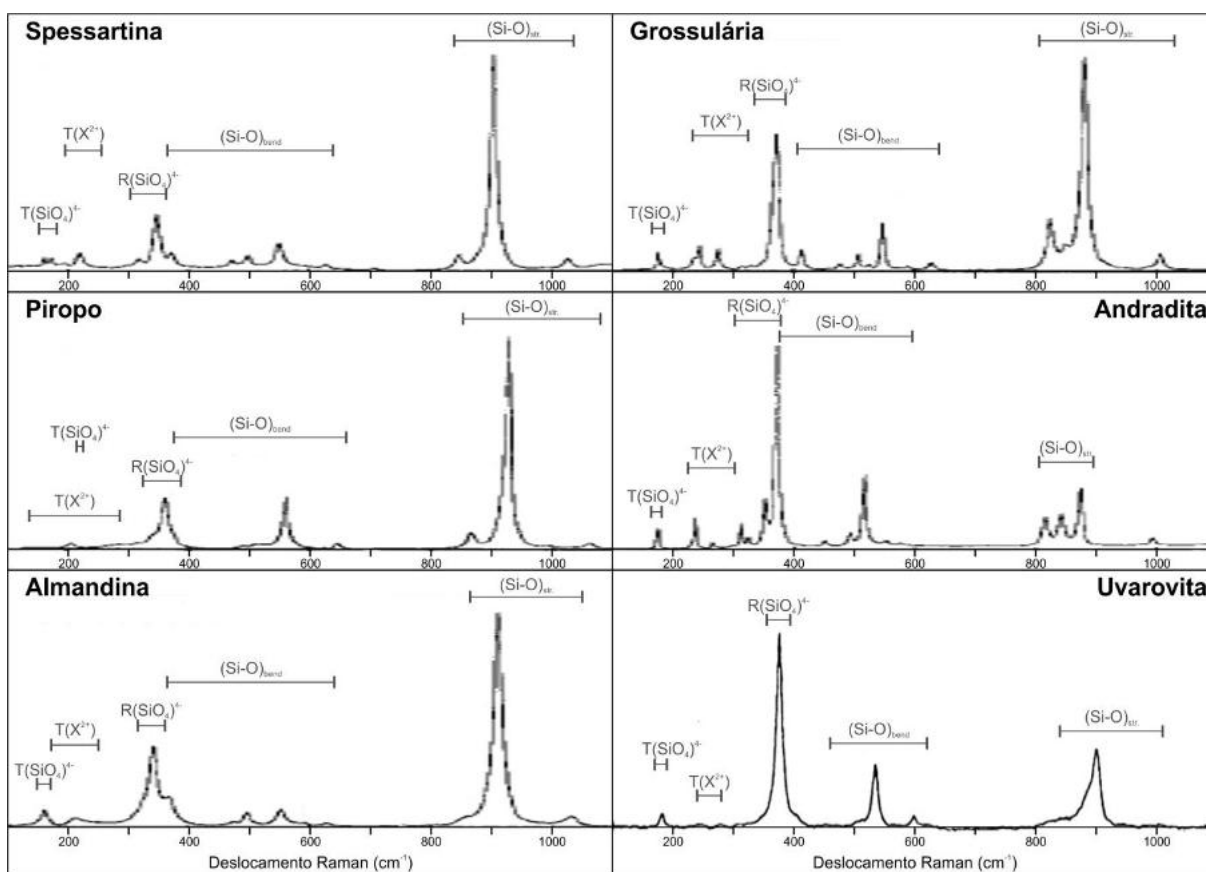


Figura 54 – Espectros Raman característicos dos membros finais spessartina, piropo, almandina, grossulária e andradita segundo Hofmeister & Chopelas (1991) e da uvarovita segundo Kolesov & Geiger (1998). As regiões com os principais modos vibracionais (str = estiramento, bend = dobramento, R = rotação, T = translação) são apresentadas para cada membro final.

Estudos teóricos de análise de simetria preveem 25 modos vibracionais Raman ativos para a granada (Moore *et al.*, 1971). Estudos teóricos e experimentais de Hofmeister & Chopelas (1991) e de Kolesov & Geiger (1998) em diferentes cristais

de granadas naturais com composições próximas aos membros finais piropo, almandina, spessartina, grossulária, andradita e uvarovita confirmaram a presença das bandas previstas e definiram intervalos de frequência segundo a composição do mineral analisado (Tab. 27).

Tabela 27 – Simetria e frequência dos modos Raman ativos de diferentes tipos de granada segundo Hofmeister & Chopelas (1991) e Kolesov & Geiger (1998). Modos vibracionais descritos: str = estiramento, bend = dobramento, R = rotação, T = translação.

	Piropo			Almandina			Spessartina			Grossulária			Uvarovita			Andradita		
	A _{1g}	E _g	F _{2g}	A _{1g}	E _g	F _{2g}	A _{1g}	E _g	F _{2g}	A _{1g}	E _g	F _{2g}	A _{1g}	E _g	F _{2g}	A _{1g}	E _g	F _{2g}
(Si-O) _{str.}	928		1066	916		1038	905		1029	880		1007	876		1002			995
		945	902		930	897		913 ^a	879		904 ^a	848		894	864		874	842
			871			863			849			827			838			816
(Si-O) _{bend}	563	626 ^a	650	556	596	630	552	592 ^a	630	550	592	630	526	590	618	516	574	593 ^a
		525	598		521 ^a	581		522	573 ^a		529	582		526			492	553
		375	512		370	500		372	500		420	512			509		382	494
			492			475			475			483			459			452
R(SiO ₄) ⁴⁻	364	344	383	342	323		350	321		376	373	389	370			370	352	
			353			355 ^a			350 ^a		319 ^a	351		366	388			325
			322			314			302			333						312
T(SiO ₄) ⁴⁻		211	222		167	170		162	175		181	186		176	178		174	174
T(X ²⁺)		284			256	216		269	221		320	280			272		298	264
			135			171			196			247			242			236

^aModos observados em Hofmeister & Chopelas (1991)

Para cada amostra (Tab. 25) foram coletados cinco espectros Raman em diferentes grãos totalizando 75 análises. Cada conjunto de dados foi criticamente analisado (qualidade do espectro, nível de ruído, presença de fluorescência, correção de linha de base) e quando possível os cinco espectros foram reduzidos a um único representativo por meio de modelagem matemática no próprio software de coleta de dados (*Labspec*). Essa redução só não foi possível nas amostras FA-08B e FA-10B que apresentaram espectros muito distintos entre si e que serão discutidos em separado. Na figura 55 é possível observar os espectros Raman característicos das amostras de granada rosa estudadas, as quais apresentaram espectros muito semelhantes entre si, sendo que as principais diferenças estão na posição das bandas em torno de 913 e 345 cm⁻¹. A banda em 913 cm⁻¹ está associada ao modo vibracional de estiramento Si-O, que na almandina fica em 916 cm⁻¹ e na spessartina em 905 cm⁻¹ (Tab. 27). Os valores observados ficam em torno de 913 e sua posição se desloca para valores mais baixos à medida que o teor de spessartina na granada aumenta: 910 cm⁻¹ nas amostras associadas ao ortognaisse Cassiterita (FA-13 e FA-

14) e 908 cm^{-1} na amostra FA-02 (metadiorito Brumado). A banda associada à vibração de rotação do tetraedro de silício apresenta frequências intermediárias entre o esperado para almandina (342 cm^{-1}) e spessartina (350 cm^{-1}).

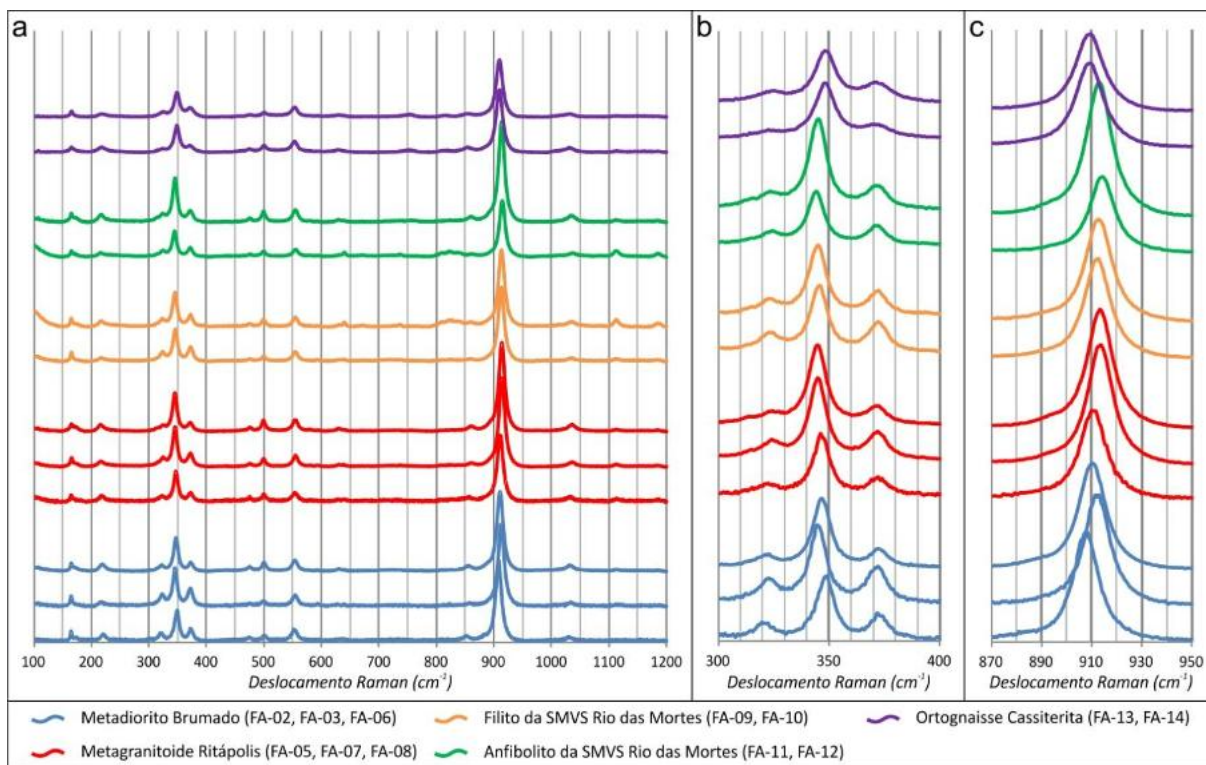


Figura 55 – (a) Espectros Raman característicos das amostras de granada rosa. As principais bandas observadas encontram-se nas regiões em torno de $300\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, $450\text{-}660\text{ cm}^{-1}$ e $800\text{-}1060\text{ cm}^{-1}$. (b) Detalhe da região espectral entre $300\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ mostrando a variação na posição da banda associada à rotação do tetraedro de silício. (c) Detalhe da região espectral entre $870\text{-}950\text{ cm}^{-1}$ mostrando o deslocamento da banda associada ao modo de estiramento da ligação Si-O. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

A maior diferença entre os dois grupos apresentados encontra-se na região entre 300 e 400 cm^{-1} , onde a granada rosa apresentou três bandas bem definidas em $319\text{-}323$, $344\text{-}349$ e $370\text{-}372\text{ cm}^{-1}$, enquanto a granada incolor (amostras FA-08B e FA-10B) apresenta apenas uma banda em torno de 354 cm^{-1} com uma leve assimetria em direção a frequências mais altas (Fig. 56). Outras diferenças observadas ocorrem na posição das bandas em torno de 350 cm^{-1} e em 900 cm^{-1} . No primeiro caso há um aumento de 345 cm^{-1} para 351 até 354 cm^{-1} e no segundo um deslocamento da banda que ocorre em 915 cm^{-1} para frequências mais baixas (até 903 cm^{-1}), ambas na granada incolor. Estes deslocamentos foram também observados entre algumas das amostras de granada rosa, porém eles estão mais pronunciados na granada incolor e provavelmente devem-se a presença da

molécula de grossulária em maior porcentagem (até 23% mol na amostra FA-08B) e a teores mais elevados da molécula de spessartina em relação à de almandina.

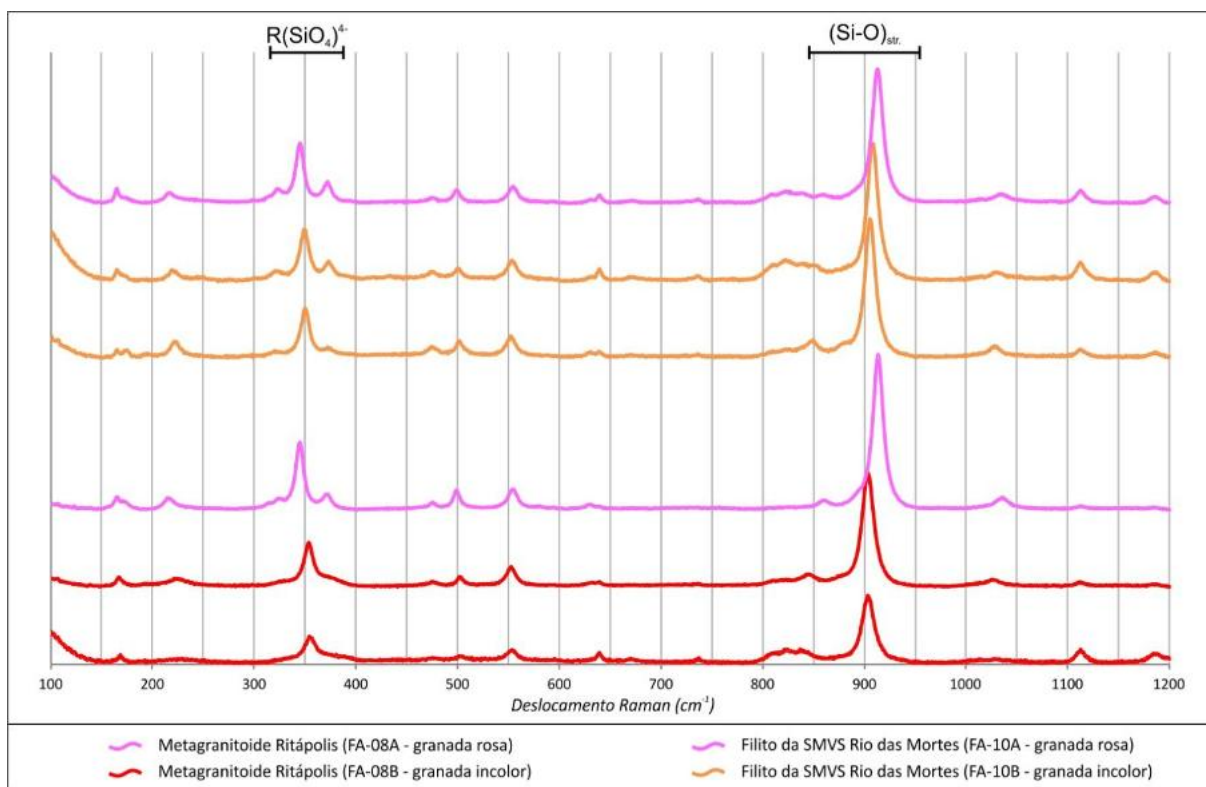


Figura 56 – Espectros Raman característicos entre 100 e 1200 cm^{-1} das amostras de granada incolor FA-08B e FA-10B em comparação com as amostras de granada rosa (FA-08A e FA-10A). É possível observar o deslocamento das bandas na região de vibração $(\text{Si-O})_{\text{str}}$ e $\text{R}(\text{SiO}_4)^{4-}$. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes.

10.6 Xenotímio

O xenotímio é um fosfato de terras raras de fórmula ETRPO_4 , onde o ETR se refere aos lantanídeos + Y, e é caracterizado por incorporar preferencialmente os elementos terra rara pesados (Tb-Lu) e por conter comumente U (Ni *et al.*, 1995; Förster, 1998).

10.6.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

O xenotímio é um mineral translúcido, possui brilho resinoso a terroso, cor esbranquiçada, bege, cinza e amarelada, podendo ser encontrado em grãos desde euédricos (tetragonais bipiramidais) até anédricos (fragmentos de grãos). Normalmente apresenta-se alterado intempericamente para uma massa formada por pequenos cristais com aspecto sacaroidal e pode ocorrer intercrescido com zircão (Fig. 57). O xenotímio é encontrado principalmente nas frações 0,5 A e 0,6 A, sendo

que seu tamanho médio é menor que 150 μm , porém pode alcançar mais de 500 μm de diâmetro na amostra FA-13. Nas amostras FA-11, FA-12, FA-13 e FA-14, o xenotímio é um mineral importante nas frações 0,5 A e/ou 0,6 A, enquanto nas amostras FA-03, FA-05, FA-07, FA-08, FA-10, pode variar de comum até raro. Nas amostras FA-02, FA-06, FA-09 não foi encontrado qualquer grão de xenotímio.

10.6.2 Microscopia eletrônica de varredura

Os grãos de xenotímio analisados apresentam inclusões muito finas de diversos minerais de Th e/ou U (Fig. 58a - e), mais raramente inclusões de apatita (Fig. 58b) e de óxido de ferro, podendo ainda apresentar associação com zircão (Fig. 58c) e monazita (Fig. 58d). As inclusões finas anteriormente citadas (diâmetro $<10\ \mu\text{m}$) podem apresentar Si em sua composição e, quando isso ocorre, provavelmente trata-se de microinclusões de torita $[(\text{Th},\text{U})\text{SiO}_4]$. Porém, devido ao seu reduzido tamanho, a análise qualitativa por EDS para identificação pela química mineral fica muito comprometida devido à interferência da composição do próprio xenotímio como matriz.

Foram ainda observados alguns grãos de xenotímio com zonamento químico nas amostras FA-03, FA-07, FA-11 e FA-12. A figura 59 mostra dois exemplos desse zonamento presente nas amostras FA-03 (Fig. 59a, b) e FA-12 (Fig. 59d). A figura 59c mostra um perfil de análises EDS realizado no grão de xenotímio da amostra FA-03 (retângulo nas figuras 59a, b). Esse perfil é composto pela acumulação do sinal EDS de elementos pré-selecionados e, neste caso, é possível observar que a intensidade do sinal do Y cai enquanto o dos elementos terras raras pesados (Dy, Er, Yb) sobe em direção a borda do mineral. As duas imagens abaixo do perfil são da região analisada, sendo a primeira uma imagem de elétrons retroespalhados e a segunda uma imagem de falsa cor para realçar a diferença composicional entre as regiões zonadas. Os pontos analisados por EDS também estão marcados na figura 59a e seus resultados estão presentes no Anexo IX.

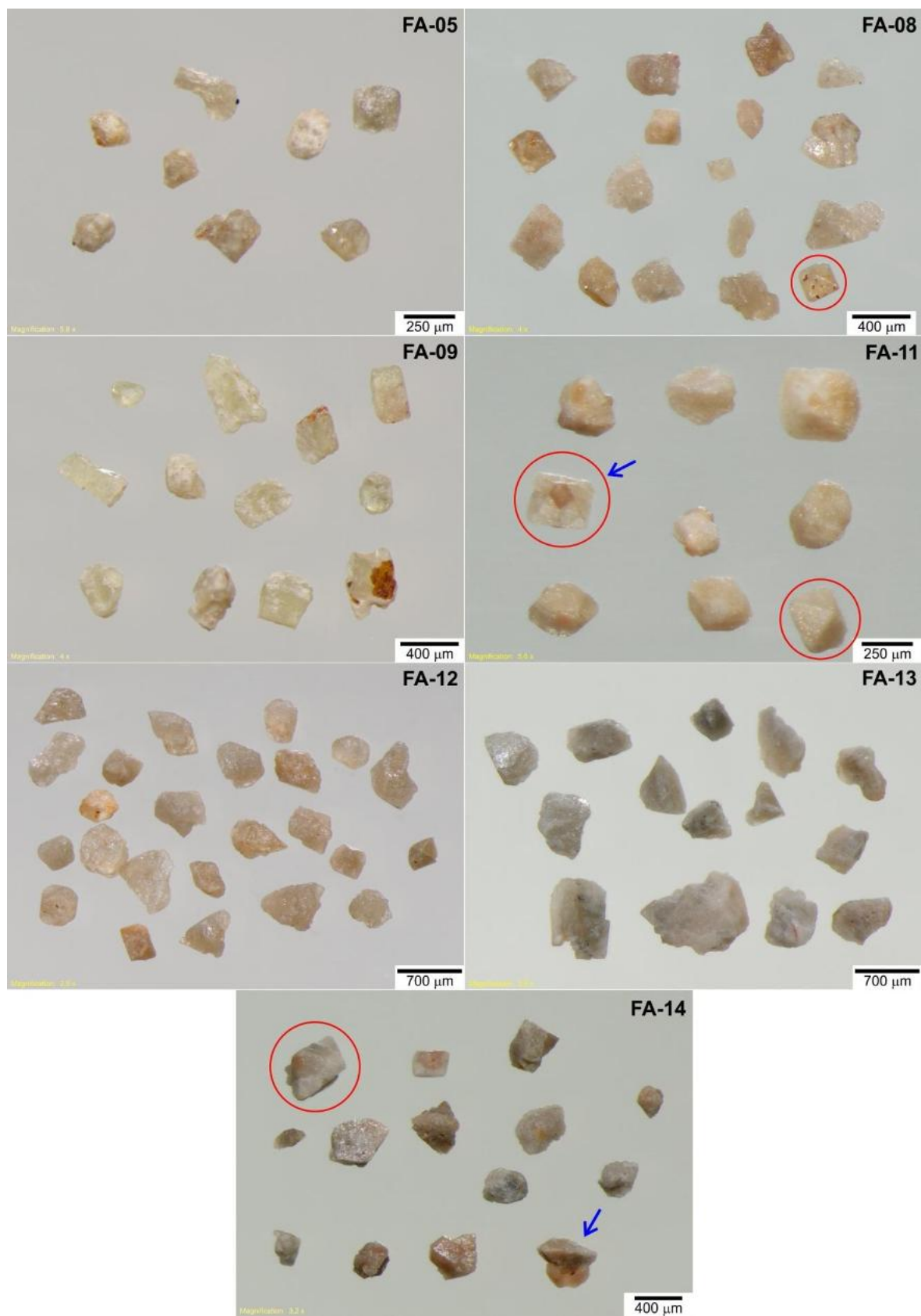


Figura 57 – Exemplos de grãos de xenotímio dos pegmatitos estudados onde é possível observar as variações de cores entre bege, amarelo e cinza. Grãos marcados com um círculo vermelho indicam a presença de seção basal quadrada característica deste mineral e a seta azul indica cristais com intercrescimento com zircão.

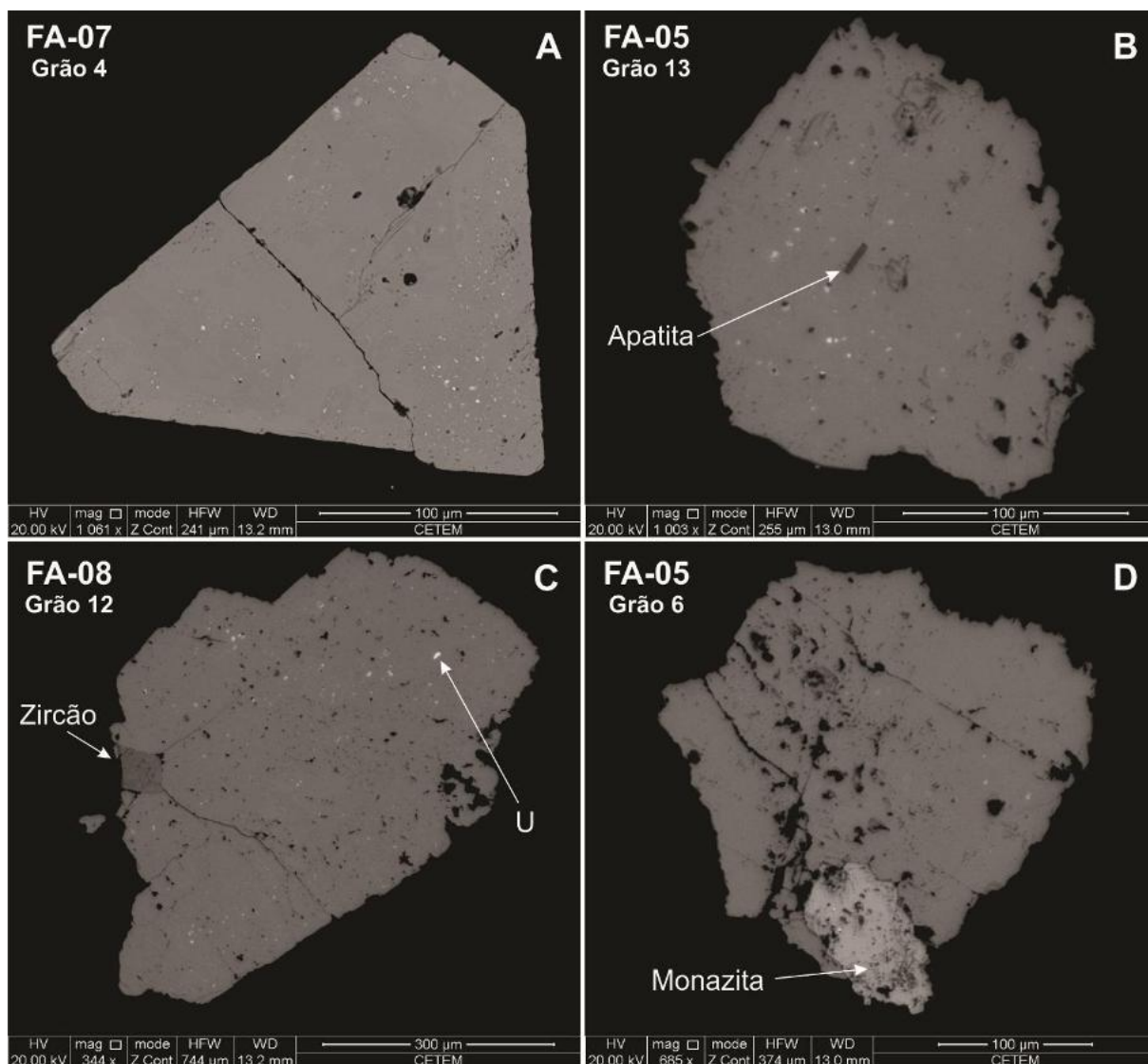


Figura 58 – Exemplos de grãos de xenotímio dos pegmatitos estudados onde é possível observar as diversas microinclusões de minerais de Th e/ou U (pontos claros nas imagens a-d), apatita (b), associação com zircão (c) e monazita (d).

10.6.3 Química mineral por MEV/EDS

Para as análises de química mineral semiquantitativa por EDS foi utilizado o método de deconvolução dos picos de energia para confirmação dos elementos presentes. Através desse método é possível observar quais os elementos terras raras estão presentes, mesmo quando há sobreposição das raia de energia. Um exemplo de aplicação do método é apresentado na figura 60.

As inclusões de minerais de U, Th e Si citadas no item anterior são provavelmente de torita, uraninita e/ou coffinita. Segundo Hetherington & Harlov (2008) a ocorrência desse tipo de inclusões minerais pode estar associada a um autometassomatismo, no qual os próprios fluidos do pegmatito dissolveriam e

reprecipitariam o xenotímio (fase precoce) separando o U, Th e Si para formação das fases citadas e cristalizando uma matriz de xenotímio mais “limpa”. Devido às limitações da técnica analítica aqui utilizada, esse processo não pode ser comprovado e, por esse motivo, foram definidas como áreas de análise regiões preferencialmente próximas ao centro do grão, com tons de cinza uniformes, refletindo uma composição mais homogênea e que apresentavam ausência de inclusões minerais. Essas regiões refletem então uma composição química mais próxima daquela considerada como primária e original dos grãos de xenotímio.

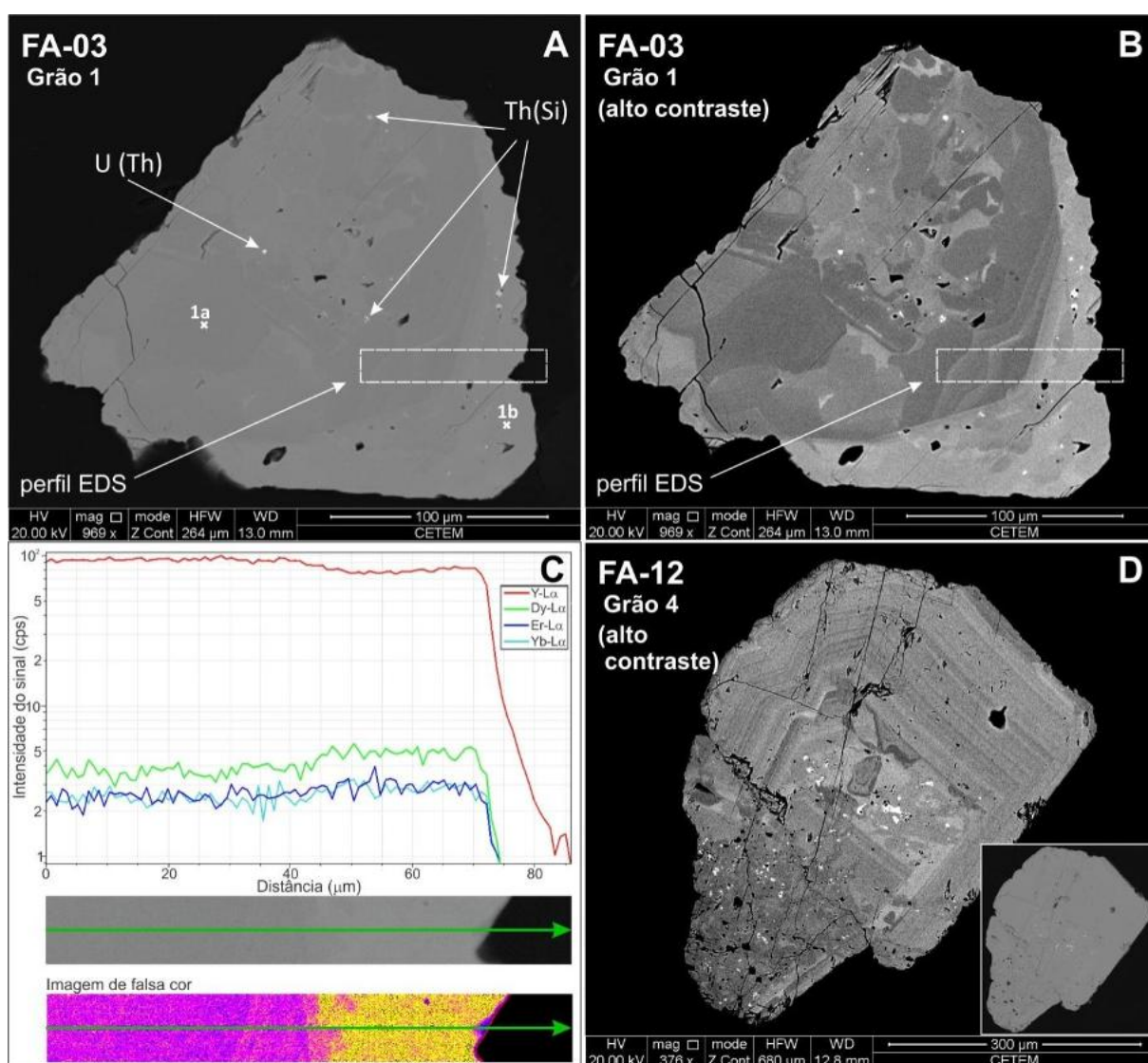


Figura 59 – Exemplos de grãos de xenotímio com zonamento químico das amostras FA-03 e FA-12. a) Grão de xenotímio da amostra FA-03 com indicação das inclusões presentes. b) Mesma imagem anterior com contraste aumentado de modo a realçar o zonamento químico presente. c) Perfil de análises EDS da região indicada em a e b (explicação no texto). d) Grão de xenotímio da amostra FA-12, com contraste aumentado de modo a realçar o zonamento químico oscilatório presente. No detalhe mesmo grão com contraste original. Pontos claros são inclusões de minerais de U/Th.

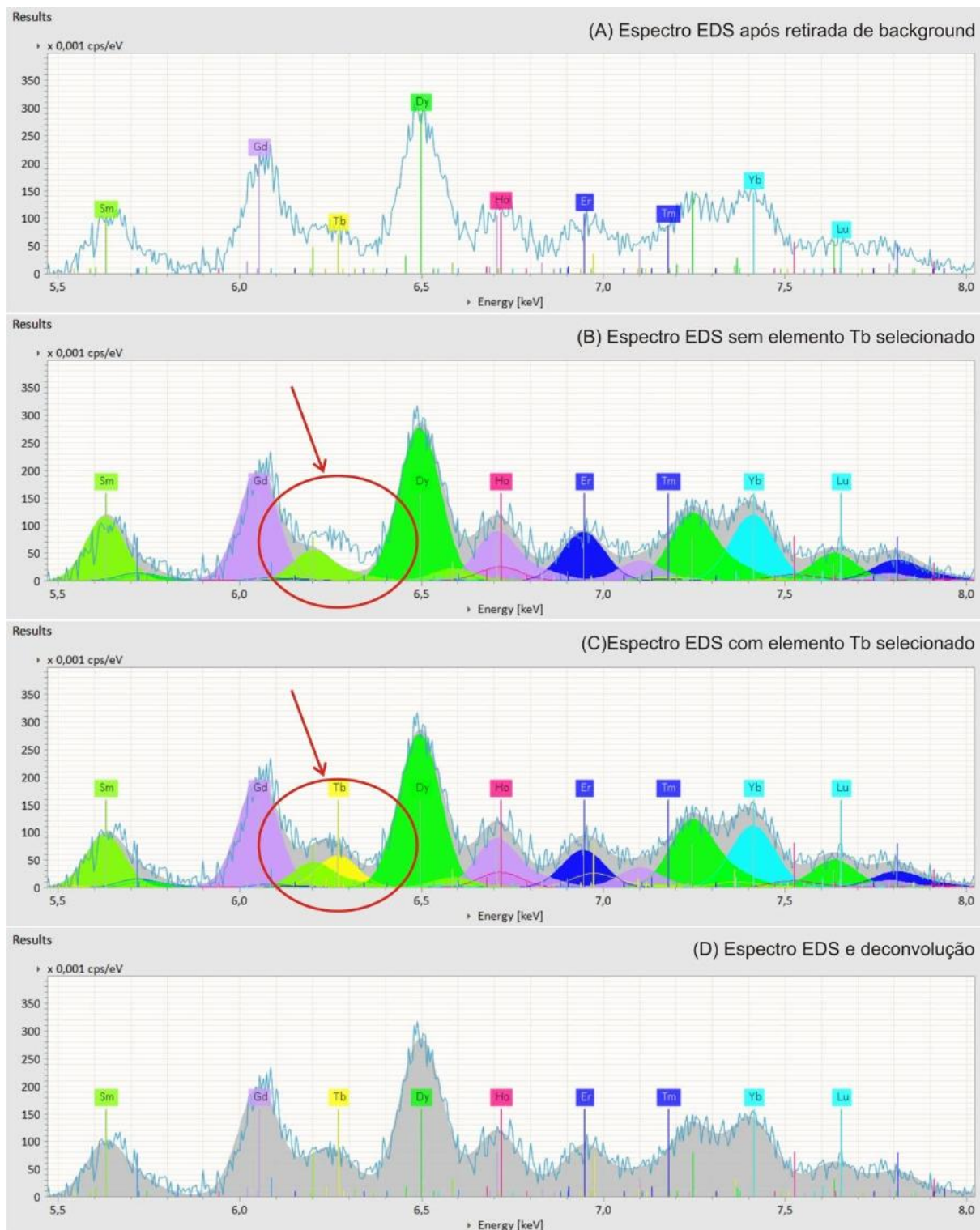


Figura 60 – Espectro de EDS de um grão de xenotímio na região de 2,5 a 8,0 keV (região dos picos de energia $L\alpha$ dos elementos terras raras Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) onde é possível observar a aplicação do método de deconvolução para confirmação dos elementos presentes. Em (A) espectro EDS original (correção do background já aplicada) com as raies de energia dos elementos terras raras indicadas; (B) e (C) espectro com a identificação dos elementos presentes, sem Tb e com Tb selecionado, respectivamente; (D) espectro EDS original e área deconvoluída (em cinza) mostrando uma boa relação entre o espectro obtido e o calculado onde foi confirmada a presença de Tb na análise.

O xenotímio presente na Província Pegmatítica de São João del Rei apresenta uma composição rica em Y (42,2 a 55,6% em peso de Y_2O_3) e elementos terras raras pesados (ETRP entre 4,9 e 15,5% em peso de óxidos), mas também pode apresentar teores importantes de alguns elementos terras raras leves (ETRL entre 0,4 e 10,2% em peso de óxidos). Devido aos altos teores de Y encontrados, o termo xenotímio será utilizado aqui como sinônimo do xenotímio-(Y). Os teores de P variaram de 34,1 a 37,4% (em peso de P_2O_5) e as principais substituições encontradas foram com Si, Th, U, Pb e Ca, que ocorrem de forma aleatória entre os grãos analisados (Tab. 28 e Anexo IX). Analisando a distribuição dos grupos de elementos acima citados entre os corpos estudados, os pegmatitos que intrudem o ortogneisse Cassiterita apresentam o maior conteúdo de ETRP, enquanto o pegmatito associado aos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes os maiores teores de ETRL. Os outros corpos apresentam valores intermediários, porém geralmente mais enriquecidos em ETRP.

Em relação à distribuição dos ETRP ocorre predomínio do Dy, seguido pelo Er e Yb em proporções semelhantes e, subordinadamente, com Tb, Ho, Tm e Lu (Fig. 61). Esses últimos elementos foram identificados em quase todas as amostras analisadas e perfazem até 3% do total de ETRP em uma amostra. Cabe destacar que as amostras FA-03 (pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado) e FA-05 (pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis) não apresentaram Er em sua composição e proporcionalmente possuem mais Ho. Ressalta-se, ainda, que a amostra FA-10 (pegmatito intrusivo no filito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes) apresentou uma predominância de Dy e Tb (até 65% e 15% do total de ETRP, respectivamente), bem como valores mais baixos de Ho, Er e Yb e ausência de Tm e Lu (Fig. 61). Os corpos pegmatíticos intrusivos no ortogneisse Cassiterita (amostras FA-13 e FA-14) apresentam o xenotímio com a composição mais homogênea em relação aos ETRP, possuindo o menor teor de Dy (máximo de 4,4% em peso de Dy_2O_3) e o maior de Er (até 3,9% em peso de Er_2O_3) entre os corpos analisados.

Tabela 28 – Análises de química mineral semiquantitativa por EDS de grãos representativos de xenotímio da Província Pegmatítica de São João del Rei. Tabela completa dos dados é apresentada no Anexo IX.

Rocha hospedeira dos pegmatitos	Metadiorito		Metagranitoide			¹ SMVS Rio das Mortes				Ortognaisse Cassiterita		
	Brumado		Ritápolis			Filito		Anfibolito				
	FA03	FA03	FA05	FA07	FA08	FA10	FA10	FA11	FA12	FA13	FA14	FA14T
Nº da análise	3	9	2	15	10	2	7	8	4	8	4	2
<i>Óxidos (% em peso)</i>												
SiO ₂	0,3	0,7	0,8	0,7	0,6	0,8	0,3	0,6	0,5	0,8	0,8	0,6
P ₂ O ₅	36,5	36,2	36,4	36,1	36,5	35,4	36,0	36,1	36,1	36,5	36,3	37,2
CaO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Y ₂ O ₃	49,3	48,1	46,5	45,8	45,3	45,5	45,5	48,9	47,1	48,3	48,2	51,4
Nd ₂ O ₃	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0
Sm ₂ O ₃	1,1	1,4	1,3	0,5	0,7	1,5	1,9	1,0	0,9	0,3	0,4	0,4
Gd ₂ O ₃	3,2	3,8	3,9	1,8	2,4	5,6	5,9	2,5	2,5	1,6	1,5	1,4
Tb ₂ O ₃	0,8	1,2	1,3	0,7	0,8	1,7	1,7	0,7	0,7	0,4	0,5	0,5
Dy ₂ O ₃	4,6	5,4	5,8	4,9	5,1	6,5	7,0	3,8	4,8	3,8	4,0	3,2
Ho ₂ O ₃	0,4	0,5	0,6	1,1	0,9	0,6	0,5	0,7	1,0	1,0	0,9	0,7
Er ₂ O ₃	1,6	1,2	1,3	3,4	2,8	1,0	0,9	1,9	3,1	3,4	3,6	2,1
Tm ₂ O ₃	0,2	0,0	0,0	0,5	0,4	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2
Yb ₂ O ₃	2,4	1,4	1,7	3,7	3,1	0,6	0,5	2,3	2,6	3,1	3,2	2,9
Lu ₂ O ₃	0,3	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,3	0,4
PbO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ThO ₂	0,0	0,1	0,0	0,7	0,6	0,5	0,0	0,6	0,8	0,6	0,5	0,0
UO ₂	0,0	0,3	0,9	0,9	0,9	0,5	0,0	0,8	0,4	0,6	0,5	0,0
Total (calc)	100,7	100,5	100,6	101,2	101,1	100,5	100,5	100,7	101,0	101,1	101,1	100,8
<i>Proporção atômica (4 oxigênios)</i>												
Si	0,011	0,022	0,026	0,022	0,018	0,027	0,010	0,019	0,017	0,026	0,025	0,018
P	0,999	1,000	1,008	1,003	1,011	0,996	1,002	0,997	1,000	1,004	1,001	1,006
Ca	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Y	0,849	0,835	0,808	0,801	0,788	0,804	0,797	0,848	0,820	0,835	0,836	0,873
Nd	0,000	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,005	0,004	0,000	0,000	0,000
Sm	0,012	0,016	0,015	0,006	0,008	0,017	0,021	0,011	0,010	0,004	0,004	0,004
Gd	0,035	0,041	0,042	0,020	0,026	0,062	0,065	0,027	0,027	0,017	0,016	0,015
Tb	0,009	0,013	0,014	0,008	0,009	0,018	0,018	0,008	0,008	0,004	0,005	0,005
Dy	0,048	0,057	0,061	0,052	0,054	0,069	0,074	0,040	0,050	0,040	0,042	0,033
Ho	0,004	0,006	0,006	0,011	0,010	0,006	0,005	0,007	0,011	0,010	0,010	0,007
Er	0,017	0,012	0,013	0,035	0,029	0,010	0,009	0,019	0,032	0,035	0,037	0,021
Tm	0,002	0,000	0,000	0,005	0,004	0,000	0,000	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002
Yb	0,024	0,014	0,017	0,037	0,031	0,006	0,005	0,022	0,026	0,031	0,032	0,028
Lu	0,003	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,003	0,004
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Th	0,000	0,001	0,000	0,005	0,005	0,004	0,000	0,004	0,006	0,004	0,004	0,000
U	0,000	0,002	0,006	0,006	0,006	0,004	0,000	0,006	0,003	0,005	0,004	0,000
<i>Teores dos elementos terras raras e razão Y/elementos terras raras (mol% normalizado)</i>												
² ETRL	4,3	5,5	5,5	2,6	3,4	7,5	8,1	3,9	3,7	1,9	1,9	1,8
³ ETRP	10,3	9,7	10,6	14,5	13,3	10,3	10,5	9,8	12,4	12,3	12,9	9,9
Y+ETRP	59,6	57,8	57,0	60,3	58,5	55,8	56,0	58,7	59,5	60,6	61,1	61,3
100Y/(ETR+Y)	84,8	83,8	82,6	81,7	81,8	80,7	79,9	85,5	82,9	85,1	84,6	88,1
<i>Membros finais (proporção molar)</i>												
(Th,U,Pb)SiO ₄	0,0%	0,3%	0,6%	1,1%	1,6%	0,7%	0,0%	1,0%	0,8%	0,9%	0,8%	0,0%
Ca(Th,U,Pb)(PO ₄) ₂	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
(La-Gd)PO ₄	4,6%	6,0%	6,1%	2,9%	3,8%	8,3%	9,0%	4,3%	4,1%	2,1%	2,1%	1,9%
(Tb-Lu)PO ₄	10,5%	10,1%	11,2%	15,1%	14,0%	10,9%	11,1%	10,0%	12,8%	12,7%	13,2%	10,0%
YPO ₄	84,8%	83,6%	82,1%	80,8%	80,5%	80,0%	79,9%	84,6%	82,2%	84,3%	83,9%	88,1%

¹SMVS refere-se à Sequência Metavulcano-Sedimentar

²ETRL - elementos terras raras leves (La-Gd)

³ETRP - elementos terras raras pesados (Tb-Lu)

*Dados obtidos por MEV/EDS

Em relação aos ETRL apenas Nd, Sm e Gd foram observados na composição do xenotímio. Os teores mais elevados foram encontrados na amostra do pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Morte (FA-10, até 10,2% em peso de ETRL em óxidos) e os menores nas amostras dos pegmatitos intrusivos no ortognaisse Cassiterita (FA-13 e FA-14, até 3% em peso de ETRL em óxidos). Em geral, o Gd é o elemento principal dentre os ETRL chegando a representar 70% do total desses elementos, enquanto o Sm representa de 15 a 30% desse total e o Nd entre 5 a 10%, porém este último pode estar ausente, principalmente nas amostras dos pegmatitos associados ao ortognaisse Cassiterita (Fig. 61). A exceção é a amostra FA-03 (grão zonado), onde o núcleo analisado apresentou Gd como único ETRL presente.

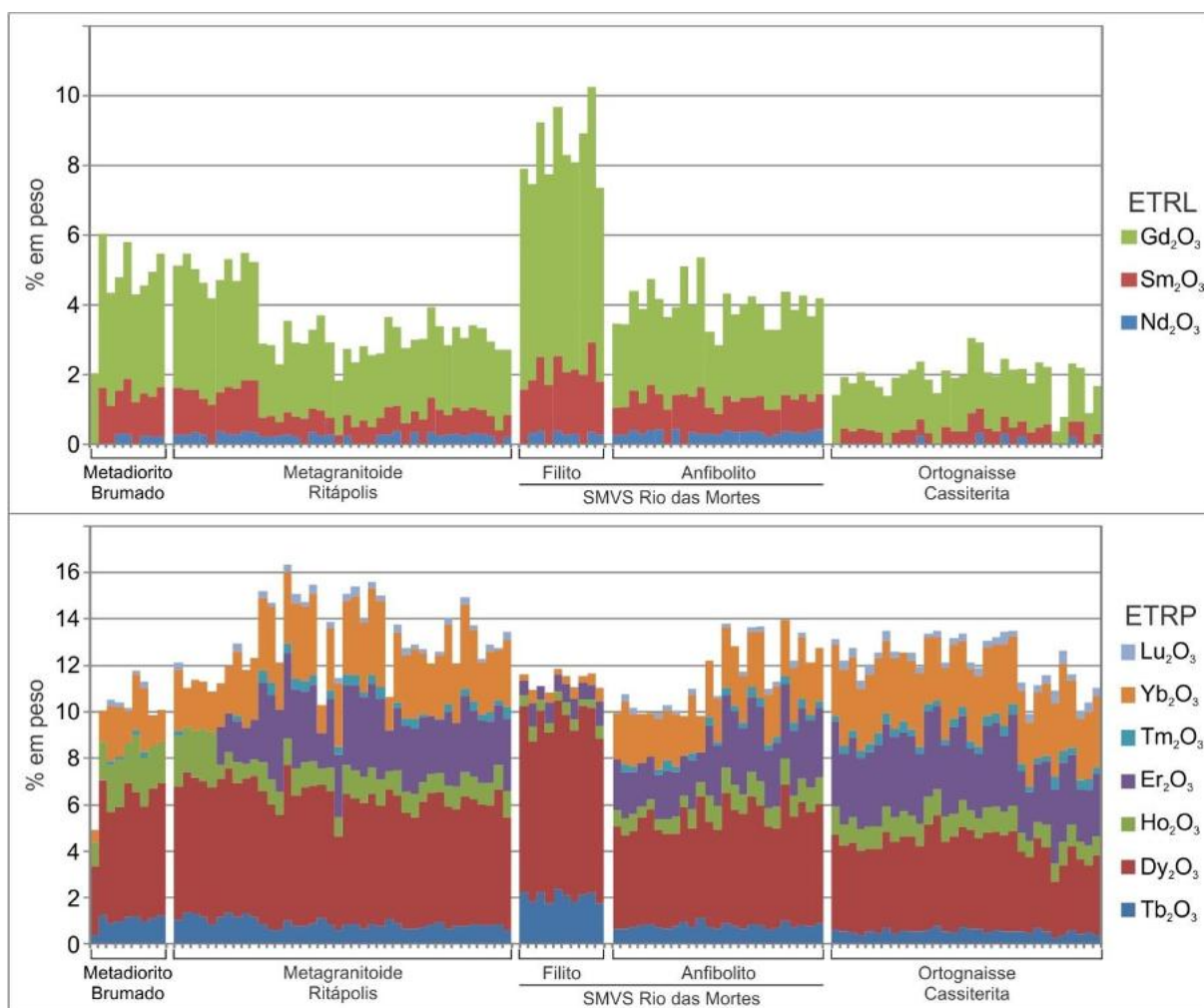


Figura 61 – Distribuição em % em peso dos elementos terras raras leves (ETRL) e pesados (ETRP) nos grãos de xenotímio da Província Pegmatítica de São João del Rei. Dados obtidos através de análises semiquantitativas de MEV/EDS. As análises estão agrupadas segundo a rocha encaixante do pegmatito.

Em relação aos elementos que ocorrem substituindo o Y e o P na estrutura do xenotímio, os mais importantes são o Si, o U e o Th. O Pb quando ocorre está associado ao U e/ou Th, e provavelmente trata-se de chumbo radiogênico. A entrada desses elementos obedece a dois mecanismos principais de substituição (Gramaccioli & Segalstad, 1978; Van Emden *et al.*, 1997): $(\text{Th}, \text{U})^{4+} + \text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2 \text{ETR}^{3+}$ e $(\text{Th}, \text{U})^{4+} + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{ETR}^{3+} + \text{P}^{5+}$, sendo que esta última substituição foi considerada como a mais importante nas amostras analisadas. O cálcio, incorporado através do primeiro mecanismo, ocorre de forma muito restrita, com teores abaixo de 0,3% em peso de CaO, sendo o mesmo encontrado apenas nos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis ou no ortognaisse Cassiterita. O SiO₂ foi identificado em todas as amostras analisadas com teores de até 2,5% em peso nos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, mas em geral seus teores ficam abaixo de 1,5% em peso. Em relação aos teores observados de U-Th(Pb), a amostra FA-03 (pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado) não apresentou Pb e o U predomina em relação ao Th, enquanto as amostras relativas aos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis (FA-05, FA-07, FA-08) apresentaram os maiores teores dos três elementos, porém em concentrações muito variadas.

O cálculo dos membros finais (Tab. 28 e Anexo IX) xenotímio (YPO₄), fosfato de terras raras pesados [(Tb-Lu)PO₄], fosfato de terras raras leves [(La-Gd)PO₄], brabantita [Ca(Th,U,Pb)(PO₄)₂] e huttonita [(Th,U,Pb)SiO₄] é baseado nos trabalhos de Förster (1998) e de Pyle *et al.* (2001). Todos os corpos estudados apresentaram altos teores do membro xenotímio (entre 76,0 e 88,6% mol) e teores constantes de fosfatos de terras raras pesados entre 9,8 a 16,4% mol (Fig. 62). Os teores de fosfatos de terras raras leves variaram entre os corpos estudados sendo maiores (até 11,5% mol) nos grãos provenientes do pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, enquanto nos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado, no metagranitoide Ritápolis e nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes variam entre 3,9 e 5,5% mol (média dos valores). Os menores valores de até 0,4% mol (com média de 2,1% mol) foram encontrados nos grãos de xenotímio dos pegmatitos intrusivos no ortognaisse Cassiterita. Os teores de huttonita estão entre 0 e 4,9% mol, mas com uma média baixa (0,9% mol) devido à distribuição irregular do Th, U e Pb nas amostras. Cabe

ressaltar que, a presença das muitas inclusões de minerais de Th e/ou U observadas nos grãos estudados (Figs. 58 e 59), é um forte indício da exsolução desses elementos da estrutura do xenotímio. Os teores do membro brabantita são negligenciáveis devido ao baixo conteúdo de cálcio apresentado pelas amostras analisadas. Na amostra relativa ao pegmatito intrusivo nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-10), estes elementos estão geralmente ausentes, enquanto nas amostras dos pegmatitos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-11 e FA-12) foram encontrados os maiores teores pontuais entre todas as amostras (2,7%, 2,3% e 1,1% em peso de UO_2 , ThO_2 e PbO respectivamente). As amostras do pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita também apresentaram teores variados dos três elementos, porém em concentrações menores do que aquelas encontradas nos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis, assim como sua ausência em vários dos grãos analisados.

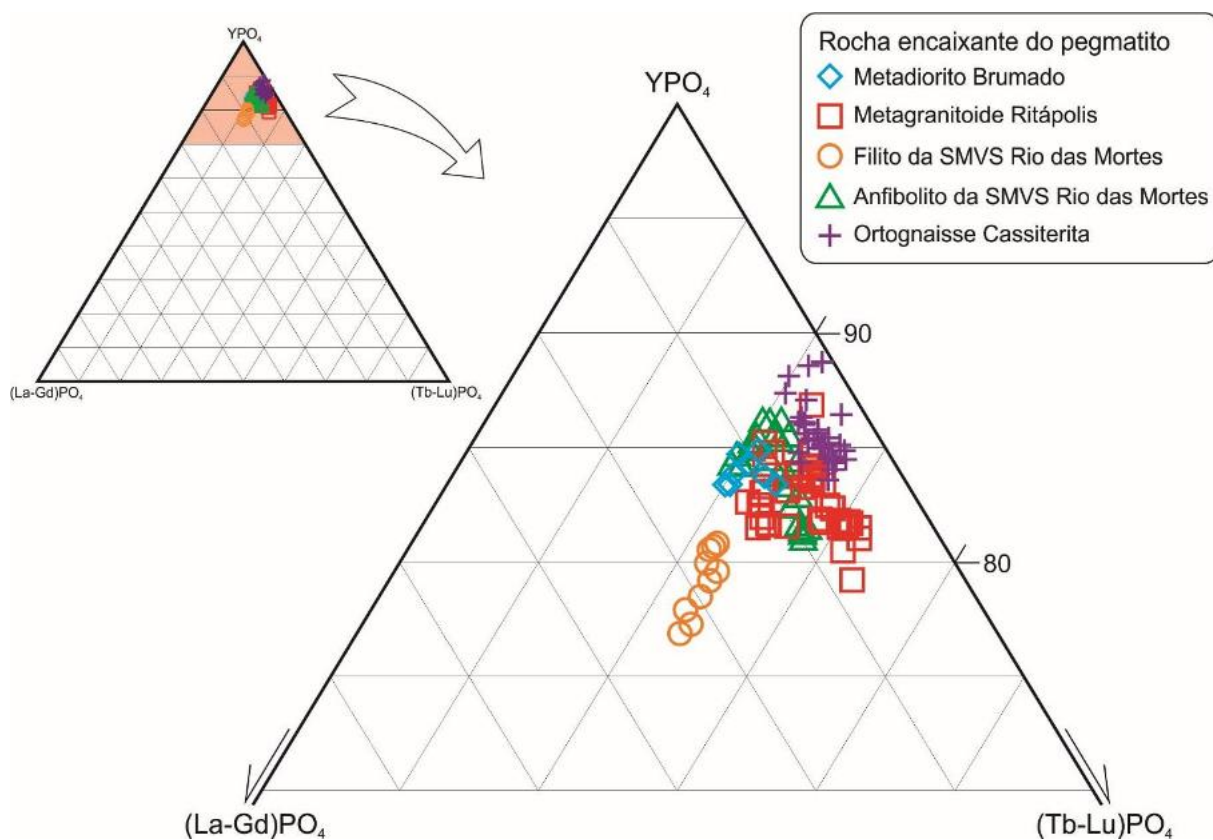


Figura 62 – Diagrama ternário dos membros finais YPO_4 - $(\text{La-Gd})\text{PO}_4$ - $(\text{Tb-Lu})\text{PO}_4$ referente aos grãos de xenotímio dos diferentes corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. SMVS – sequência metavulcano-sedimentar.

Os dados dos elementos terras raras obtidos para cada um dos corpos foram ainda normalizados em relação ao condrito CI (Evensen *et al.* 1978 e Taylor & McClennan, 1985) e seus resultados são apresentados na figura 63, onde é possível observar que o xenotímio, em geral, mostra um enriquecimento em todos elementos terras raras identificados em relação ao condrito.

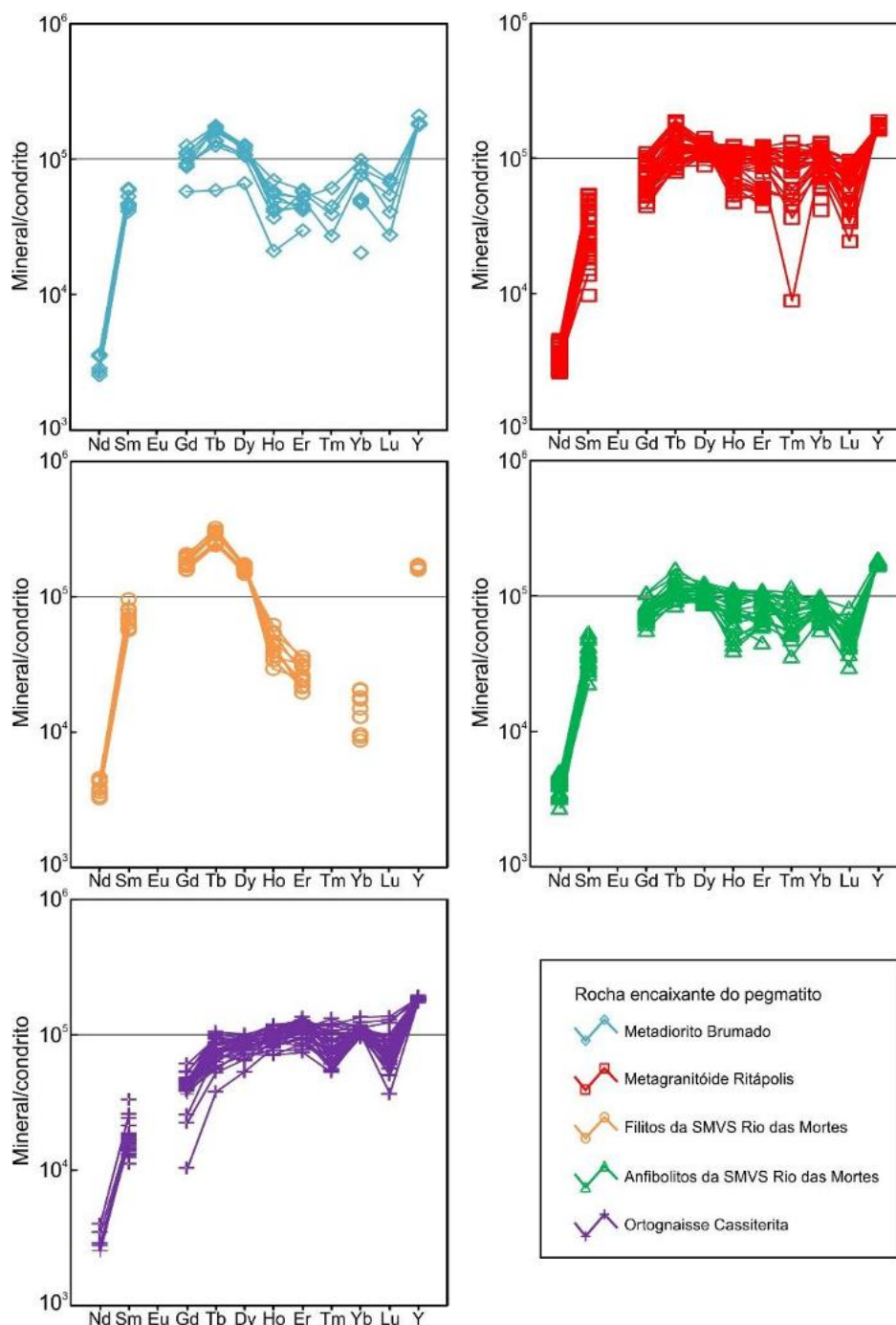


Figura 63 – Concentrações dos elementos terras raras (Nd-Lu) e Y dos grãos de xenotímio dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei intrusivos em diferentes rochas encaixantes. Normalização em relação ao condrito CI de Evensen *et al.* (1978) e Taylor & McClennan (1985).

Os pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado, no metagranitoide Ritápolis e nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentam as mesmas tendências, com um enriquecimento mais acentuado do Tb e uma leve queda em direção aos elementos mais pesados. O xenotímio presente nos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentou um enriquecimento ainda mais alto no Tb e é marcado por uma queda acentuada no Yb, ausência de Tm e Lu e, em relação aos elementos terras raras leves, apresentou o maior enriquecimento em Sm, porém com a mesma razão de Nd encontrada nos outros corpos estudados. O xenotímio dos corpos pegmatíticos intrusivos no ortogneisse Cassiterita mostrou um comportamento diverso dos outros pegmatitos, com um aumento constante dos teores em relação ao condrito em direção aos elementos terras raras mais pesados, sem mostrar o enriquecimento em Tb característico dos outros corpos. Apresenta ainda teores menores de Gd, maiores de Yb e a soma dos ETR leves Nd e Sm é menor que a encontrada nos outros corpos da província.

10.7 Minerais do grupo da columbita-euxenita (columbita/tantalita)

A columbita e a tantalita são óxidos ortorrômbicos com fórmula química $A^{2+}B_2O_6$, onde o sítio A pode ser ocupado por Fe, Mg, Mn ou Ca e o sítio B por Nb ou Ta. Fazem parte do subgrupo da columbita onde as espécies mais comuns são columbita-(Fe) ($Fe^{2+}Nb_2O_6$), columbita-(Mn) ($Mn^{2+}Nb_2O_6$), tantalita-(Fe) ($Fe^{2+}Ta_2O_6$) e tantalita-(Mn) ($Mn^{2+}Ta_2O_6$).

10.7.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

Columbita/tantalita é um conjunto de minerais opacos que possuem cor variando de cinza a preta, brilho metálico fosco nas faces alteradas e intenso nas faces frescas, bem como nas fraturas recentes. Ocorrem em cristais euédricos, em fragmentos tabulares achatados de formato retangular, sendo comum a presença de terminações típicas em ponta de flecha, assim como a presença de faces estriadas paralelas ao comprimento do cristal (Fig. 64). Seu tamanho varia amplamente, podendo ultrapassar 3 mm no seu eixo maior, porém predominam grãos de tamanho inferior a 500 μm , sendo que os cristais alongados possuem, normalmente, razão de

comprimento por largura de 4:1. Ocorre nas frações 0,5 A e 0,6 A, podendo ser encontrada na fração 0,8 A e, muito raramente, na 1,0 A. Não possui inclusões aparentes, mas geralmente está associada a um agregado de cor branca ou amarela que mascara um pouco seu brilho e sua cor original. Esse agregado pode corresponder tanto a quartzo e/ou feldspato, quanto a um mineral de alteração do grupo da microlita, este caracterizado por microsonda Raman. Nas amostras FA-02, FA-03, FA-05, FA-06, FA-07, FA-08, FA-09, FA-11, FA-12, a columbita/tantalita é o mineral mais importante da fração 0,5 A e da grande maioria das frações 0,6 A, enquanto na amostra FA-10, varia de um mineral comum até raro. Cabe destacar que nas amostras FA-13 e FA-14 não foram encontrados grãos de columbita/tantalita.

10.7.2 Microscopia eletrônica de varredura

A figura 65 exemplifica a complexidade dos grãos de columbita/tantalita que ocorrem nos diferentes pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei. Os grãos geralmente apresentam mais de uma fase mineral do grupo da columbita-euxenita [columbita-(Fe), columbita-(Mn), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn)] e/ou do supergrupo do pirocloro (pirocloro, microlita, plumbopirocloro e plumbomicrolita). Essa pré-classificação das fases presentes foi realizada através de dados semiquantitativos de química mineral obtidos por EDS, que apontaram ainda a presença de Sn, Ti, U, Ba, Na, Sc e K. Uma classificação mais apurada pode indicar a presença de outros minerais mais específicos como oxiestanomicrolita, hidrokenomicrolita, minerais do grupo da samarskita ou do grupo da wodginita, entre outros.

10.8 Minerais do grupo da microlita (microlita)

Os minerais aqui descritos informalmente como “microlita” fazem parte do grupo da microlita, supergrupo pirocloro que tem fórmula geral $A_{2-m}B_2X_{6-w}Y_{1-n}$ onde o sítio *B* pode ser ocupado por M^{4+} , M^{5+} ou M^{6+} . Para o grupo da microlita $M^{5+} > M^{4+}$ e $M^{5+} > M^{6+}$ e o Ta é o cátion M^{5+} dominante (Atencio *et al.*, 2010).



Figura 64 – Exemplos de grãos de columbita/tantalita provenientes dos pegmatitos estudados. Hábito tabular com terminação em ponta de flecha é comum de ser encontrado (círculo vermelho). Coloração preta e brilho metálico intenso podem ser melhor observados nas amostras FA-07 e FA-11.

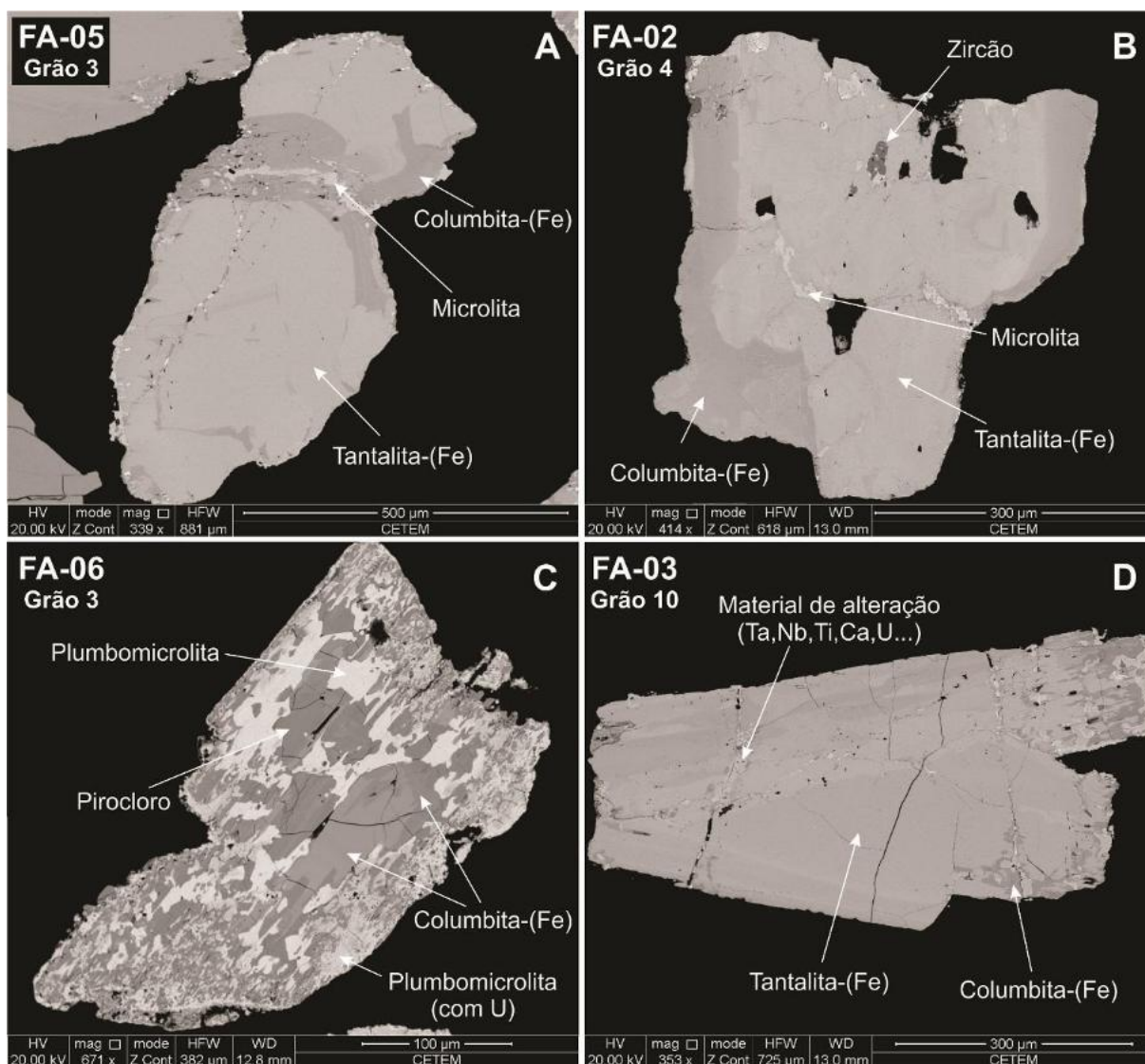


Figura 65 – Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por microscopia eletrônica de varredura exemplificando os diferentes grãos de columbita/tantalita provenientes dos pegmatitos estudados. Nas imagens é possível observar o intercrescimento de diferentes fases de niobo-tantalatos, assim como material secundário preenchendo fraturas.

10.8.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

A microlita apresenta brilho desde vítreo a resinoso, seus grãos são translúcidos com coloração amarelada (ou tons semelhantes) e, mais raramente, rosada e esverdeada na fração 0,5 A. Ocorre principalmente a partir da fração 1,0 A, sendo um dos principais minerais presentes nas frações 1,8 A e não atraível, porém alguns grãos podem ser encontrados desde a fração 0,5 A, como no caso das amostras FA-02 e FA-06. Seus grãos são predominantemente anédricos (fragmentos), podendo também ser encontrada em grãos octaédricos, sendo que pode alcançar até 700 micrômetros de comprimento (Fig. 66). Os grãos de microlita encontrados na amostra FA-13 foram caracterizados por MEV/EDS e são

interpretados como um resultado de substituição em grãos de columbita-tantalita, mantendo o hábito primário tabular desses minerais (pseudomorfos). Pode estar associada à alteração da columbita-tantalita, formando uma massa amarelada ao redor da mesma, bem como seus grãos podem se alterar para cristais de tonalidade bege clara, sendo que a grande maioria foi identificada através da microsonda Raman. Nas amostras FA-05, FA-12 e FA-13, a microlita é o mineral mais importante das frações 1,8 A e/ou não atraível, enquanto nas amostras FA-02, FA-03, FA-06, FA-07, FA-08 e FA-10 ela varia de comum (ocorrendo com proporção inferior a 20%) até rara. Destaca-se que a microlita está ausente dos concentrados FA-09, FA-11 e FA-14.

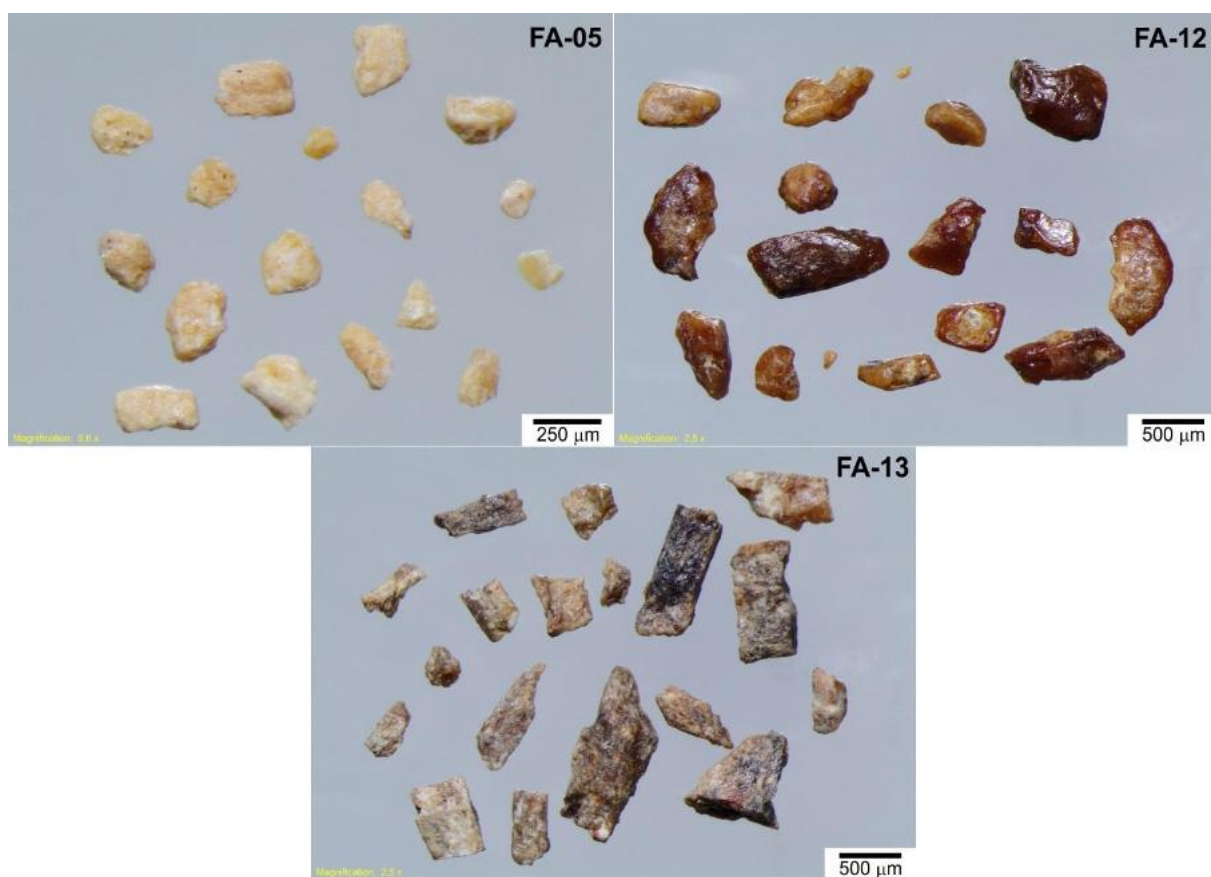


Figura 66 – Exemplos de grãos de microlita encontrados nos pegmatitos estudados. Os grãos são geralmente anédricos e apresentam cores entre o amarelo e vermelho. O brilho resinoso pode ser observado na amostra FA-12.

10.9 Zircão

O zircão (ZrSiO_4) é um ortossilicato de estrutura tetragonal, comumente apresenta Hf como substituição ao Zr formando, inclusive, solução sólida completa com o mineral hafnã (HfSiO_4). Pode ainda apresentar diversos outros elementos

como traço, sendo os mais comuns os elementos terras raras, P, U e Th (Hoskin & Schaltegger, 2003).

10.9.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

O zircão apresenta brilho desde vítreo até adamantino, varia de transparente (raros e pequenos grãos) a translúcido, seus cristais são normalmente tetragonais bipiramidais e pode ser encontrado em grãos de diversas cores, dentre as quais rosa pálido (quando fresco), amarelo, vermelho, cinza escuro, cinza claro, branco transparente e branco leitoso, quando metamictizado (Fig. 67). Ocorre a partir da fração 0,3 A, sendo um dos principais minerais presentes nas frações 1,8 A e não atraível. Em geral seus cristais são menores que 500 μm e apresentam forma euédrica (grãos tetragonais com seção quadrada ou retangular), porém é muito comum serem observados fragmentos tabulares envolvendo parte das faces dos cristais que podem atingir até 2 mm. Também é observado em agregados com crescimento paralelo ou em forma de leque e frequentemente ocorre intercrescido com o xenotímio. Nas amostras FA-07, FA-08, FA-09, FA-11, FA-12, FA-13 e FA-14, o zircão é o mineral mais importante das frações 1,8A e/ou não atraível, enquanto nas amostras FA-02, FA-03, FA-05, FA-06, FA-10 ele varia de comum (ocorrendo em proporção inferior a 20%) até raro. Zircão está presente em todos os concentrados.

10.10 Monazita

A monazita, assim como o xenotímio, é um fosfato de terras raras de fórmula química ETRPO_4 , onde preferencialmente ocorrem os elementos terra raras leves (La-Gd). Existem quatro espécies naturais segundo a composição química presente: monazita-(Ce) de composição $(\text{Ce},\text{La},\text{Nd})\text{PO}_4$ (a mais comum), monazita-(La) de composição $(\text{La},\text{Ce},\text{Nd})\text{PO}_4$, monazita-(Nd) de composição $(\text{Nd},\text{Ce})\text{PO}_4$ e monazita-(Sm) de composição $(\text{Sm},\text{Gd},\text{Ce})\text{PO}_4$. É comum ainda apresentar em sua composição Si, Th e U.

10.10.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

A monazita é um mineral transparente a translúcido, que possui brilho variando desde vítreo a resinoso, coloração amarelada até esbranquiçada e que, geralmente,

encontra-se envolvida por uma capa de alteração branca com aspecto sacaroidal. Esta alteração implica que a parte interna do grão apresente cor amarelada e a parte externa esbranquiçada, estando este fenômeno associado a um processo de metamictização. É observada principalmente em fragmentos anédricos com fratura irregular ou conchoidal e, mais raramente, em cristais prismáticos tabulares com forma tipicamente achatada e tamanho normalmente inferior a 500 micrometros (Fig. 68). Está presente principalmente nas frações 0,6 A e 0,8 A, sendo que nas amostras FA-03, FA-07, FA-08, FA-11, FA-12, FA-13 e FA-14, a monazita é um dos minerais mais importantes da fração 0,8 A, enquanto nas amostras FA-02, FA-05, FA-06, FA-09 e FA-10, varia de um mineral comum até raro.



Figura 67 – Exemplos de grãos de zircão dos pegmatitos estudados. Em detalhe nas amostras FA-05 e FA-14, assim como nas amostras FA-07 (segunda imagem) e FA-11 é possível observar cristais de zircão transparentes (não metamicticos) que foram separados para estudos de geocronologia. Nas fotomicrografias é possível observar as diferentes cores apresentadas pelo zircão assim como seu hábito prismático característico alongado.

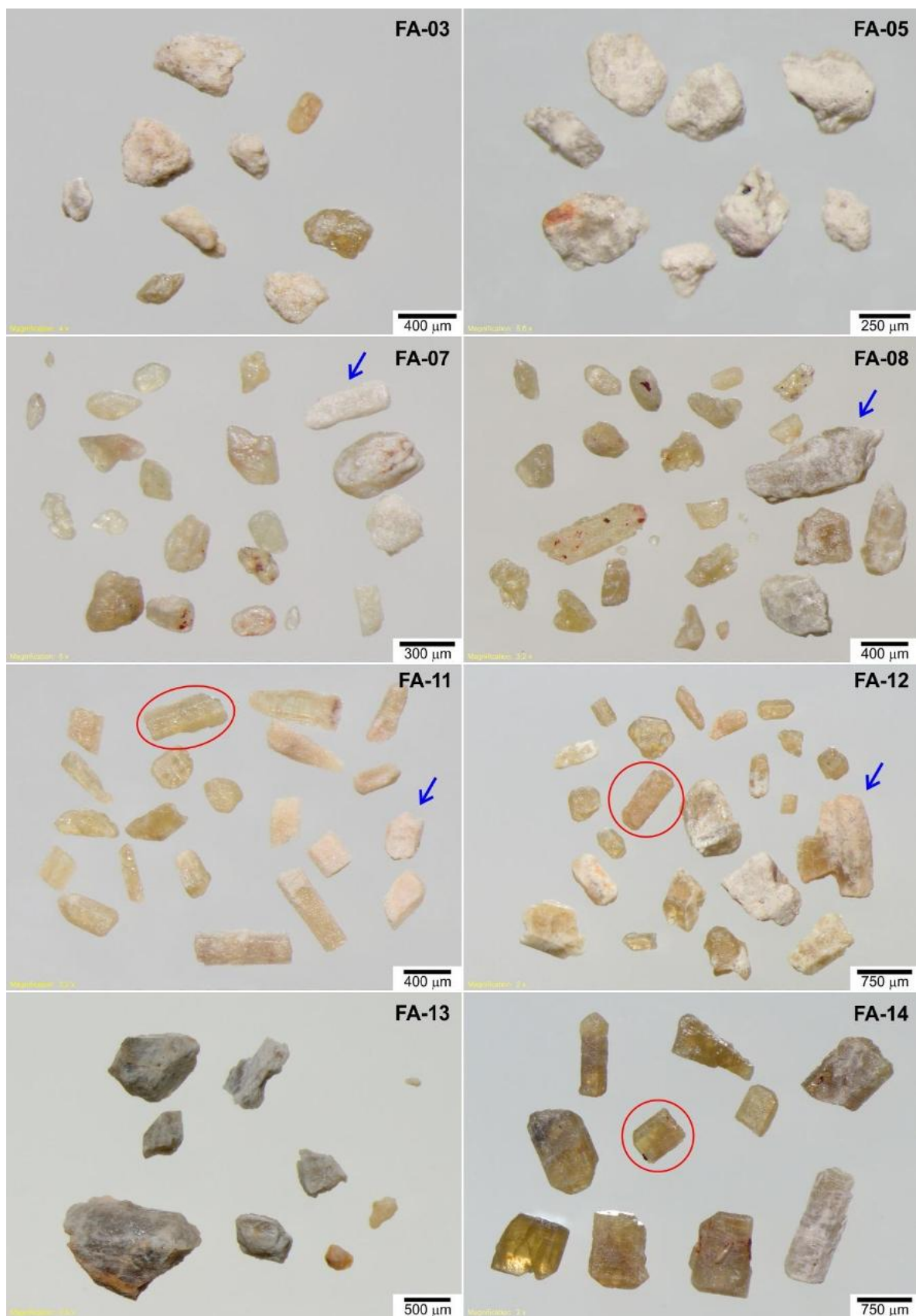


Figura 68 – Exemplos de grãos de monazita dos pegmatitos estudados. Grãos com capa de alteração esbranquiçada são a maioria nas amostras FA-03, FA-05 e FA-13, mas podem ser encontrados em outras amostras também (setas azuis). O hábito tabular achatado e a cor amarela característica podem ser observados nos grãos marcados com um círculo vermelho.

10.11 Outros minerais

10.11.1 Estereomicroscopia ótica de grãos

Os minerais descritos a seguir ocorrem com baixa frequência nos corpos estudados e serão apresentados em conjunto.

A clinozoisita [$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$] é um mineral que varia de transparente a translúcido, possui cor branca, brilho vítreo e tamanho normalmente inferior a 300 μm . Ocorre como fragmentos de cristais e pode apresentar faces estriadas e clivagem perfeita em uma direção (Fig. 69). A identificação inicial deste mineral ocorreu por meio da microsonda Raman. O epidoto é um mineral que varia de transparente a translúcido, apresenta brilho desde vítreo até resinoso e diversas cores, dentre as quais verde pálida, branca, amarela esverdeada e verde pistache (Fig. 69). Observado preferencialmente em grãos anédricos de tamanho menor que 100 micrômetros, o epidoto pode apresentar faces estriadas e ocorre nas frações 0,5 A e 0,6 A. Na amostra FA-07 o epidoto é o mineral mais importante da fração 0,6 A, enquanto nas amostras FA-03, FA-08, FA-13 e FA-14, chegam a compor 20% dessa fração. De forma contrastante, nas amostras FA-02, FA-05, FA-06, FA-09, FA-10, FA-11 e FA-12 tanto a clinozoisita quanto o epidoto são escassos ou raros, porém cabe destacar que ao menos um dos dois minerais do grupo do epidoto foi encontrado em cada concentrado estudado.

O rutilo (TiO_2 – sistema tetragonal) varia de opaco a transparente, mostra brilho desde submetálico até vítreo, cor vermelha sangue a preta, pode apresentar estrias na sua face e ocorre, predominantemente, em grãos anedrais ou alongados, e, mais raramente, em cristais tabulares tetraédricos com uma das pirâmides bem formada. Presente somente nas frações 1,8 A e não atraível das amostras FA-08, FA-11, FA-12. Foi identificado por microsonda Raman.

O anatásio (TiO_2 – sistema tetragonal) varia de translúcido a transparente, apresenta brilho submetálico, cor cinza escura a preta, passando pelo azul acinzentado e é observado principalmente em grãos anédricos (fragmentos) e, mais raramente, em prismas parcialmente preservados, onde é possível identificar somente uma das faces que é mais alongada que aquela do rutilo (Fig. 70). Presente somente nas frações 1,8 A e não atraível das amostras FA-07 e FA-09. Foi identificado por microsonda Raman.

A brookita (TiO_2 – sistema ortorrômbico) varia de transparente a translúcida, tem brilho vítreo, cor desde marrom esverdeada a preta e ocorre predominantemente em fragmentos anédricos (Fig. 70). Foi confirmada apenas na amostra FA-07. Sua identificação e diferenciação do anatásio foram efetuadas por microsonda Raman.

A estaurolita $[(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_9(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{20}(\text{O}, \text{OH})_4]$ varia de transparente a translúcida, possui brilho vítreo e cor castanha a vermelha, passando por tons amarronzados. Apresenta fratura irregular, é observada em grãos anédricos, possui raras inclusões de minerais opacos e é encontrada preferencialmente nas frações 0,6 A e 0,8 A. Foi encontrada somente nas amostras FA-09 e FA-10, sempre como um mineral traço e identificada por microsonda Raman.

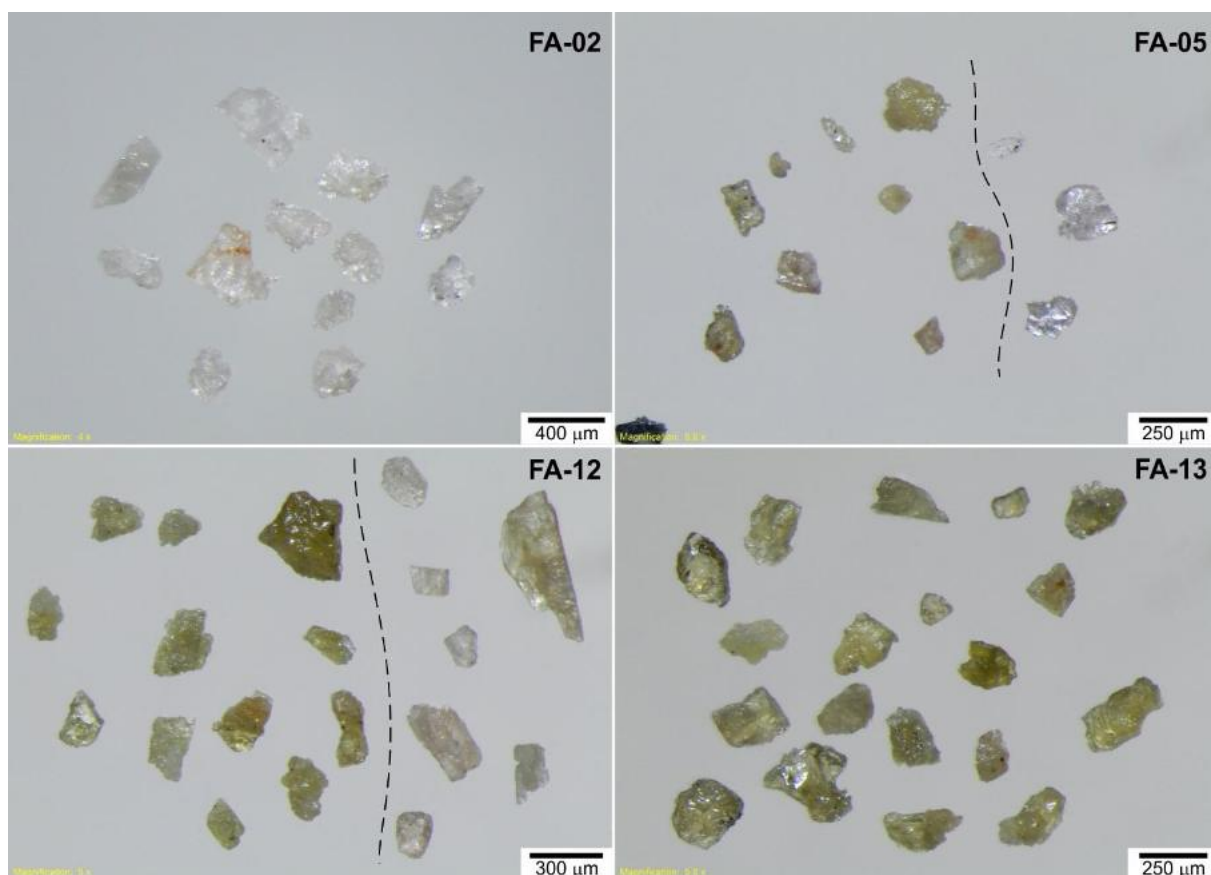


Figura 69 – Exemplo de grãos de clinozoisita e de epidoto encontrados nos pegmatitos estudados. A clinozoisita é incolor, enquanto o epidoto apresenta uma coloração amarelo esverdeada característica. A linha tracejada nas amostras FA-05 e FA-12 separa grãos de epidoto (lado esquerdo) de grãos de clinozoisita (lado direito). Fotomicrografia da amostra FA-02 é composta somente por clinozoisita, enquanto a da amostra FA-13 é composta apenas por epidoto.

A “apatita” [sem distinção entre as três espécies principais de F, OH e Cl, com formula química genérica $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$] apresenta brilho vítreo, varia de

incolor a branca leitosa e seus grãos tendem a ser euédricos e prismáticos alongados. Raramente encontrada nos concentrados e, quando presente, ocorre nas frações 1,8 A e não atraível das amostras FA-02, FA-07 e FA-08. Identificada por microsonda Raman.

A cianita (Al_2SiO_5) foi observada somente na amostra FA-11 e apresenta brilho desde vítreo a resinoso, é transparente, possui cor branca e aspecto tabular, parecendo um tablete alongado segundo uma direção preferencial. Foi identificada por microsonda Raman.

A “turmalina” [na verdade um grupo de minerais com fórmula química genérica $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Li}, \text{Mn}, \text{Al})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6$] é transparente, possui brilho vítreo, diversas cores (castanha, azul, bege) e ocorre em cristais subédricos sob a forma de prismas com uma terminação perfeita ou em fragmentos de grãos anédricos. Pode apresentar grãos de até 2 mm, porém predominam aqueles abaixo de 300 μm . Está presente em todas as amostras como um mineral acessório nas frações 0,6 A e 0,8 A, com exceção da amostra FA-10, onde ocorre como um mineral importante na fração 0,8 A. Turmalina azul foi encontrada somente nas amostras FA-05 e FA-10, tendo sido identificada por microsonda Raman.

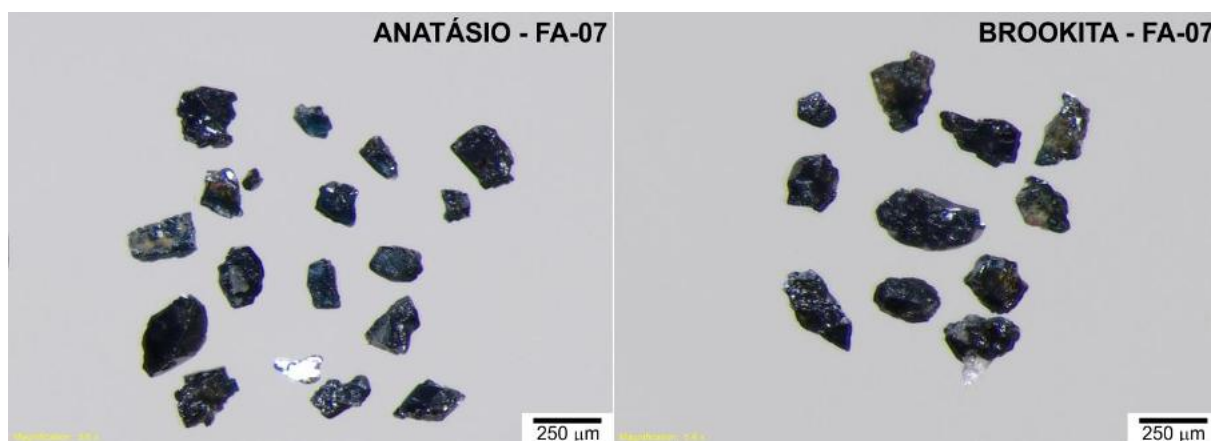


Figura 70 – Fotomicrografia de anatásio e brookita encontrados na amostra FA-07. A principal diferença entre os dois minerais sob estereomicroscopia é a cor, apresentado-se azul no anatásio e marrom esverdeada na brookita. A distinção das duas fases foi realizada através de microsonda Raman.

A muscovita [$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_{1,8}\text{F}_{0,2}$] apresenta brilho vítreo, possui clivagem perfeita em placas, é preferencialmente transparente e, mais raramente, amarelada ou amarronzada devido à alteração e percolação de ferro. Normalmente seus grãos são anédricos e algumas vezes pseudo-hexagonais. Está presente principalmente

nas frações 1,0 A, 1,8 A e não atraível, sendo que, na amostra FA-08, a muscovita é um dos minerais mais importantes da fração 1,8 A, enquanto nas amostras FA-02, FA-05, FA-06, FA-07, FA-09, FA-10, FA-11, FA-12 e FA-13, varia de um mineral comum até raro.

A biotita/hidrobiotita $[K(Mg,Fe^{2+})_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$ apresenta brilho submetálico a vítreo, possui clivagem perfeita e cor desde preta até marrom bronze ou dourada, indicando condições de alteração intempérica. Ocorre predominantemente em placas ou lamelas e seus grãos são anédricos. Foi encontrada somente nas amostras FA-08, FA-13 e FA-14, sempre como um mineral traço.

O “anfíbólio” (mineral não determinado do supergrupo do anfíbólio) varia de translúcido a transparente, possui cor desde verde escura até verde clara, brilho vítreo a submetálico, forma anédrica alongada, clivagem perfeita, aspecto fibroso e está presente somente nas frações 0,5 A e 0,6 A. Nas amostras FA-02, FA-03, FA-06, FA-07, FA-08 e FA-12 o anfíbólio pode variar de comum até raro, enquanto as amostras FA-05, FA-09, FA-10, FA-11, FA-13 e FA-14 não apresentaram nenhum grão.

O óxido/hidróxido de Mn $[MnO(OH)]$ apresenta brilho terroso a submetálico, cor preta a cinza escura e ocorre sob a forma de pequenas concreções ou grãos botrioidais, sendo claramente um mineral de alteração intempérica (Fig. 71). Seu tamanho normalmente é inferior a 300 μm e está presente em pequenas quantidades em todas as amostras, com exceção da FA-05 na qual está ausente ou não foi identificado.

A “limonita” (Fig. 71) envolve qualquer material e é formada por um agregado de minerais de ferro (hematita e/ou goethita), possui brilho desde terroso até submetálico e apresenta diversas cores de alteração, dentre as quais vermelho, marrom, castanho, ocre e marrom amarelado. Normalmente, sua forma é arredondada, mas podem ser encontrados como fragmentos alongados que se partem quando apertados com a pinça assim como em grãos cúbicos e facetados resultantes (pseudomorfo de pirita). Ocorre principalmente nas frações 0,3 A, 0,5 A, 0,6 A e 0,8 A, estando presente em grande quantidade nas amostras FA-07, FA-08, FA-10 e FA-12. Nas amostras FA-03, FA-06, FA-09, FA-11, FA-13 e FA-14, varia de comum até rara e não foi observada nas amostras FA-02 e FA-05.



Figura 71 – Exemplos de grãos de óxido/hidróxido de Mn e de limonita retirados da amostra FA-12. Os grãos de óxi-hidroxidos de Mn apresentam uma cor característica cinza grafite, hábito botrioidal e forma arredondada na maioria dos grãos. A limonita pode apresentar hábito cúbico ou fragmentos formando arestas de cubo (provável pseudomorfo de pirita).

11 GEOCRONOLOGIA U/Pb LA-ICPMS

11.1 Introdução

Foram selecionados cristais de zircão de quatro corpos pegmatíticos presentes na área estudada e que são intrusivos em quatro diferentes litotipos (metadiorito Brumado, metagranitoide Ritápolis, anfibolito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e ortogneiss Cassiterita). Esta seleção foi realizada com o objetivo de determinar a idade desses corpos, correlacioná-los ou não temporalmente entre si, independentemente da rocha encaixante, bem como verificar a influência ou não da assimilação de material oriundo das encaixantes.

A seleção dos grãos de cada amostra priorizou cristais transparentes e límpidos, buscando descartar grãos opacos, metamórficos e/ou ricos em inclusões e fraturas. Essa seleção implicou em um número diferente de grãos disponíveis e, consequentemente, em um número diferente de análises para cada uma das amostras.

11.2 Resultados analíticos

11.2.1 Amostra FA-03 (rocha encaixante: metadiorito Brumado)

Foram selecionados 39 grãos de zircão, porém somente 25 foram analisados, e o grão 17 foi estudado no centro e na borda, resultando em 26 resultados analíticos (Tab. 29). A figura 72 apresenta as imagens de catodoluminescência dos grãos de zircão estudados, assim como a idade aparente $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em cada um dos locais analisados.

Dos 26 dados coletados, 21 foram utilizados no diagrama concórdia (Fig. 73) obtendo-se uma idade de 2121 ± 28 Ma. Um dos *spots* analisados (grão 16) possui conteúdo isotópico totalmente distinto do conjunto mostrando idade $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ concordante de 3052 ± 29 Ma, que foi interpretada como herdada de uma fonte arqueana (elipse verde no diagrama concórdia), enquanto uma outra análise foi descartada (grão 14), pois apresentou concordância inferior a 95% (elipse vermelha no diagrama concórdia). O grão 17 foi estudado no centro e na borda, apresentando idades concordantes de respectivamente 2075 ± 37 Ma e 2050 ± 40 Ma, enquanto o grão 20 apresentou a idade mais jovem de 2036 ± 30 Ma, sendo a mesma levemente discordante. O ponto analisado 17.2 (borda do grão 17) apresentou uma

razão Th/U muito baixa de 0,08, o que poderia indicar sobrecrecimento durante um pulso metamórfico. Porém o zonamento oscilatório observado no grão apontaria para uma feição primária. Apesar de apresentar alto grau de concordância, esse dado não foi utilizado no cálculo de idade (elipse azul no diagrama concórdia) por se ter dúvida se está relacionado à cristalização do pegmatito ou a um evento metamórfico posterior.

Tabela 29 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 25 grãos de zircão de um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado (amostra FA-03). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.

FA-03		RAZÕES					IDADES								
Spot site	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	Coef. Corr.*	Pb total comum (%)	Pb radio-gênico (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	T _{206/238}	1 σ	T _{207/206}	1 σ	Concor-dância**
Dados utilizados no cálculo da idade (concórdia)															
1,1	7,1583	0,1464	0,3925	0,0040	0,35	0,04	55	86	98	0,88	2,134	0,018	2,128	0,035	100
2,1	7,1776	0,1594	0,3966	0,0043	0,01	0,43	46	55	83	0,66	2,153	0,020	2,115	0,038	101
4,1	7,0495	0,1318	0,3903	0,0036	0,90	0,40	103	166	185	0,90	2,124	0,017	2,111	0,031	100
5,1	7,0915	0,1476	0,3897	0,0040	0,37	0,27	48	59	86	0,68	2,121	0,019	2,125	0,036	99
6,1	7,1340	0,1873	0,3898	0,0051	0,64	0,20	25	26	47	0,55	2,122	0,024	2,135	0,048	99
7,1	7,1181	0,1544	0,3904	0,0042	0,50	0,15	43	45	82	0,55	2,125	0,019	2,128	0,038	99
8,1	7,0866	0,1464	0,3891	0,0039	0,43	0,08	58	103	100	1,03	2,119	0,018	2,126	0,035	99
9,1	7,1404	0,1758	0,3933	0,0048	0,37	0,77	32	38	58	0,65	2,138	0,022	2,121	0,044	100
10,1	7,0679	0,1553	0,3888	0,0042	0,74	0,15	46	59	83	0,72	2,117	0,019	2,123	0,038	99
11,1	7,0634	0,1377	0,3878	0,0037	0,01	0,15	73	70	138	0,50	2,112	0,017	2,126	0,032	99
12,1	7,1450	0,1367	0,3915	0,0037	0,77	0,14	68	64	128	0,50	2,130	0,017	2,130	0,033	100
13,1	6,9941	0,1466	0,3832	0,0039	0,01	0,07	57	83	100	0,83	2,091	0,018	2,130	0,035	98
17,1	6,7006	0,1485	0,3786	0,0044	0,61	0,09	81	29	171	0,17	2,070	0,021	2,075	0,037	99
18,1	6,9086	0,1371	0,3811	0,0041	0,64	0,06	120	126	229	0,55	2,082	0,019	2,118	0,032	98
19,1	6,9821	0,1475	0,3843	0,0043	0,80	0,37	96	123	177	0,69	2,096	0,020	2,122	0,034	98
20,1	6,2264	0,1163	0,3597	0,0036	0,88	0,19	236	154	537	0,29	1,981	0,017	2,036	0,030	97
21,1	7,1808	0,1710	0,3959	0,0050	0,74	0,26	55	72	103	0,70	2,150	0,023	2,119	0,040	101
22,1	7,2083	0,1633	0,3953	0,0047	0,50	0,65	60	106	106	1,01	2,147	0,022	2,128	0,038	100
23,1	6,6607	0,1746	0,3726	0,0052	0,22	0,40	35	41	66	0,62	2,041	0,024	2,093	0,047	97
24,1	6,8394	0,1667	0,3776	0,0048	0,53	0,59	43	48	81	0,59	2,065	0,023	2,116	0,042	97
25,1	7,1037	0,1490	0,3891	0,0044	0,05	0,17	95	138	168	0,82	2,119	0,020	2,130	0,034	99
Dados não utilizados no cálculo da idade (concórdia)															
14,1	6,3902	0,1876	0,3546	0,0054	0,85	0,42	23	34	43	0,79	1,956	0,026	2,107	0,054	92
16,1	19,3296	0,3835	0,6097	0,0068	0,93	0,09	105	118	114	1,04	3,069	0,027	3,052	0,029	100
17,2	6,5871	0,1603	0,3777	0,0047	0,53	0,20	48	8	105	0,08	2,065	0,022	2,050	0,040	100
Dados com elevado conteúdo de Pb comum															
3,1	6,8812	0,1337	0,3615	0,0035	0,99	2,00	62	73	135	0,54	1,989	0,016	2,203	0,034	90
15,1	7,7567	0,1963	0,3846	0,0053	0,95	3,56	38	39	79	0,49	2,098	0,024	2,303	0,042	91

* Coeficiente de correlação entre os erros

** Concordância entre as razões $T_{206/238}$ e $T_{207/206}$

11.2.2 Amostra FA-08 (rocha encaixante: metagranitoide Ritópolis)

Foram selecionados 73 grãos de zircão desta amostra, porém somente 26 foram analisados, tendo sido obtidos 26 resultados analíticos (Tab. 30). Morfologicamente os grãos estudados apresentam-se como prismas alongados com relação comprimento/largura de até 4:1, como os grãos observados nas duas primeiras fileiras (Fig. 74). A forma desses grãos difere fortemente daqueles observados no metadiorito Brumado (Fig. 72). Normalmente os grãos apresentam tamanho médio de 200 μm , sendo que em alguns casos (grão 4) podem atingir mais de 300 μm no eixo maior. Uma grande parte dos exemplares apresenta forma

prismática alongada (grãos 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 15 e 18), enquanto os demais correspondem a fragmentos de prismas.

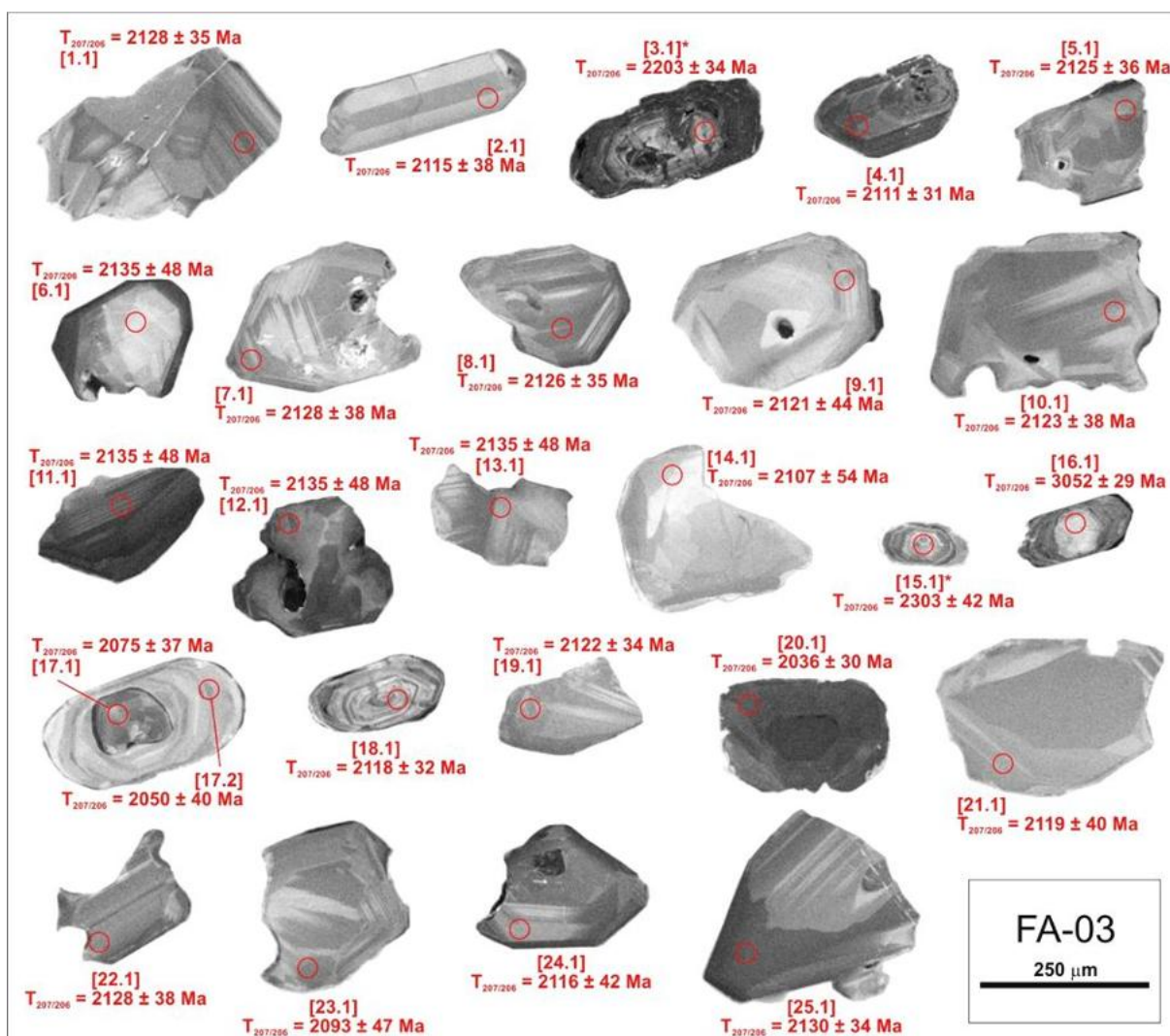


Figura 72 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado (amostra FA-03). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum.

A figura 74 apresenta as imagens de catodoluminescência dos grãos de zircão estudados, assim como a idade aparente $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em cada um dos locais analisados. Nessa imagem é possível de se observar a presença de zonamento oscilatório bem marcado em parte dos cristais (grãos 2, 8, 9, 10, 12, 18), bem como a presença de um sobrecrecimento com cor mais escura nas bordas de alguns cristais (grãos 2, 6, 9, 10, 15, 17, 19, 23), que pode envolver por completo os referidos exemplares. Em geral, essa cor mais escura está associada a um elevado

teor de U nos grãos, embora as análises isotópicas tenham revelado que a maioria dos cristais apresentam baixo teor de Pb comum.

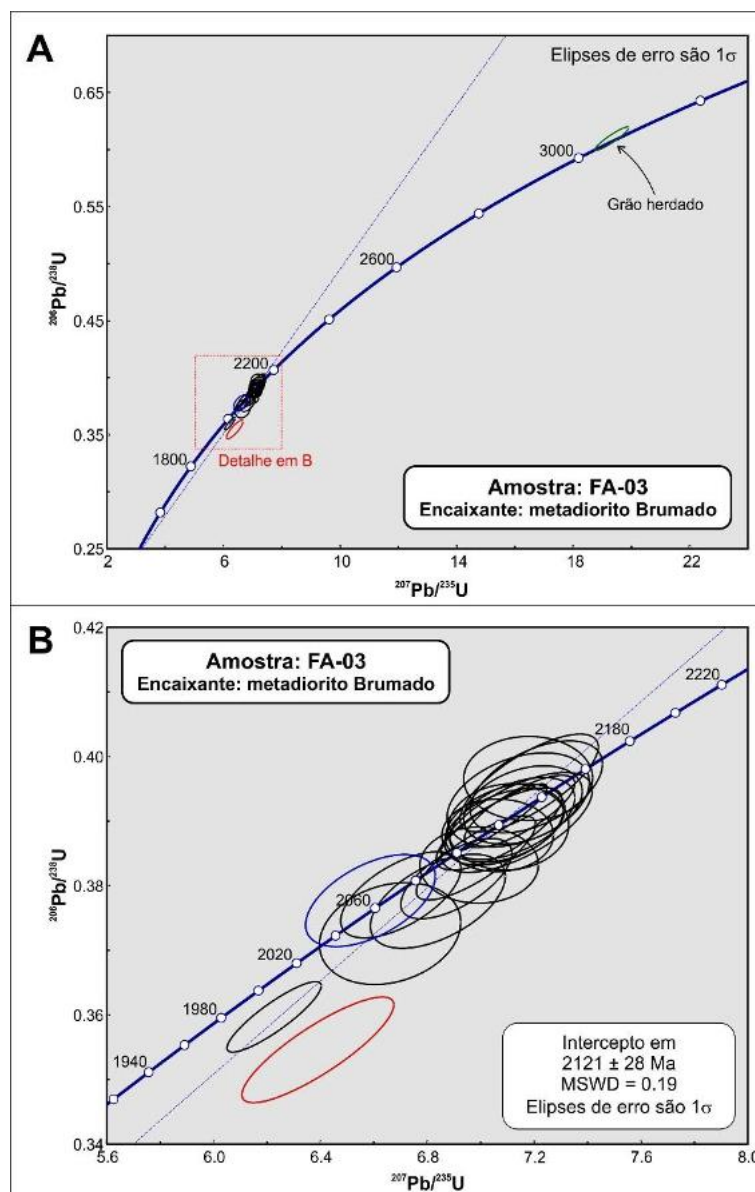


Figura 73 – Diagrama concórdia da amostra FA-03 referente a um pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado. Em (A) diagrama concórdia com todos os dados obtidos e em (B) um detalhe da região onde a idade foi calculada. Apenas as elipses pretas foram utilizadas no cálculo. Os dados marcados em azul e vermelho não foram utilizados no cálculo de idade (explicação no texto). Destaca-se a presença de um ponto concordante, porém isolado, em torno de 3050 Ma indicando tratar-se de um grão herdado (elipse verde em A).

Dos 26 dados coletados, foram selecionados e utilizados 24 dados gerando uma idade calculada de 2121 ± 9 Ma (Fig. 75).

Duas análises foram descartadas (spot 6.1 e 8.1), pois apresentaram idade $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ levemente discordante de 2309 ± 52 Ma e de 2342 ± 34 Ma, as quais

podem ser interpretadas como grãos herdados, oriundos de rochas do arco Resende Costa, cujas idades de cristalização variam de 2351 ± 48 a 2317 ± 16 Ma (Teixeira *et al.*, 2015). Destaca-se que o grão 24 apresentou a idade mais jovem de 2077 ± 29 Ma, levemente discordante.

Tabela 30 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 26 grãos de zircão de um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (amostra FA-08). Dois pontos com maior grau de discordância e interpretados como herdados não foram utilizados para o cálculo da idade.

FA-08		RAZÕES					IDADES								
Spot site	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	Coef. Corr.*	Pb total comum (%)	Pb radio-gênico (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	$T_{206/238}$	1 σ	$T_{207/206}$	1 σ	Concordância**
Dados utilizados no cálculo da idade (concordância)															
1,1	6,8455	0,1308	0,3795	0,0038	0,91	0,15	204	379	366	1,04	2,074	0,018	2,109	0,031	98
2,1	7,4590	0,1638	0,4100	0,0048	0,88	0,41	54	49	103	0,47	2,215	0,022	2,124	0,037	104
3,1	7,5030	0,1463	0,4103	0,0043	0,68	0,23	128	228	217	1,05	2,216	0,020	2,133	0,033	103
4,1	7,5359	0,1450	0,4103	0,0042	0,88	0,04	147	252	259	0,97	2,216	0,019	2,141	0,032	103
5,1	7,3988	0,1375	0,4010	0,0040	0,91	0,80	202	264	392	0,67	2,174	0,018	2,149	0,031	101
7,1	7,3598	0,1486	0,4030	0,0044	0,83	0,07	124	233	207	1,13	2,183	0,020	2,131	0,034	102
9,1	7,2104	0,1412	0,3958	0,0041	0,34	0,07	133	94	262	0,36	2,150	0,019	2,126	0,033	101
10,1	7,2177	0,1433	0,3978	0,0042	0,98	0,17	141	121	271	0,45	2,159	0,019	2,119	0,032	101
11,1	7,2484	0,1351	0,4030	0,0039	0,81	0,11	215	402	360	1,12	2,183	0,018	2,104	0,031	103
12,1	7,4497	0,1407	0,4059	0,0041	0,90	0,17	115	198	189	1,05	2,196	0,019	2,140	0,032	102
13,1	5,1157	0,1019	0,2954	0,0031	0,99	0,16	196	363	348	1,04	1,669	0,015	2,037	0,031	81
14,1	7,4687	0,1308	0,4029	0,0034	0,94	0,55	284	736	514	1,43	2,183	0,016	2,157	0,028	101
15,1	6,0264	0,1089	0,3433	0,0030	0,96	0,46	185	208	412	0,50	1,903	0,014	2,061	0,029	92
16,1	7,2211	0,1327	0,3971	0,0036	0,81	0,56	132	220	224	0,98	2,156	0,017	2,123	0,030	101
17,1	7,6302	0,1464	0,4165	0,0040	0,41	0,00	87	132	149	0,89	2,244	0,018	2,136	0,032	105
18,1	7,1104	0,1408	0,3858	0,0038	0,88	1,87	65	70	127	0,56	2,103	0,018	2,147	0,033	97
19,1	7,1657	0,1320	0,3934	0,0036	0,46	0,32	142	93	277	0,34	2,139	0,016	2,126	0,030	100
20,1	7,4562	0,1377	0,4054	0,0037	0,84	0,10	107	120	199	0,61	2,194	0,017	2,143	0,031	102
21,1	7,0338	0,1266	0,3870	0,0034	0,90	0,53	165	165	378	0,44	2,109	0,016	2,122	0,029	99
22,1	7,1763	0,1330	0,3968	0,0036	0,76	0,03	81	66	159	0,42	2,154	0,017	2,114	0,031	101
23,1	7,5253	0,1427	0,4117	0,0039	0,72	0,01	103	170	175	0,97	2,223	0,018	2,132	0,031	104
24,1	6,7171	0,1213	0,3792	0,0034	0,75	0,12	149	173	289	0,60	2,073	0,016	2,077	0,029	99
25,1	7,0762	0,1310	0,3891	0,0035	0,94	0,12	156	256	271	0,94	2,119	0,016	2,123	0,030	99
26,1	7,1485	0,1520	0,3923	0,0041	0,93	0,26	99	152	176	0,87	2,134	0,019	2,127	0,035	100
Dados não utilizados no cálculo da idade (concordância)															
6,1	9,0287	0,2561	0,4460	0,0071	0,01	0,09	20	15	33	0,44	2,377	0,032	2,309	0,052	102
8,1	9,6805	0,1969	0,4693	0,0052	0,41	0,28	102	118	156	0,76	2,480	0,023	2,342	0,034	105

* Coeficiente de correlação entre os erros

** Concordância entre as razões $T_{206/238}$ e $T_{207/206}$

11.2.3 Amostra FA-12 (rocha encaixante: anfibolito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes)

Dentre os cristais de zircão extraídos desta amostra, foram selecionados 41 grãos, porém somente 23 foram efetivamente analisados, sendo que três (grãos 18, 21 e 22) foram estudados no centro e na borda, resultando em 26 dados analíticos (Tab. 31).

Na figura 76 é possível observar a imagem catodoluminescente dos grãos analisados, assim como as idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ obtidas em cada ponto. Morfologicamente os grãos são homogêneos ocorrendo como prismas com relação comprimento/largura variando de 1:1 até 2:1, sendo que seu contorno é predominantemente euédrico, bipiramidal e alongado. Mais raramente são

observados fragmentos geralmente irregulares, com faces quebradas (grãos 19 e 23), sendo comum a presença de exemplares com zonamento oscilatório (grãos 3, 4, 6, 7, 9, 16), enquanto núcleos recristalizados, heterogêneos e irregulares são raros (grãos 2 e 23). Em termos gerais os cristais variam de bem claros com baixo conteúdo de U (grãos 1, 6, 9, 11 e 18) até bem escuros com elevado conteúdo de U (grãos 4, 8, 12 e 22) e o seu tamanho pode ultrapassar os 300 μm , mas em média fica abaixo dos 200 μm .

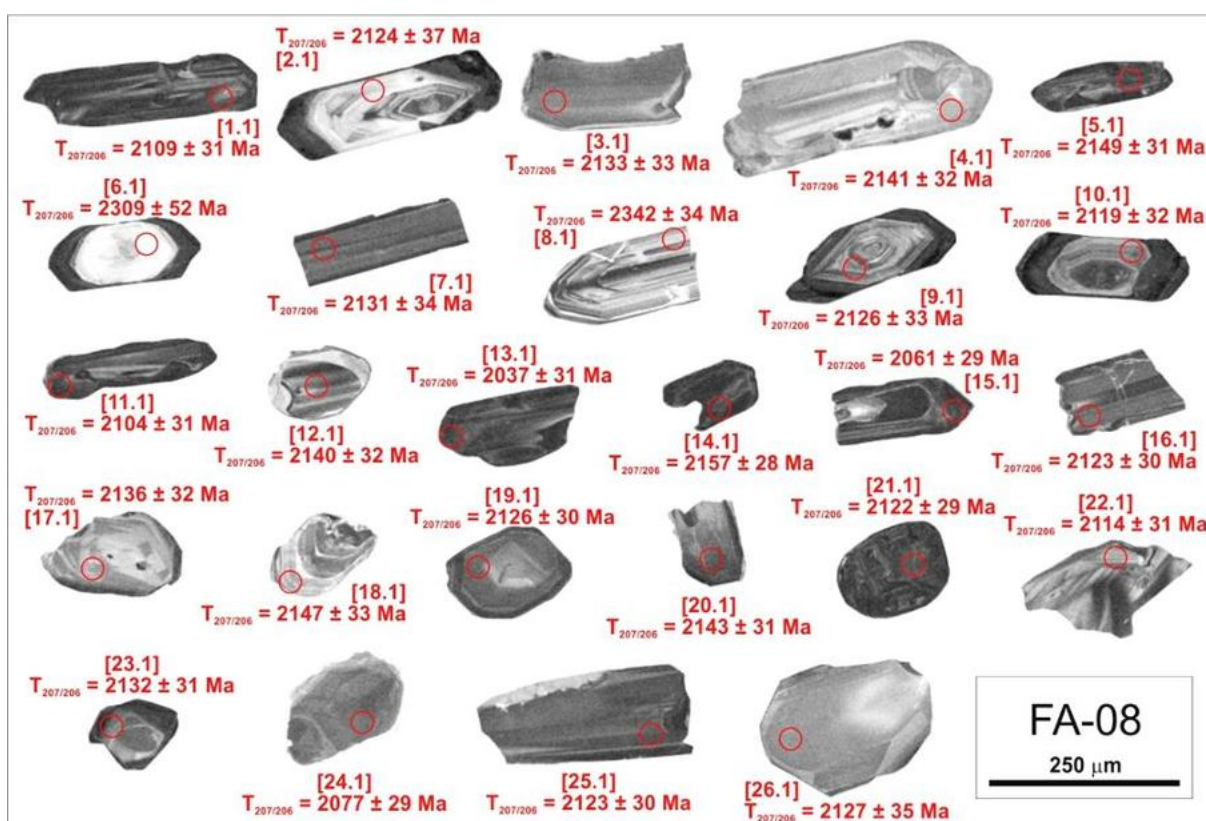


Figura 74 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritápolis (amostra FA-08). Círculos vermelhos indicam o ponto analisado em cada grão.

Os dados isotópicos mostraram que quase metade dos cristais analisados (grãos 3, 5, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 22 e 23) apresentaram teores elevados ou muito elevados de Pb comum ($> 2\%$), o que implicou no descarte de suas análises. Foram obtidas três idades mais antigas, de respectivamente 2480 ± 30 Ma, 2353 ± 41 Ma e de 2337 ± 31 Ma (Fig. 77a), sendo que as duas últimas foram referentes a análises no centro e na borda do mesmo cristal (Fig. 76). Essas três idades (apesar do Pb comum ser muito elevado) sugerem que os referidos grãos seriam herdados de corpos mais antigos, representados possivelmente pelo ortognaisse Cassiterita, cuja

idade de cristalização varia de 2472 ± 11 Ma a 2414 ± 29 Ma (Ávila, com. verbal) e pelo ortognaisse Resende Costa cuja idade varia de 2351 ± 48 Ma a 2317 ± 16 Ma (Teixeira *et al.*, 2015).

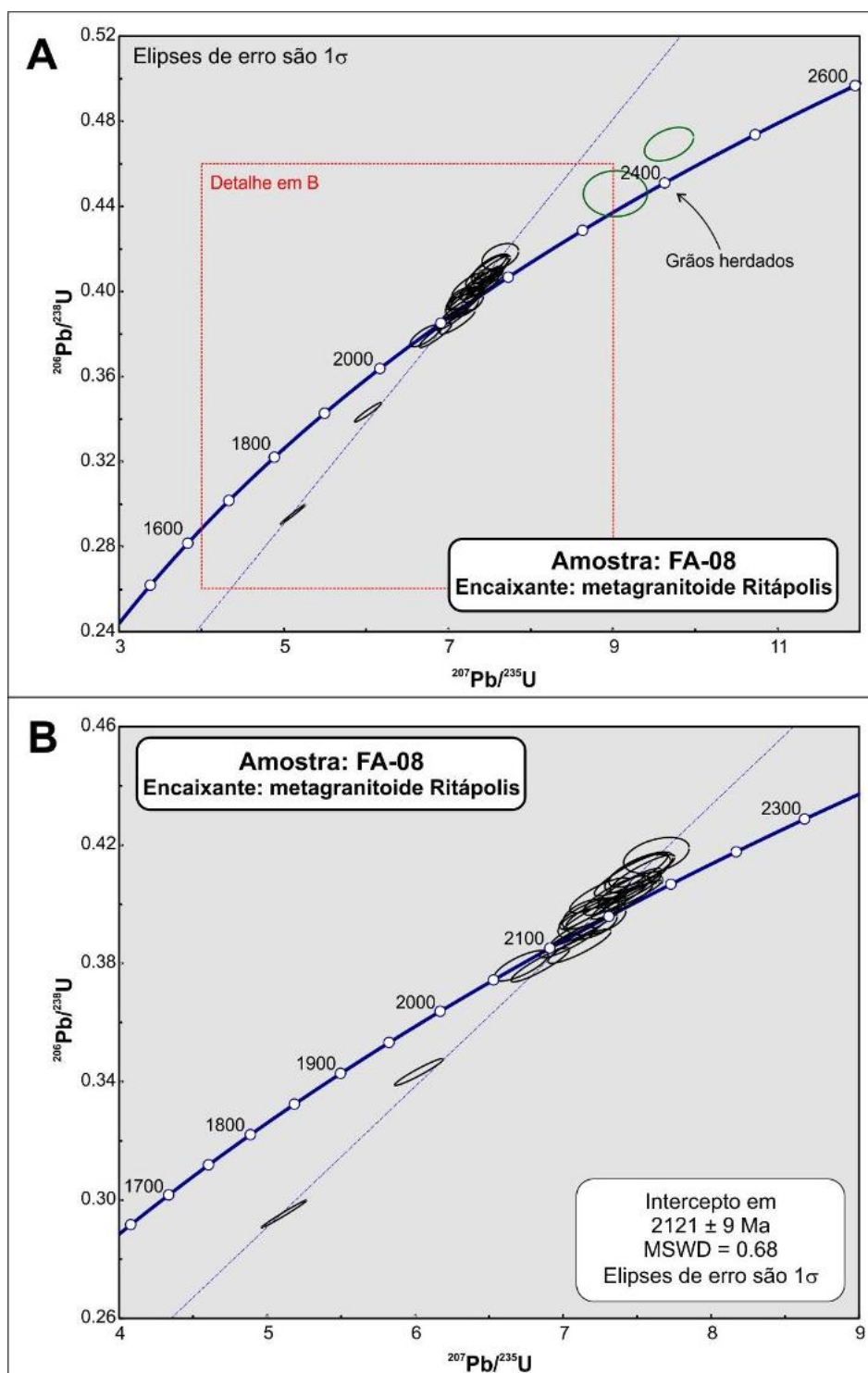


Figura 75 – Diagrama concórdia da amostra FA-08 referente a um pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritópolis. Em (A) diagrama com todos os dados obtidos plotados. Observar a presença de duas elipses em verde que representam os grãos herdados. Em (B) diagrama concórdia dos dados utilizados para o cálculo de idade (elipses pretas).

Tabela 31 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 23 grãos de zircão analisados (26 spots) de um pegmatito intrusivo nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostra FA-12). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.

FA-12		RAZÕES					IDADES								
Spot site	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	Coef. Corr.*	Pb total comum (%)	Pb radio-gênico (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	T _{206/238}	1 σ	T _{207/206}	1 σ	Concordância**
Dados utilizados no cálculo da idade 1 (concordia)															
10,1	7,3257	0,1489	0,4071	0,0041	0,89	0,98	65	138	109	1,27	2,202	0,019	2,105	0,035	104
18,1	7,1090	0,1554	0,3907	0,0041	0,01	0,00	101	146	182	0,81	2,126	0,019	2,124	0,034	100
18,2	7,1426	0,1634	0,3903	0,0044	0,78	1,46	60	72	114	0,63	2,124	0,020	2,134	0,037	99
Dados utilizados no cálculo da idade 2 (concordia)															
1,1	7,5833	0,1774	0,4010	0,0050	0,61	0,08	28	27	51	0,52	2,174	0,023	2,192	0,042	99
6,1	7,7983	0,1581	0,4141	0,0042	0,64	0,30	77	86	138	0,63	2,234	0,019	2,184	0,034	102
7,1	7,8610	0,1567	0,4149	0,0041	0,86	0,29	63	58	115	0,50	2,237	0,019	2,195	0,034	101
8,1	7,8455	0,1526	0,4178	0,0041	0,80	0,00	101	89	186	0,48	2,251	0,019	2,179	0,033	103
14,1	8,0361	0,1911	0,4283	0,0051	0,67	0,99	68	62	123	0,51	2,298	0,023	2,178	0,038	105
17,1	7,8308	0,1935	0,4125	0,0050	0,82	1,80	48	49	87	0,56	2,226	0,023	2,198	0,041	101
19,1	8,0468	0,2048	0,4275	0,0054	0,94	1,25	52	38	98	0,39	2,294	0,024	2,183	0,042	105
20,1	7,8329	0,1738	0,4145	0,0044	0,83	0,11	140	143	249	0,58	2,236	0,020	2,190	0,034	102
Dados não utilizados no cálculo da idade (concordia)															
2,1	10,3933	0,1987	0,4643	0,0044	0,73	2,38	117	194	163	1,19	2,459	0,019	2,480	0,030	99
21,1	9,0626	0,2252	0,4364	0,0056	0,70	2,72	40	41	67	0,62	2,335	0,025	2,353	0,041	99
21,2	9,0838	0,1900	0,4416	0,0045	0,69	0,70	129	139	210	0,66	2,358	0,020	2,337	0,031	100
4,1	6,4817	0,1216	0,3739	0,0033	0,78	1,94	153	196	310	0,63	2,048	0,016	2,039	0,031	100
Dados com elevado conteúdo de Pb comum															
3,1	7,5642	0,1644	0,4005	0,0044	0,66	6,03	40,8	36,6	75,1	0,487	2,171	0,02	2,189	0,037	99
5,1	7,4107	0,1624	0,4067	0,0045	0,92	8,07	41,8	40,7	76,7	0,53	2,2	0,021	2,127	0,038	103
9,1	7,6045	0,1872	0,4015	0,0053	0,18	3,21	22	26,5	39,6	0,67	2,176	0,025	2,194	0,044	99
11,1	7,9701	0,1777	0,4229	0,005	0,93	27,97	40,8	52,4	71,1	0,737	2,274	0,023	2,186	0,042	104
12,1	7,2918	0,1269	0,3609	0,0033	0,99	3,95	39,6	41	83,1	0,493	1,986	0,016	2,306	0,036	86
13,1	6,3177	0,1414	0,3624	0,0042	0,96	3,36	50	32,3	102,7	0,315	1,994	0,019	2,049	0,039	97
15,1	7,9417	0,2084	0,4178	0,0054	0,67	13,51	36,5	28,8	68,7	0,419	2,25	0,025	2,201	0,043	102
16,1	6,6508	0,1329	0,3767	0,0036	0,84	15,2	131,4	162	251,8	0,644	2,061	0,017	2,071	0,032	99
22,1	7,688	0,1669	0,409	0,0043	0,91	7,26	110,4	121,4	214	0,567	2,21	0,019	2,181	0,032	101
22,2	7,7977	0,1898	0,4098	0,0050	0,36	7,25	55	57	100	0,57	2,214	0,023	2,202	0,040	100
23,1	7,7472	0,2077	0,4074	0,0054	0,78	4,13	35	31	64	0,49	2,203	0,025	2,201	0,045	100

* Coeficiente de correlação entre os erros

** Concordância entre as razões T_{206/238} e T_{207/206}

Interpretando os demais dados obtidos, foram calculadas duas idades, sendo a primeira de 2129 ± 33 Ma (Fig. 77b) e a segunda de 2194 ± 30 Ma (Fig. 77c). Propõe-se que a primeira idade (2129 ± 33 Ma) corresponderia à época de cristalização do corpo pegmatítico, enquanto a segunda (2194 ± 30 Ma) estaria relacionada à herança ou contaminação do magma gerador dos pegmatitos por rochas mais antigas. Essas poderiam corresponder aos próprios anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, cuja idade de cristalização varia de 2231 ± 5 Ma a 2202 ± 11 Ma (Ávila *et al.*, 2012) ou a corpos plutônicos mais antigos, tais como o ortognaisse Fé com idade de cristalização de 2191 ± 9 Ma (Teixeira *et al.*, 2008) ou o quartzo-monzodiorito Glória, de idade 2188 ± 29 Ma (Ávila *et al.*, 2006).

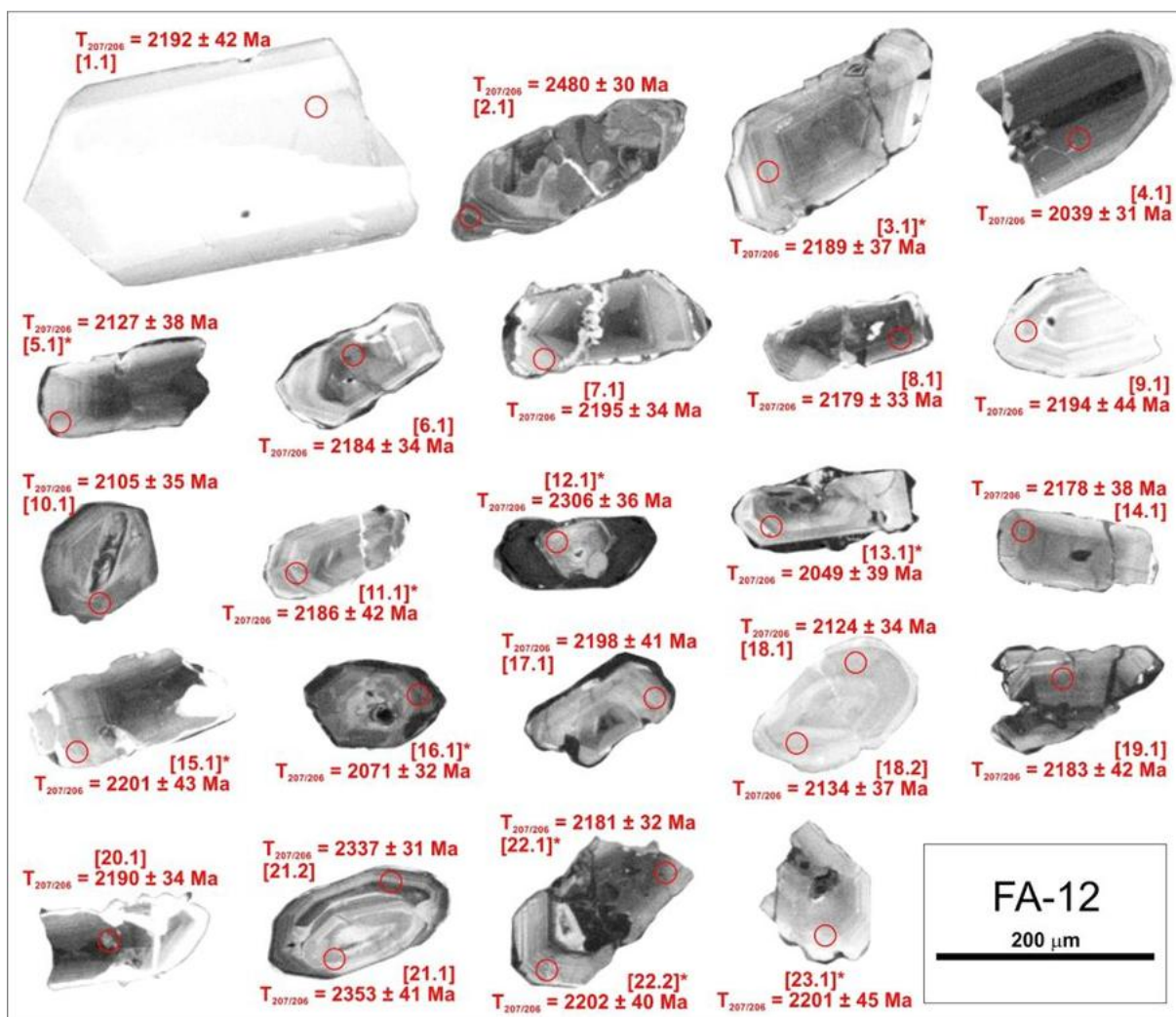


Figura 76 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo na faixa metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostra FA-12). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum.

Foi, ainda, obtida uma idade concordante de 2039 ± 31 Ma referente ao grão 4, que é mais nova que as demais. Essa idade foi encontrada em outros grãos presentes nas amostras FA-03 (spot 17.2 e 20.1) e FA-08 (spot 13.1 e 15.1), mas não tem uma interpretação definida até o momento.

11.2.4 Amostra FA-13 (rocha encaixante: ortogneisse Cassiterita)

A amostra FA-13 foi a que apresentou a menor quantidade de cristais de zircão passíveis de serem analisados, sendo que apenas 12 foram selecionados resultando em 26 dados analíticos (Tab. 32). Através da figura 78 é possível observar a imagem catodoluminescente dos cristais de zircão selecionados, assim como as idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ obtidas em cada um dos pontos.

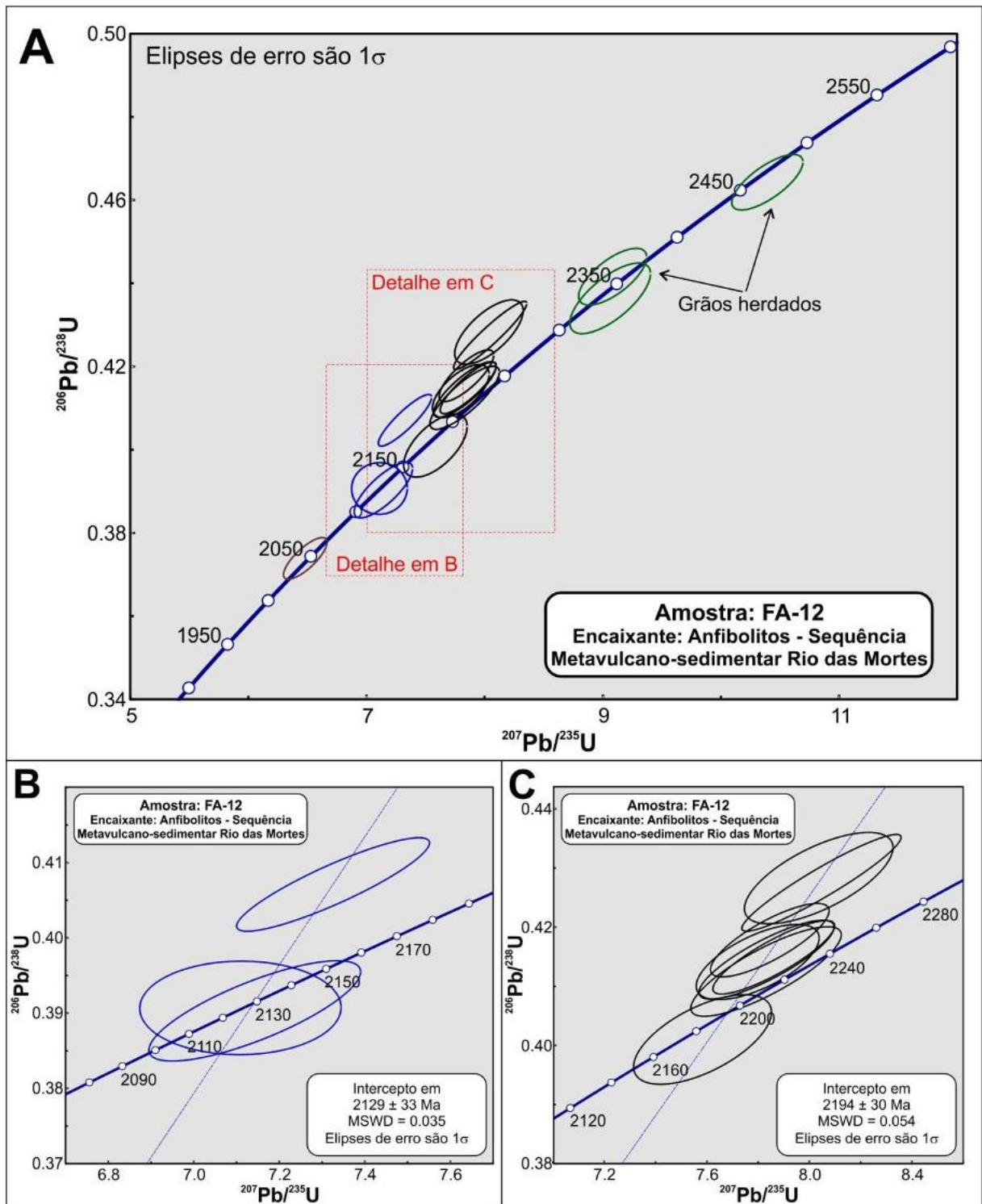


Figura 77 – Em (A) diagrama concórdia com todos os dados obtidos plotados. Elipses em verde representam grãos herdados. Em (B) e (C) as duas idades calculadas representando, respectivamente, a idade de cristalização dos pegmatitos e contaminação crustal de corpos mais antigos.

Tabela 32 – Resultados analíticos U-Pb (LA-ICPMS) de 12 grãos de zircão analisados (26 spots) de um pegmatito intrusivo no ortogneisse Cassiterita (amostra FA-13). Pontos com alto grau de discordância e/ou elevado conteúdo de chumbo comum não foram utilizados para o cálculo da idade.

FA-13		RAZÕES					IDADES									
Spot site	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	Coef. Corr.*	Pb total comum (%)	Pb radio-gênico (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	T _{206/238}	1 σ	T _{207/206}	1 σ	Concor-dância**	
Dados utilizados no cálculo da idade (concordia)																
1,1	10,4359	0,1956	0,4483	0,0090	0,69	0,17	37	71	49	1,45	2,388	0,040	2,546	0,044	93	
1,3	9,6742	0,2236	0,4367	0,0058	0,96	1,21	55	97	89	1,09	2,336	0,026	2,463	0,044	94	
3,1	8,2718	0,1387	0,3732	0,0065	0,96	0,00	70	126	117	1,07	2,044	0,031	2,464	0,038	82	
3,2	10,1189	0,2138	0,4530	0,0049	0,92	0,33	80	129	121	1,07	2,408	0,022	2,477	0,039	97	
4,1	10,0738	0,1450	0,4488	0,0064	0,99	0,10	172	235	233	1,01	2,390	0,029	2,485	0,032	96	
5,1	10,0624	0,1870	0,4630	0,0090	0,01	0,13	39	24	62	0,39	2,453	0,040	2,431	0,043	100	
5,3	8,1275	0,1873	0,3701	0,0047	0,89	1,72	53	43	91	0,47	2,030	0,022	2,448	0,042	82	
8,1	10,3457	0,1637	0,4582	0,0071	0,15	0,15	146	62	231	0,27	2,432	0,031	2,495	0,033	97	
8,2	10,1597	0,2124	0,4618	0,0047	0,66	0,35	238	545	306	1,78	2,448	0,021	2,451	0,037	99	
11,1	10,5892	0,2270	0,4710	0,0051	0,57	0,11	129	163	180	0,91	2,488	0,022	2,488	0,038	100	
Dados não utilizados no cálculo da idade (concordia) - elevada discordância e indica perda de Pb																
2,1	2,7951	0,0473	0,1885	0,0029	0,97	1,82	148	125	445	0,28	1,113	0,016	1,758	0,034	63	
2,2	5,3279	0,0947	0,2935	0,0052	0,05	0,25	51	101	129	0,79	1,659	0,026	2,120	0,043	78	
5,2	2,2734	0,0336	0,1681	0,0024	0,94	1,72	120	76	499	0,15	1,002	0,013	1,588	0,034	63	
6,2	1,5307	0,0254	0,1377	0,0021	0,71	0,43	43	8	155	0,05	0,831	0,012	1,213	0,036	68	
9,1	8,7980	0,1314	0,4202	0,0064	0,98	0,46	89	73	170	0,43	2,261	0,030	2,367	0,035	95	
10,1	3,6189	0,0835	0,2211	0,0024	0,96	1,49	93	78	260	0,30	1,288	0,013	1,937	0,039	66	
10,2	4,1125	0,0732	0,2566	0,0022	0,99	1,09	294	208	858	0,24	1,473	0,012	1,899	0,039	77	
11,2	3,3637	0,0690	0,2181	0,0021	0,97	2,06	237	93	877	0,11	1,272	0,011	1,829	0,040	69	
12,1	8,0957	0,1647	0,3912	0,0040	0,94	1,86	138	147	303	0,48	2,129	0,019	2,347	0,038	90	
12,2	2,6017	0,0563	0,1850	0,0019	0,88	0,49	203	66	720	0,09	1,094	0,010	1,661	0,040	65	
Dados não utilizados no cálculo da idade (concordia)																
2,3	7,4067	0,1650	0,4046	0,0049	0,92	0,36	57	57	119	0,48	2,190	0,022	2,135	0,043	102	
6,1	6,0071	0,0890	0,3528	0,0051	0,93	0,13	160	21	363	0,06	1,948	0,025	2,007	0,034	97	
6,3	5,9432	0,1230	0,3505	0,0035	0,85	0,07	224	28	520	0,05	1,937	0,017	2,000	0,039	96	
Dados com elevado conteúdo de Pb comum																
1,2	2,5413	0,0391	0,1777	0,0026	0,99	7,79	216	75	786	0,10	1,055	0,014	1,692	0,035	62	
7,1	0,8966	0,0162	0,0634	0,0011	0,99	7,01	104	66	502	0,13	0,396	0,007	1,672	0,036	23	
9,2	2,6717	0,0600	0,1705	0,0018	0,98	3,99	186	154	646	0,24	1,015	0,010	1,858	0,039	54	

* Coeficiente de correlação entre os erros

** Concordância entre as razões T_{206/238} e T_{207/206}

Nessa amostra os cristais de zircão são prismáticos, em sua grande maioria bipiramidais, com relação comprimento/largura desde 1:1 até 3:1 e com tamanho variando de 125 a 300 μm. A grande maioria dos grãos possuem zonamento oscilatório bem marcado e em geral apresentam núcleos com tonalidade mais clara e bordas com tonalidade mais escura, possivelmente devido ao elevado conteúdo de U (até 877 ppm). Alguns cristais apresentam núcleos irregulares com feições de reabsorção, como é possível observar nos grãos 4 e 9. Destaca-se que diversos grãos foram analisados no núcleo e na borda e apresentaram idades muito próximas, apontando que o zonamento oscilatório estaria relacionado a um processo de cristalização magmática. A partir da utilização de 10 dos resultados disponíveis foi obtida uma idade de 2489 ± 10 Ma no diagrama concordia (Fig. 78). Outros pontos levemente discordantes forneceram idades de 2135 ± 43 Ma, 2007 ± 34 Ma e 2000 ± 39 Ma, sendo que os dois últimos foram obtidos no mesmo grão (6) e apresentaram baixa razão Th/U, indicando a influência de um provável evento metamórfico. Cabe destacar que diversos dados foram extremamente discordantes

(spot 2.1, 2.2, 5.2, 6.2, 10.1, 10.2, 11.2, 12.1 e 12.2), bem como alguns grãos apresentaram elevado conteúdo de Pb comum (spot 1.2, 7.1 e 9.2) e por isso não foram utilizados no cálculo da idade.

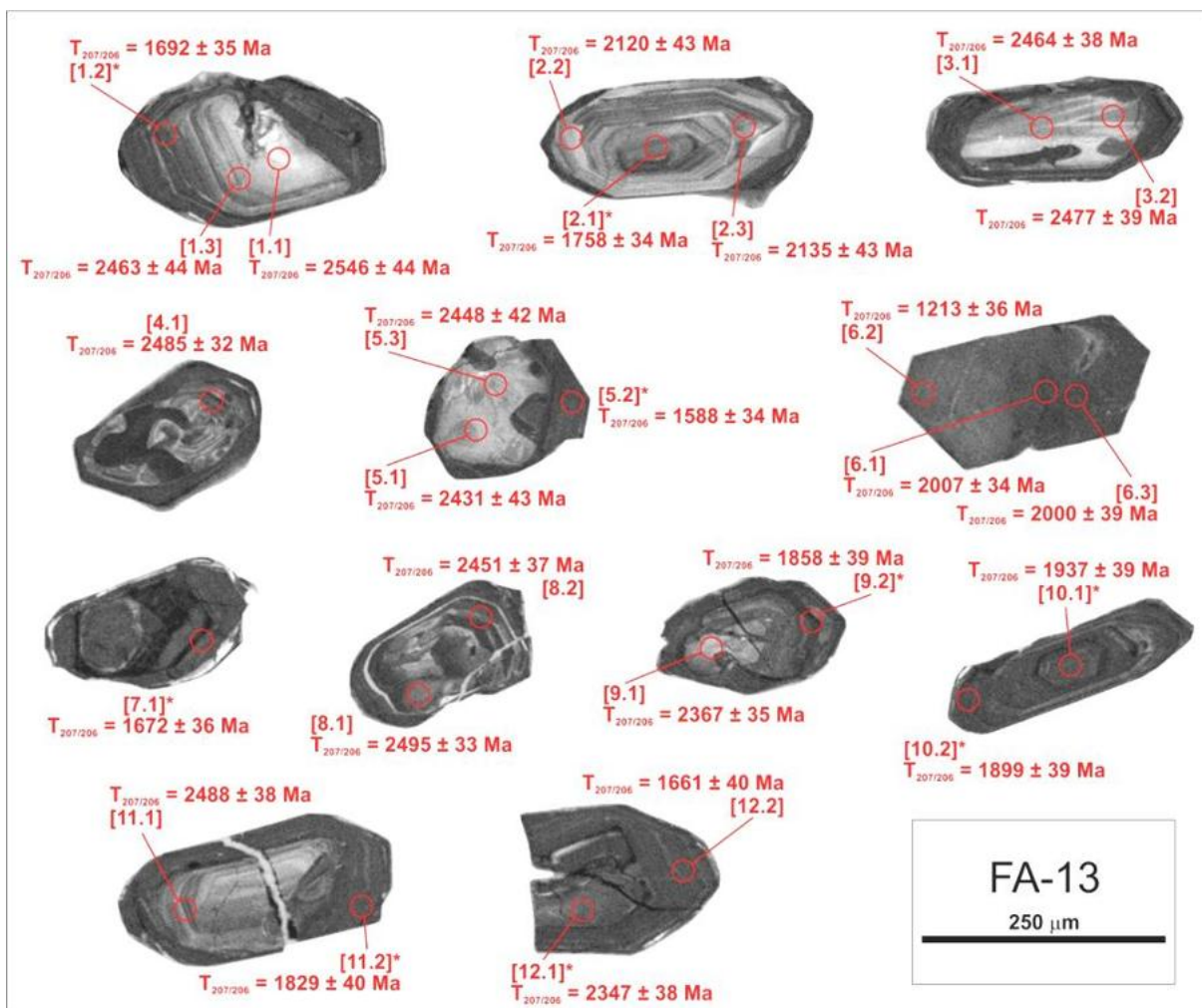


Figura 78 – Imagem catodoluminescente de cristais de zircão e idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos pontos analisados de um pegmatito intrusivo no ortognaisse Cassiterita (amostra FA-13). Círculos vermelhos indicam o local analisado em cada grão. Os pontos marcados com asterisco não foram utilizados para o cálculo da idade devido ao excesso de chumbo comum.

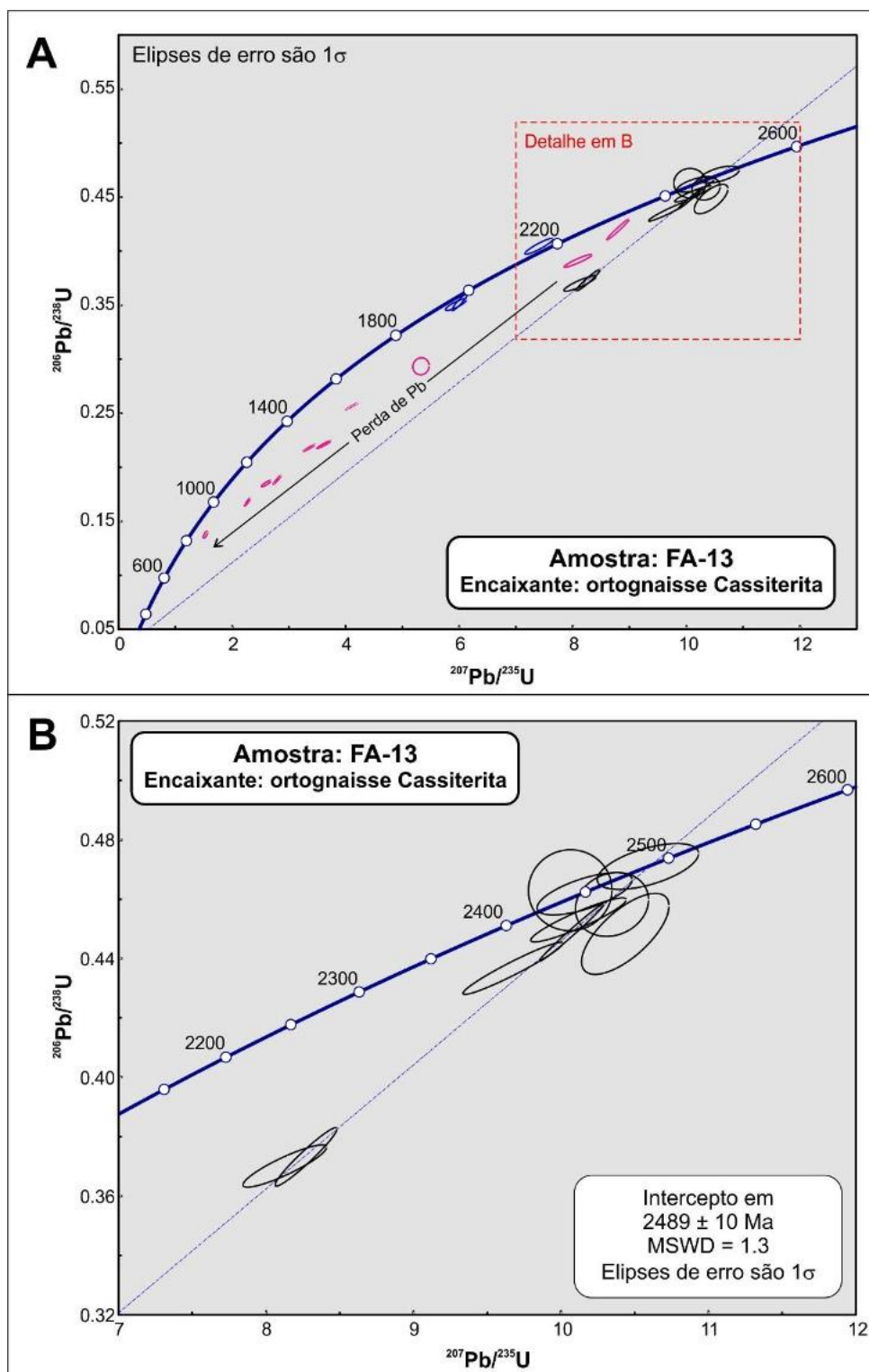


Figura 79 – Diagrama concórdia da amostra FA-13 referente a um pegmatito intrusivo no ortognaisse Cassiterita. Em (A) visão geral dos resultados onde é possível ver os três conjuntos de dados obtidos: em preto dados utilizados para o cálculo da idade (detalhe em B), em rosa sequência de dados indicando que houve uma perda progressiva de Pb (evento térmico/metamorfismo) e em azul, dados não utilizados no cálculo da idade.

11.3 Discussão das idades obtidas

Os resultados obtidos através das análises de U-Pb por LA-ICPMS estão resumidos na tabela 33 em conjunto com os dados das rochas encaixantes, atualmente disponíveis na literatura.

Tabela 33 – Resumo dos dados geocronológicos disponíveis na literatura e dos obtidos neste trabalho. A interpretação obtida é explicada no texto.

Rocha encaixante do pegmatito	Literatura			Pegmatitos neste trabalho		
	Idade (Ma)	Interpretação	Autor	Amostra	Idade (Ma)	Interpretação
Metadiorito Brumado	2131 ± 4	Idade mínima de cristalização	Ávila (2000)	FA-03	2121 ± 28	Pegmatização
Metagranitoide Ritápolis	2122 ± 6	Idade mínima de cristalização	Ávila (2000)	FA-08	2121 ± 9	Pegmatização
	2121 ± 7	Idade fácies granítica				
Sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes	2231 ± 5 e	Protolito dos anfíbolitos	Ávila <i>et al.</i> (2012)	FA-12	2129 ± 33	Pegmatização
	2202 ± 11				2194 ± 30	Contaminação
Ortognaisse Cassiterita	2472 ± 11	Idade de cristalização	Ávila (com. verbal)	FA-13	2489 ± 10	Contaminação/Herança

A partir dos dados obtidos é possível observar que três dos corpos estudados apresentam idades muito próximas, entre 2129 e 2121 Ma interpretadas como a idade da fase de pegmatização (Tab. 33). A exceção ficou com a amostra FA-13 que apresenta uma idade muito mais antiga de 2489 Ma, que pode estar associada à contaminação ou herança das rochas encaixantes, bem como pode ser outra fase de geração de pegmatitos relacionada ao próprio ortognaisse Cassiterita, que apresenta idade de cristalização compatível com a idade do pegmatito.

As idades apresentadas pelas amostras FA-03, FA-08 e, em parte, pela amostra FA-12 corroboram as informações apresentadas por Quéméneur & Baraud (1983) e Pires & Porto Júnior (1986), que associaram os pegmatitos ao corpo Ritápolis, com idade mínima de cristalização em torno de 2121 ± 7 Ma (Ávila, 2000). A presença de diversos grãos de zircão com idades mais antigas do que o evento de pegmatização (Ex: FA-03 – grão 16 spot 1 – 3052 ± 29 Ma; FA-8 – grão 8 spot 1 – 2342 ± 34 Ma) sugere que ocorreu a contaminação dos corpos estudados durante seu processo de cristalização. Essa contaminação envolveria desde material arqueano até paleoproterozoico, e as idades obtidas são compatíveis com aquelas encontradas nos ortognaises Resende Costa (FA-08 e FA-12), Cassiterita (FA-12) e Fé (FA-12), bem como no quartzo monzodiorito Glória e nas rochas anfíbolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-12).

12 DISCUSSÕES

A região entre as cidades de Nazareno, Cassiterita e Ritápolis, na porção sudeste de Minas Gerais, é conhecida no cenário geológico pela presença de um enxame de corpos pegmatíticos, dentre os quais se destaca a mina da Volta Grande. Inicialmente esses corpos foram reunidos na Região Estanífera de São João del Rei por Guimarães & Guedes (1944) e, com o passar dos tempos, novos corpos foram descobertos e seus limites ampliados (Rolff, 1947; Guimarães, 1956; Francesconi, 1972; Quéméneur, 1987). Posteriormente, Pereira *et al.* (2003, 2004a, 2004b) agruparam os mesmos corpos na Província Pegmatítica de São João del Rei e propuseram que esta possuiria cerca de 1400 km², envolvendo os municípios de Nazareno, Conceição da Barra de Minas (antiga Cassiterita), São João del Rei, Ritápolis e Coronel Xavier Chaves (Fig. 80).

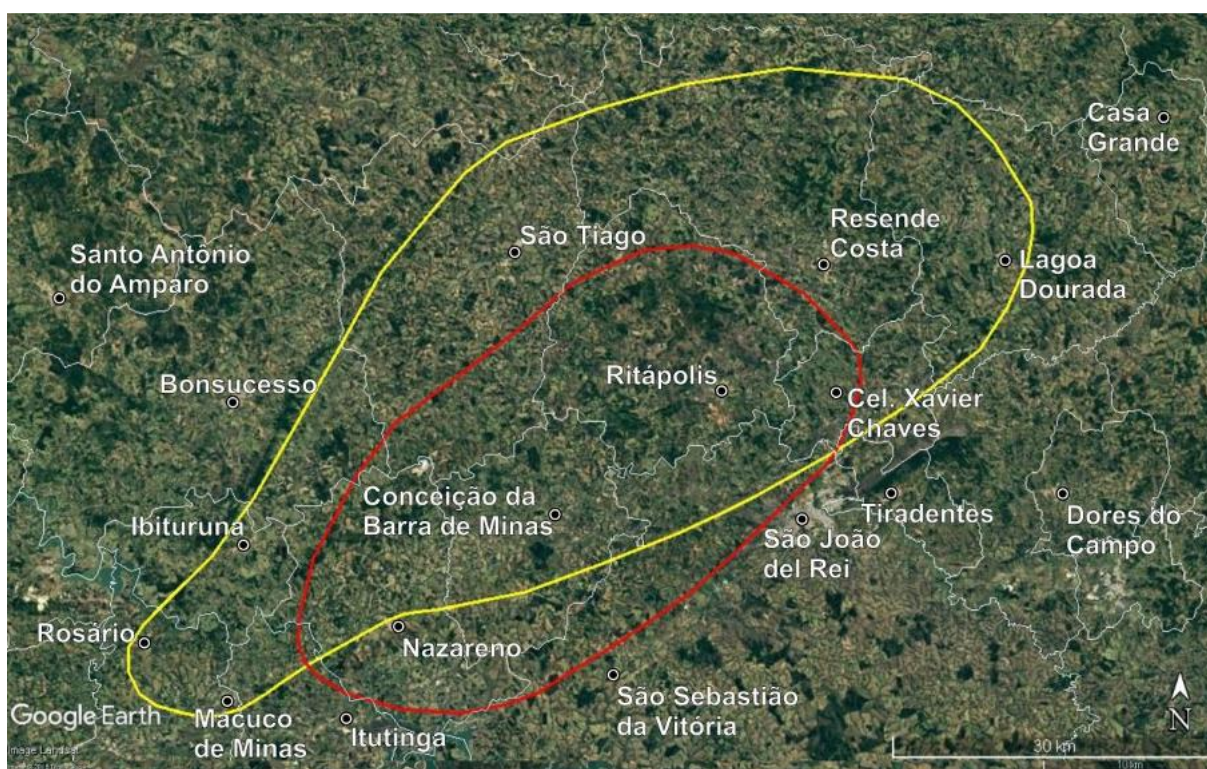


Figura 80 – Imagem de satélite (Google Earth) mostrando os limites geográficos da Província Pegmatítica de São João del Rei por Pereira *et al.* (2003, 2004) em vermelho e o da presente tese, em amarelo. Em branco estão representados os limites municipais de Minas Gerais (IBGE).

A partir das informações adquiridas na atual pesquisa para as áreas de Ritápolis e Conceição da Barra de Minas, em conjunto com dados recentemente obtidos por Campos *et al.* (2009) em São Tiago e por Rodrigues *et al.* (2013) em

Resende Costa, propõe-se um novo limite geográfico para a Província Pegmatítica de São João del Rei (Fig. 80). Nesse sentido, a distribuição dos corpos pegmatíticos da região já alcança parte dos municípios de Bom Sucesso, São Tiago, Resende Costa, Lagoa Dourada, Ibituruna, Nazareno, Conceição da Barra de Minas, Ritápolis, Coronel Xavier Chaves, São João del Rei, Itumirim e Itutinga, perfazendo aproximadamente 2500 km² de área total, sendo que as maiores diferenças em relação à área apresentada por Pereira *et al.* (2003, 2004) correspondem ao prolongamento da província para norte, englobando as regiões de São Tiago, Resende Costa e Lagoa Dourada e para oeste/sudoeste, desde a Serra de Bonsucesso até a região de Macuco de Minas. O limite sul também foi alterado a partir dos dados apresentados por Ávila *et al.* (2006c), sendo balizado pela zona de cisalhamento do Lenheiro.

Alguns autores subdividiram a Província Pegmatítica de São João del Rei segundo critérios como economicidade (Rolff, 1947, 1948a), idade dos corpos pegmatíticos (Guimarães & Florêncio, 1949; Guimarães, 1950) e sua composição (Rolff, 1952a; Heinrich, 1959, 1964), enquanto Francesconi (1972) não observou nenhum tipo de zonamento entre os corpos pegmatíticos estudados por ele na província. As subdivisões acima propostas não foram confirmadas, em parte porque os referidos autores utilizaram a presença e distribuição de minerais litiníferos, que não foram encontrados no presente estudo e, em parte, por que essas propostas tomaram como base dados que não foram confirmados na presente tese, como as idades muito novas obtidas em grãos de monazita por Guimarães & Florêncio (1949). Já o zonamento proposto por Pires & Pires (1992), separando os corpos segundo a presença ou não de muscovita, não foi confirmado. Segundo estes autores, as zonas definidas como “intragranítica” e “proximal” são compostas por pegmatitos sem muscovita (*muscovite out*) e, no presente trabalho, este mineral foi encontrado em corpos intrusivos tanto no metadiorito Brumado (amostra FA-02, FA-03 e FA-06), quanto no metagranitoide Ritápolis (amostras FA-05, FA-07, FA-08) que estariam associados, respectivamente, às zonas “proximal” e “intragranítica” do metagranitoide Ritápolis.

A preferência de se trabalhar com saprólitos ao invés de amostras frescas de pegmatitos deveu-se, em grande parte, à área de estudo se encontrar intensamente intemperizada e os principais corpos pegmatíticos estarem muito alterados. Nesse

caso, grande parte da matriz dos pegmatitos, geralmente composta por feldspato, já se encontra caulinizada deixando os minerais de interesse parcial ou totalmente liberados, tornando mais fácil a amostragem, assim como é possível de se trabalhar com volumes menores de material, quando comparado com a rocha fresca. Dessa forma a coleta do pegmatito saprolitizado, assim como sua separação e concentração são realizadas sem a exigência das etapas de britagem e/ou moagem, que poderiam quebrar os grãos e obliterar a forma original dos minerais, dificultando a sua identificação em estereomicroscópio. As principais desvantagens de se trabalhar com material saprolítico são: perda de parte do material original devido ao intemperismo, como o feldspato e os minerais de Li; não identificação de grande parte das relações de contato e das paragêneses entre os minerais analisados (exceção para intercrescimentos ou inclusões); perda da relação espacial do local onde as fases minerais são encontradas (borda e/ou centro do pegmatito); impossibilidade de caracterização da distribuição da granulação no corpo; e presença de material secundário, que nem sempre é fácil de ser diferenciado do primário (alteração/remobilização intempérica).

Um fato que chamou muito a atenção no presente estudo envolve a relação entre o material saprolitizado e o grau de alteração dos minerais pesados dos pegmatitos, principalmente daqueles considerados na literatura como instáveis ou moderadamente estáveis (Pettijohn *et al.*, 1987). Inicialmente imaginava-se que se o pegmatito estivesse fortemente alterado (com o amplo desenvolvimento de caulim a partir do feldspato), a grande maioria dos demais minerais também estaria alterada, principalmente aqueles considerados como instáveis (anfibólio e andaluzita) ou os moderadamente estáveis como epidoto, clinozoisita e granada rica em Fe (Tab. 34). Porém, observou-se que o anfibólio ainda está presente em vários corpos (FA-02, FA-03, FA-06, FA-07, FA-08, FA-12) e a andaluzita em apenas dois (FA-09 e FA-10), enquanto o epidoto e/ou clinozoisita ocorrem em todos os pegmatitos, com exceção do corpo FA-10. Considera-se, nesse caso, que a alteração intempérica da área em questão não foi tão eficiente a ponto de provocar a completa transformação dos minerais instáveis e moderadamente estáveis nos pegmatitos estudados.

Seguindo-se a mesma ideia, podemos considerar que os principais minerais estáveis e ultraestáveis de Pettijohn *et al.* (1987), tais como monazita, apatita, zircão e turmalina (Tab. 34), bem como a cassiterita, gahnita, microlita, columbita-tantalita e

xenotímio, manteriam as suas características mineralógicas preservadas, bem como sua composição química. Em alguns dos minerais estudados, como a ilmenita e a granada rica em Mn (pobre em Fe), apesar de serem classificados como minerais estáveis, foi possível observar a presença de regiões alteradas nas bordas dos grãos ou ao longo de fraturas e planos de clivagem. Porém, até mesmo esses minerais apresentaram composição química preservada em grande parte do volume dos grãos, implicando que o seu estudo microquímico seria uma excelente ferramenta de pesquisa.

Tabela 34 – Estabilidade de alguns minerais pesados segundo Pettijohn *et al.* (1987).

Ultraestável	Rutilo, zircão, turmalina, anatásio
Estável	Apatita, granada (pobre em ferro), estauroлита, monazita, biotita, ilmenita, magnetita
Moderadamente estável	Epidoto, cianita, granada (rica em ferro), sillimanita, titanita, zoisita
Instável	Hornblenda, actinolita, augita, diopsídio, hiperstênio, andaluzita
Muito instável	Olivina

Os minerais pesados geralmente são utilizados como indicadores para estudos de proveniência ou como rastreadores de mineralizações como, por exemplo, a granada para a pesquisa de kimberlitos (e.g. Schulze, 2003) ou para a identificação de áreas fontes de sedimentos (Mange & Morton, 2007). Porém esses minerais geralmente são coletados em material alóctone (sedimentos de corrente, concentrados de bateia, areia de praia, etc.) e na presente tese foi apresentada a utilização de minerais *in situ* em saprólitos como forma de correlacionar os diferentes corpos pegmatíticos da região. Destaca-se que essa metodologia já foi utilizada por Pereira *et al.* (2007b, 2008b) para o estudo das mineralizações de granitos a metais raros e de corpos com cassiterita.

As técnicas analíticas utilizadas no presente estudo foram selecionadas de modo a resolver os problemas mineralógicos em uma ordem crescente de complexidade (e custos). Ressalta-se que a preparação das amostras antes da fase de descrição e classificação mineralógica é um passo extremamente importante. A limpeza do material em ultrassom para retirada de partículas finas (em grande parte argila), assim como sua separação em líquido denso, diminuem o volume de material que seguirá para a classificação magnética, que é realizada somente no

material afundado. O processamento do material no separador magnético isodinâmico Frantz, em conjunto com tabelas de classificação de susceptibilidade de minerais (Rosenblum, 1958; Parfenoff *et. al.*, 1970; Rosenblum & Brownfield, 2000), restringe as faixas de ocorrência dos grãos a serem estudados, diminuindo a possibilidade de serem efetuadas interpretações incorretas durante a identificação em estereomicroscópio, além de reduzirem o erro da sua quantificação.

A microsonda Raman mostrou-se uma poderosa ferramenta de auxílio à estereomicroscopia ajudando na identificação de minerais, pois é uma técnica simples e rápida na obtenção de resultados e, em geral, não exige tratamento prévio da amostra. Sua aplicação é ainda otimizada com a utilização de um banco de dados para comparação dos espectros obtidos com aqueles existentes na literatura e que estão disponíveis através do sítio da internet do projeto Rruff (sítio “rruff.info”; Lafuente *et al.*, 2015). A maior limitação dessa técnica é a presença de fluorescência na região do visível, comumente associada, mas não restrita, a minerais com altos teores de elementos terras raras, U e/ou Th, como, por exemplo, zircão, xenotímio e monazita. Para casos em que a microsonda Raman não se mostra adequada, a utilização do MEV/EDS no modo ambiental em baixo vácuo (sem a necessidade de embutimento, polimento e/ou recobrimento condutor da amostra) pode fornecer bons espectros EDS qualitativos dos principais elementos dos minerais analisados.

Após a identificação das fases presentes, a utilização da microscopia eletrônica de varredura com EDS mostra-se também como uma técnica de grande importância para a classificação dos grupos minerais estudados, principalmente a partir da obtenção de dados qualitativos ou semiquantitativos de química mineral. Tanto a utilização de análises sem padrão (*standardless*), como a com padrões internos, pode ser aplicada na identificação de minerais e/ou nas proporções dos seus membros finais. A química mineral obtida por análises EDS é robusta para a maioria dos minerais analisados, porém mostra limitações na semiquantificação de elementos leves e elementos em teores muito baixos (<1%). A utilização de imagens de elétrons retroespalhados é muito útil na identificação de zonamentos composicionais e, em conjunto com mapas de elementos, é capaz de separar fases minerais que passariam despercebidas em uma análise ótica convencional. Outra aplicação extremamente importante da microscopia eletrônica de varredura é a caracterização das inclusões minerais presentes nos grãos analisados, que devido

às suas dimensões restritas, geralmente não podem ser identificadas através das técnicas analíticas convencionais como a estereomicroscopia ou a microscopia ótica. Por fim a utilização da microsonda eletrônica de varredura com análises por WDS teve como objetivo o refinamento das informações obtidas por MEV/EDS a partir de uma quantificação mais precisa dos elementos químicos presentes nos minerais estudados. Essa é uma técnica mais cara e demorada, o que limitou a sua utilização a alguns minerais selecionados, sendo que suas principais vantagens são: o menor limite de detecção; a geração de resultados quantitativos através da comparação com padrões internacionais; e a menor interferência entre as raias de energia dos elementos através da utilização de cristais analisadores específicos.

Em relação à mineralogia descrita na presente tese, foi caracterizada que ela difere um pouco daquelas já publicadas, principalmente no que se refere ao quantitativo de fases minerais presentes, ou seja, no volume de minerais encontrados. Neste trabalho foram identificados 35 minerais (Tab. 5), enquanto na literatura foram descritos aproximadamente 59 (Tab. 35). Essa diferença se deve, em parte, à escolha de se trabalhar com material saprolítico, onde alguns dos minerais originais já sofreram alteração, mas também porque alguns dos minerais descritos historicamente tiveram seu nome substituído ou foram desacreditados. Alguns exemplos são a djalmaíta citada por Guimarães (1950) e posteriormente reclassificada como uranomicrolita (Hogarth, 1977), ou a bariomicrolita e a própria uranomicrolita descritas por Pereira *et al.* (2008a), sendo que esses minerais compõem o supergrupo do pirocloro, que teve recentemente um novo esquema de nomenclatura proposto (Atencio *et al.*, 2010). Há ainda os minerais pertencentes aos grupos da columbita-euxenita, do pirocloro e da microlita que não foram estudados em detalhe na presente tese, sendo aqui descritos genericamente com o nome do próprio grupo. Cabe ainda salientar, que não foram estudados os corpos pegmatíticos da área da Volta Grande, que são conhecidos por apresentarem minerais de Li (espodumênio, amblygonita, litiofilita, bityita, holmquistita, micas com Li), Be (berilo, fenacita, bityita), do grupo da columbita-euxenita (euxenita, policrasita) e outros minerais de Nb e/ou Ta (fergusonita, betafita, ixiolita, samarskita). Porém foram identificados alguns minerais (anatásio, andaluzita, cianita e clinozoisita) que ainda não haviam sido descritos na região.

Tabela 35 – Minerais descritos historicamente na Província Pegmatítica de São João del Rei e minerais identificados na presente tese (marcados com X na coluna a esquerda). Os minerais foram agrupados para facilitar a comparação dos dados (descrições originais entre parênteses). A ordem dos minerais segue a que é encontrada na literatura.

	<i>Minerais descritos na literatura*</i>	<i>Tese</i>		<i>Minerais descritos na literatura*</i>	<i>Tese</i>
1	Cassiterita	x	30	Bityita	
2	Espodumênio (kunzita)		31	Ilmenita	x
3	Lepidolita		32	Gahnita	x
4	Turmalina	x	33	Ixiolita	
5	Granada (espessartita)	x	34	Pirocloro	x
6	Berilo		35	Samarskita	
7	Magnetita	x	36	Magnesita	
8	Titanita	x	37	Hematita	x
9	Monazita	x	38	Goethita	x
10	Xenotímio	x	39	Rutilo	x
11	Topázio		40	Brookita	x
12	Ambligonita		41	Estaurolita	x
13	Muscovita (mica)	x	42	Caulinita	x
14	Plagioclásio (albita-oligoclásio, albita)	x	43	Apatita	x
15	Quartzo	x	44	Flogopita	
16	Zircão (zircão hafnífero, zirconita, cyrtolita)	x	45	Fluorita	
17	Euxenita		46	Hafnã	
18	Policrasita		47	Brabantita (atualmente cheralita)	
19	Fergusonita		48	Torogumita	
20	Betafita (não existe espécie válida)		49	Torita	x
21	Zinnwaldita (atualmente siderofilita -polilitonita)		50	Esfalerita	x
22	Biotita	x	51	Wodginita	x
23	Epidoto	x	52	Anfibólio (kaersutita, hornblenda, holmquistita, antofilita)	x
24	Columbita	x	53	Pirita (limonitizada)	x
25	Fenacita		54	Polucita	
26	Tantalita (Alvarolita)	x	55	Calcita	
27	Microlita (djalmaita, uranomicrolita, bariomicrolita)	x	56	Grafita	
28	Litiofilita		57	Ferrowodginita	x
29	Feldspato (ortoclásio, microclina)	x	58	Oxi-hidróxidos de Fe	x
			59	Oxi-hidróxidos de Mn	x

* As referências originais de descrição dos minerais estão na tabela 5.

Um diferencial dos resultados de mineralogia aqui apresentados, em relação aos atualmente disponíveis na literatura, é a utilização de dados sobre as inclusões sólidas como ferramenta auxiliar tanto para interpretações relativas à gênese do pegmatito, quanto para a caracterização das interações entre fases ou alterações presentes nos grãos. A identificação dos tipos de inclusões, sua distribuição, assim

como sua composição podem ser obtidas através de análises por MEV/EDS e sua aplicação já vem sendo utilizada nos últimos anos na caracterização não apenas da fase mineral de interesse, mas também na identificação das inclusões presentes (Pereira *et al.*, 2004a, 2004b, 2008a, 2008b).

Historicamente, os corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei foram descritos como intrusivos em dois tipos de rochas: granitos/quartzo-dioritos (tipo Santa Rita) ou biotita gnaisses (tipo Nazareno) segundo proposta de Rolff (1947, 1948a), bem como em gnaisses ou anfibólio xistos de acordo com Francesconi (1972). A partir desse estudo foi possível observar que, na verdade, há uma maior diversidade de rochas que os pegmatitos intrudem, que são representadas por: metadiorito Brumado, metagranitoide Ritápolis, filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, ortogneisse Cassiterita, e outras rochas encaixantes, tendo como exemplos os ortogneisses São Tiago (Campos *et al.*, 2009) e Resende Costa (Rodrigues *et al.*, 2013).

Outra observação é que a composição mineralógica dos concentrados de minerais pesados dos diferentes pegmatitos estudados parece ser, ao menos em parte, condicionada às diferentes rochas encaixantes que ocorrem na região, sendo que os corpos pegmatíticos intrusivos no metadiorito Brumado apresentam um predomínio de cassiterita, columbita-tantalita e granada, enquanto os pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis se caracterizam pela maior quantidade de columbita-tantalita e ilmenita (Fig. 81). De forma contrastante, os corpos pegmatíticos intrusivos nas rochas que compõem a sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentam uma maior complexidade de fases presentes, sendo que os pegmatitos intrusivos nos filitos possuem uma grande contribuição de fases aluminosas (gahnita na amostra FA-09 e andaluzita na amostra FA-10), enquanto os corpos pegmatíticos intrusivos nos anfibolitos apresentaram columbita-tantalita e uma importante participação de fases fosfáticas ricas em ETR, representadas por monazita e xenotímio (Fig. 81). Já os corpos pegmatíticos associados ao ortogneisse Cassiterita tiveram como maior característica a ausência de minerais do grupo da columbita-euxenita e também de cassiterita, encontrados nos demais corpos estudados.

A presença de alguns minerais, apesar de comuns, ajuda a confirmar a interação entre os pegmatitos e suas rochas encaixantes. O anfibólio foi encontrado

principalmente nos corpos pegmatíticos intrusivos tanto no metadiorito Brumado, quanto nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, que são litótipos que apresentam esse mineral de forma abundante (Ávila, 2000; Ávila *et al.*, 2008). Nesse sentido, propõe-se que o anfibólio poderia corresponder a xenocristais nos pegmatitos ou a uma fase que se formaria a partir da reação desse com sua rocha encaixante, como no caso da formação da holmquistita nas bordas do corpo A da mina da Volta Grande (Québécois & Lagache, 1994).

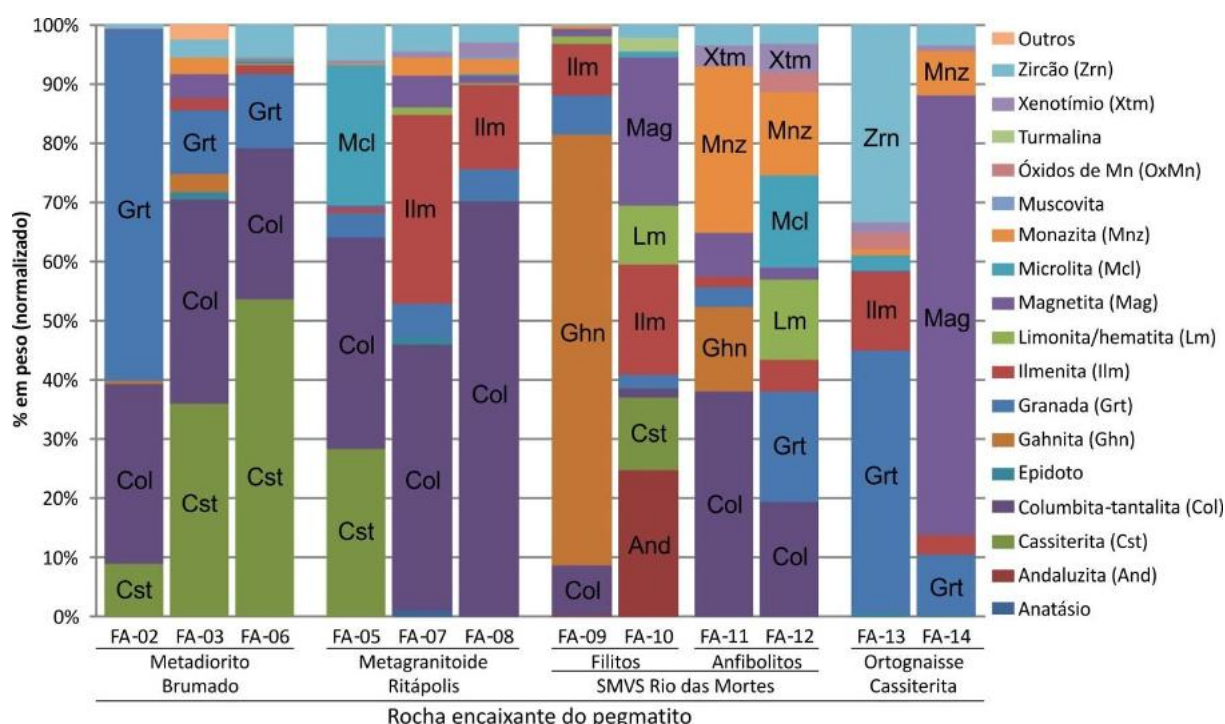


Figura 81 – Distribuição em % em peso normalizada das principais fases minerais encontradas nos pegmatitos estudados, separados por tipo de rocha encaixante. SMVS = sequência metavulcano-sedimentar.

A andaluzita (Al_2SiO_5) é um mineral que não é encontrado na grande maioria dos pegmatitos estudados, pois a sua formação implica na presença de Al em excesso e deficiência de Na, Ca e/ou K, impossibilitando a cristalização preferencial de feldspato. Nesse caso, a presença de andaluzita somente nos dois corpos pegmatíticos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-09 e FA-10) aponta para um forte controle litológico para a formação desse mineral. Tendo em vista que o filito é uma rocha rica em filossilicatos, sugere-se que a quebra desses minerais e a assimilação parcial desse material pelos pegmatitos poderia corresponder à fonte do Al necessário para a formação da andaluzita. A estauroлита [$\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{23}(\text{OH})$] é outro mineral rico em Al e, assim como

a andaluzita, necessita desse elemento para a sua formação. No caso da área estudada, a estaurólita também está presente unicamente nos corpos pegmatíticos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-09 e FA-10), sugerindo-se que sua formação também estaria associada à quebra e assimilação de minerais ricos em Al do filito pelo pegmatito. Nesse mesmo contexto, destaca-se que o corpo pegmatítico FA-09 apresenta uma elevada proporção de gahnita (ZnAl_2O_4) dentre seus minerais pesados, que requer, além de Al, também Zn. Nesse caso, propõe-se que a fonte desses dois elementos também seriam os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, tendo em vista que pegmatitos normalmente são pobres em Zn. Cabe destacar que a gahnita também ocorre em outros corpos pegmatíticos, e que nesse caso a fonte do Zn para a sua formação deveria estar relacionada a outras rochas encaixantes.

A partir dos dados obtidos pela mineralogia é possível separar os pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita (amostras FA-13 e FA-14) daqueles intrusivos nos demais corpos estudados (metadiorito Brumado, metagranitoide Ritápolis e filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes) devido à ausência de cassiterita, de columbita/tantalita e de gahnita (Tab. 7 e Fig. 20). Outra feição utilizada foi a composição química distinta apresentada pelos grãos de ilmenita, granada e xenotímio dos pegmatitos do ortogneisse, indicando uma fonte diferente para os mesmos. A ilmenita apresenta grãos mais ricos em pirofanita (membro manganesífero; Fig. 43), enquanto a granada apresenta uma composição mais rica em Mg e também em Ca e seus grãos formam um agrupamento separado dos demais no diagrama ternário $X_{\text{Fe}+\text{Mn}}-X_{\text{Ca}}-X_{\text{Mg}}$ (Fig. 53). No caso do xenotímio, esse mineral apresenta menores teores de ETR leves e intermediários (Fig. 61) em relação aos demais corpos.

Em relação aos outros corpos pegmatíticos estudados, os resultados mineralógicos apresentaram algumas características específicas:

1) A composição da cassiterita variou muito pouco entre os corpos analisados, e é definida por $\text{Sn}_{0,88-1,0}\text{Ta}_{0-0,8}\text{Nb}_{0-0,4}\text{Fe}_{0-0,4}\text{Mn}_{0-0,1}\text{O}_2$ (*apfu*). Ela apresenta teores elevados de Ta e Nb, com predomínio do Ta, sendo que parte destes elementos podem estar presentes na forma de microinclusões de columbita e/ou tantalita. Os grãos de cassiterita dos pegmatitos que intrudem o metadiorito Brumado e o metagranitoide Ritápolis foram os que apresentaram os teores mais elevados de Nb.

Foi possível ainda caracterizar que algumas das inclusões observadas na cassiterita dos pegmatitos que intrudem os filitos da sequência metavulcano-sedimentar são de columbita-(Mn) e tantalita-(Mn), pouco observadas nos grãos dos demais corpos. A presença desses minerais indica que, nesse caso, não houve a exsolução dos niobo-tantalatos e, portanto eles seriam anteriores à formação da cassiterita, representando no caso inclusões. A presença de duas gerações de cassiterita conforme proposto por Pereira *et al.* (2004b) não pôde ser confirmada nesse trabalho. Segundo esses autores a ocorrência de inclusões de microlita, microlita rica em Ba (anteriormente chamada bariomicrolita), zircão hafnífero e hafnã zirconífero estariam associadas a um evento hidrotermal e a presença de inclusões desse tipo na cassiterita seriam o indicio de uma segunda geração desse mineral. Nesse trabalho não foram encontradas as inclusões de zircão hafnífero e nem de hafnã zirconífero, enquanto a microlita rica em Pb (plumbomicrolita) e a rica em Ba ocorrem exclusivamente preenchendo fraturas e/ou vazios, bem como também estão presentes nas bordas dos grãos de cassiterita, confirmando apenas um caráter secundário para esses minerais. Por outro lado, a presença de cristais euédricos e anédricos em uma mesma população pode ser um início da presença das duas gerações propostas por esses autores.

2) A gahnita apresenta composição definida por $Ghn_{65,52-85,38}Spl_{0-2,16}Hc_{13,71-31,92}Jac_{0-0,92}Mfr_{0-1,22}Glx_{0-1,11}$ (% mol normalizado), sendo que os valores mais altos do membro final rico em Zn, indicando um maior fracionamento do pegmatito, foram observados nos grãos provenientes dos corpos intrusivos no metadiorito Brumado (Fig. 32). As amostras menos diferenciadas estão associadas aos pegmatitos hospedados por anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, que ainda apresentaram um pequeno enriquecimento em Mg (espinélio estrito senso), como observado por Faulstich *et al.* (2016, no prelo).

3) A ilmenita apresentou composição definida pelos limites $Ilm_{81,2-98,4}Php_{0,7-18,4}Gk_{0-1,6}Hem_{0-11,7}Crn_{0-0,1}$ (% em mol normalizado), sendo que as variações na sua composição ocorreram em todos os corpos estudados, sem um padrão direto com a rocha encaixante. Os teores de Fe^{3+} encontrados apontam para a presença de duas gerações de ilmenita, que teriam sido formadas em diferentes estados de oxidação do fluido presente (Fig. 41 e 42). Nesse caso, os maiores teores de Fe^{3+} foram

encontrados nos grãos de ilmenita provenientes dos corpos pegmatíticos intrusivos no metadiorito Brumado e no metagranitoide Ritápolis.

4) A granada estudada é formada majoritariamente por moléculas de spessartina e almandina, apresentando composição definida pelos limites $\text{Sps}_{14,7-93,2}\text{Prp}_{0-11,9}\text{Alm}_{3,6-80,6}\text{Grs}_{0-30,2}\text{Adr}_{0-0,5}$ (% mol normalizado). Segundo Černý *et al.* (1985) quanto mais enriquecida em Mn é uma granada, mais fracionado seria o magma onde ela cristalizou. Nesse caso, os grãos de granada dos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado apresentaram os maiores teores de Mn e as menores razões Fe/Mn, indicando que estes corpos foram gerados a partir de um fracionamento mais acentuado. No diagrama ternário $X_{\text{Fe+Mn}}-X_{\text{Ca}}-X_{\text{Mg}}$ também é possível observar que a granada desses corpos se separa daquelas dos demais corpos (Fig. 53), posicionando-se bem próximo ao vértice Fe+Mn. Outra observação é que foram encontrados grãos de granada rica em Ca em dois dos corpos pegmatíticos estudados que intrudem, respectivamente, o metagranitoide Ritápolis e os filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes, indicando uma gênese diferente para parte da granada encontrada.

Por fim, foram encontrados diversos grãos de zircão nos corpos pegmatíticos com idades bastante variadas e diferentes daquelas obtidas para a cristalização dos mesmos. Nesse caso, admite-se que a grande maioria desses grãos seriam xenocristais de rochas envolvidas na formação dos pegmatitos como, por exemplo, o grão com idade arqueana de 3052 ± 29 Ma presente no corpo intrusivo no metadiorito Brumado. Outros grãos nos pegmatitos apresentaram idades semelhantes às encontradas em corpos plutônicos mais antigos da região como, por exemplo, 2480 ± 30 Ma (compatível com a idade do ortognaisse Cassiterita de 2472 ± 11 Ma; Ávila, inf. verbal) e 2353 ± 41 Ma, 2342 ± 34 Ma, 2337 ± 31 Ma e 2309 ± 52 Ma (semelhantes à idade do ortognaisse Resende Costa que varia de 2351 ± 48 Ma a 2317 ± 16 Ma; Teixeira *et al.*, 2015), indicando que esses grãos também poderiam estar relacionados com a assimilação de rochas mais antigas, no caso siderianas. Foi ainda observada uma grande quantidade de grãos de zircão no pegmatito intrusivo nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (FA-12), com idades variando entre 2198 ± 41 Ma e 2178 ± 38 Ma. Esse intervalo é compatível com as idades encontradas nos anfibolitos da região estudada, que variaram de 2231 ± 5 Ma a 2202 ± 11 Ma (Ávila *et al.*, 2012) e

com as idades encontradas por Ávila *et al.* (2006b) e Teixeira *et al.* (2008, 2015) em alguns dos corpos riacianos do arco Ritápolis, que corresponde à unidade geológica que abriga os corpos plutônicos onde os pegmatitos estão encaixados.

A subdivisão dos pegmatitos em classes conforme proposto por Ginsburg (1984) e revisado por Černý *et al.* (2012) não foi utilizada para os corpos estudados, pois segundo London (2008) este esquema de classificação é puramente genético, com classes fracamente definidas e que se sobrepõem na grande maioria dos casos. Porém se utilizarmos a proposta de classificação em famílias de Černý (1991) que é muito mais difundida, os corpos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei podem ser classificados como do tipo LCT (lítio, céσιο, tântalo), sendo que para London (2008), a natureza peraluminosa dos pegmatitos da família LCT é expressa pela presença de muscovita, turmalina, granada rica em spessartina, gahnita, topázio ou andaluzita. Desses minerais apenas o topázio não foi encontrado entre os corpos estudados (porém já descrito na província; Tab. 35), corroborando-se dessa forma a presente proposta. Outras características dos corpos dessa família e que foram observadas nos pegmatitos estudados são: i) maior proporção de Ta em relação ao Nb (Fig. 82); ii) presença de fosfatos de ETR (monazita e xenotímio) e de turmalina (Fig. 81). Segundo Černý (1991), pegmatitos da família NYF são extremamente depletados em fósforo, não apresentam turmalina, o conteúdo de Nb é superior ao de Ta e podem ser ricos em fluorita, sendo que nenhuma dessas características foi observada nos corpos estudados.

Em relação ao ambiente tectônico de formação, os pegmatitos da família LCT são mais comumente associados a granitos do tipo S, porém Černý (1991) descreveu que granitos do tipo I, que são gerados a partir de fontes ígneas máficas a intermediárias incluindo rochas metassedimentares imaturas de proveniência ígnea, também podem evoluir para composições peraluminosas ricas em Li, Rb, Be, F, B, Sn e Ta. Segundo London (2008) esses pegmatitos podem ser classificados como do tipo LCT, mesmo não apresentando o enriquecimento característico em Cs. Já os pegmatitos da família NYF são associados a granitos do tipo A ou intraplacas, com fusão profunda da crosta, incluindo alguma contribuição química de fontes mantélicas.

Admite-se que os pegmatitos estudados estariam relacionados com o plúton Ritápolis, e que a origem desse corpo ainda não é plenamente definida (Souza,

2009), principalmente em relação ao tipo de fonte envolvida (tipo I, S ou misto I/S). Porém algumas propostas de ambiente geotectônico para a formação do referido corpo já foram aventadas na literatura, dentre as quais: granito formado por refusão ao longo da zona de colisão entre paleocontinentes ao final do Arqueano ou Proterozoico Inferior (Pires & Porto Júnior, 1986); "granitoide" tipo I formado durante a evolução de um arco magmático Paleoproterozoico com contaminação crustal envolvendo componentes ígneos e sedimentares (Ávila *et al.*, 2006). Nesse caso todas as propostas envolvem um ambiente orogênico, excluindo dessa forma o caráter anorogênico ou intraplacas para o corpo Ritápolis e com isso impossibilitando a correlação dos pegmatitos à família NYF.

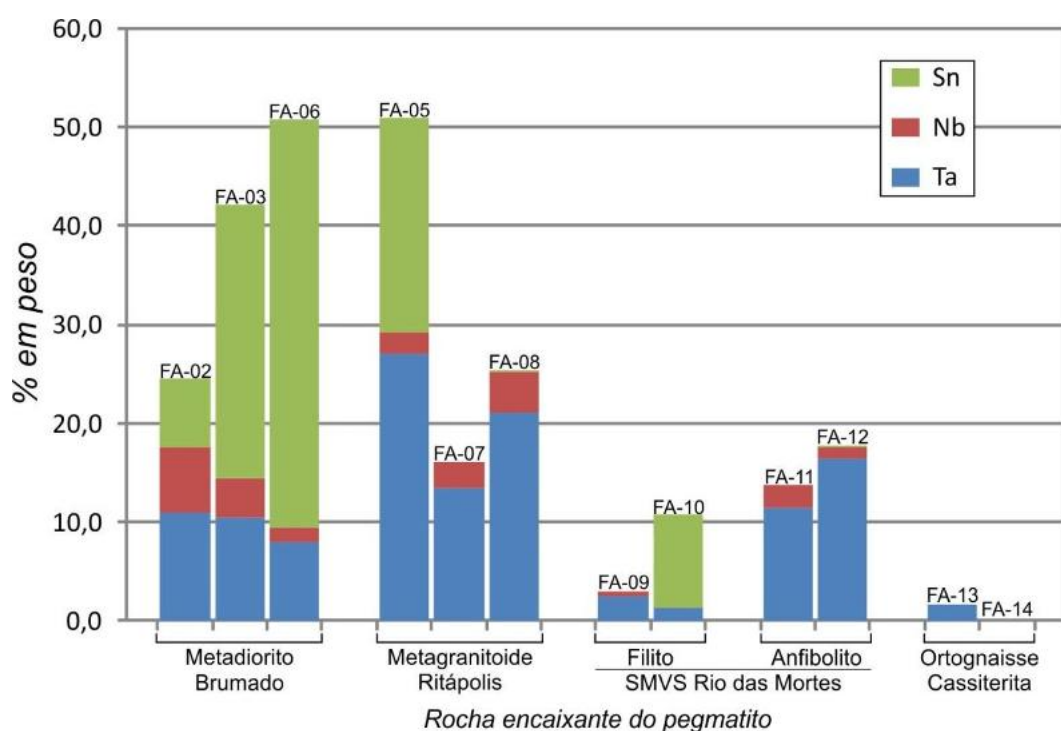


Figura 82 – Distribuição dos elementos Sn, Nb e Ta nos concentrados de minerais pesados dos corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Os corpos foram agrupados segundo suas rochas encaixantes. Os dados foram obtidos a partir da composição química média dos minerais encontrados e sua proporção em cada concentrado.

13 CONCLUSÕES

Através dos estudos realizados na presente tese foi possível responder a algumas das dúvidas levantadas sobre os pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei (vide página 4), dentre as quais:

i) Todos os corpos pegmatíticos são mineralizados?

Não. Dentre os diferentes corpos pegmatíticos estudados, aqueles que intrudem o ortogneisse Cassiterita (FA-13 e FA-14) não apresentaram mineralização em Sn (ausência de cassiterita) e tampouco em Ta e/ou Nb (sem minerais do grupo da columbita-euxenita). Apenas um desses corpos (amostra FA-13) apresentou microlita dentre os minerais pesados, porém em baixa proporção - cerca de 2,5% em peso do concentrado, que representa menos de 0,01% do volume total do pegmatito.

A figura 83 apresenta a distribuição dos elementos químicos mais importantes dos minerais de minério desses pegmatitos, sendo que o Sn é proveniente da cassiterita e o Nb/Ta advém, principalmente, dos minerais do grupo da columbita-euxenita e, subordinadamente, dos grupos da microlita e do pirocloro. Os dados apresentados são um resultado aproximado da distribuição desses elementos, pois foram utilizados os seguintes condicionantes:

1 – Os minerais do grupo da columbita-euxenita são representados por aproximadamente 40% de columbita e 60% de tantalita, sendo que a columbita contém 40% em peso de Nb e 15% em peso de Ta, enquanto a tantalita apresenta 10% em peso de Nb e 50% em peso de Ta. Esses dados foram obtidos através do levantamento preliminar realizado em MEV/EDS;

2 – O conteúdo de Sn na cassiterita refere-se ao valor médio das análises obtidas por microsonda eletrônica/WDS (77% em peso de Sn);

3 – O conteúdo de Ta na microlita é aquele descrito na literatura (68,4% em peso), pois não foram realizadas análises de MEV/EDS e nem de ME/WDS nesse grupo de minerais;

4 – O valor apresentado na figura 83 representa o teor dos elementos no concentrado de minerais pesados e não do corpo estudado.

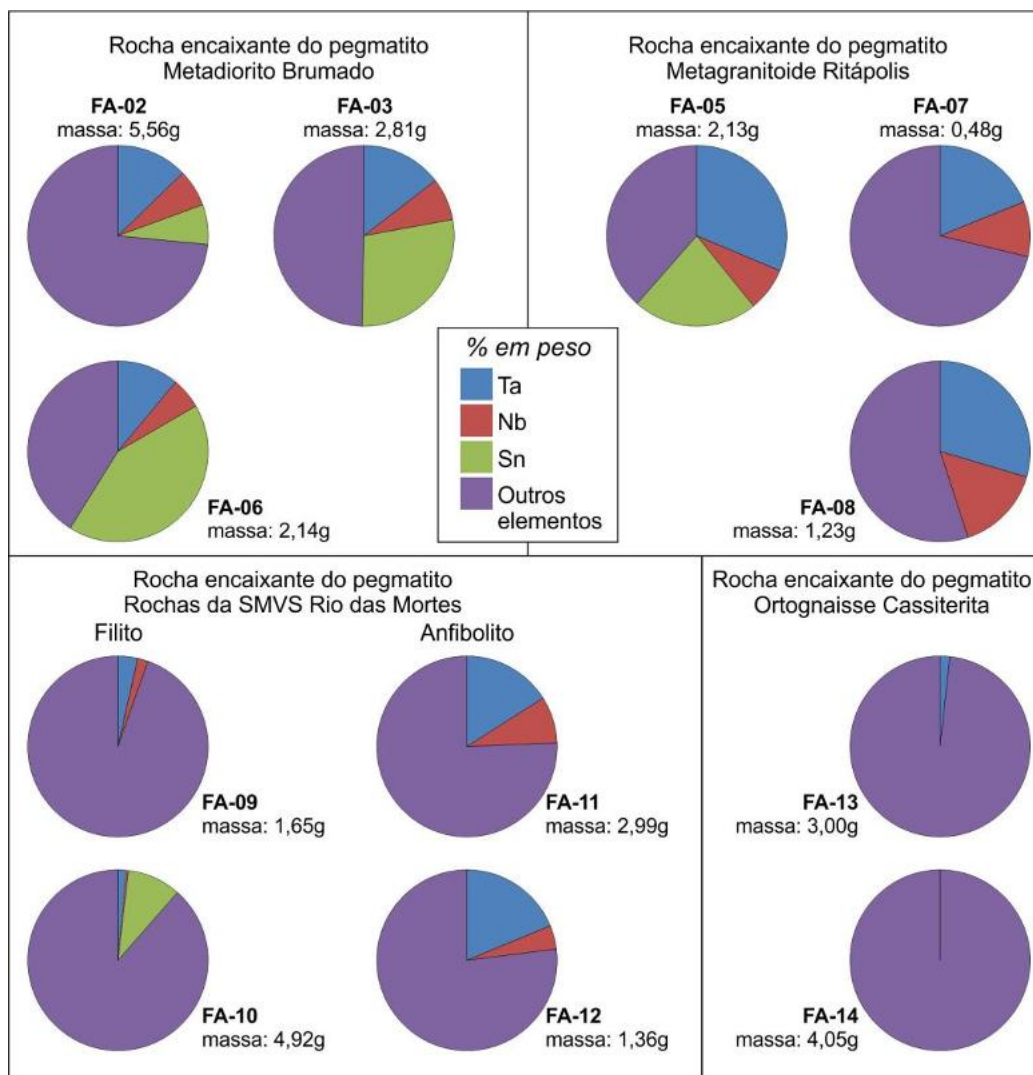


Figura 83 – Distribuição normalizada dos elementos Sn, Nb e Ta nos concentrados de minerais pesados dos corpos pegmatíticos estudados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Os corpos foram agrupados segundo suas rochas encaixantes.

ii) Os minerais econômicos estão distribuídos ao longo da província?

Em relação à distribuição dos elementos químicos de interesse econômico na Província Pegmatítica de São João del Rei (Fig. 83) é possível observar que esses ocorrem em quase todos os corpos pegmatíticos estudados, porém em diferentes concentrações. As únicas exceções são os pegmatitos intrusivos no ortognaisse Cassiterita, onde o corpo FA-14 não apresenta nenhum mineral de interesse econômico, enquanto que no corpo FA-13 foi encontrado somente microlita. Caracterizou-se, ainda, que a mineralização em Sn (cassiterita) é mais abundante nos pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado, enquanto a mineralização em Ta/Nb (columbita/tantalita e microlita) está presente entre os diferentes pegmatitos estudados, principalmente nos corpos intrusivos no metagranitoide Ritápolis e no

metadiorito Brumado. Os pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentaram os menores teores de Ta, sendo apenas um pouco mais elevados que o encontrado nos pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita (Fig. 83). A grande diferença é que para os pegmatitos intrusivos no ortogneisse Cassiterita, o Ta é proveniente exclusivamente da microlita, tendo em vista a ausência de columbita/tantalita.

iii) A mineralogia desses corpos é semelhante?

Na grande maioria dos corpos sim, porém os principais minerais dos pegmatitos apresentam concentrações bem distintas (Fig. 81), sendo que esses podem ser exclusivos de alguns corpos (p. ex. andaluzita) ou estarem ausentes em outros (p. ex. ilmenita na amostra FA-02). Em termos gerais, os principais minerais dos pegmatitos estudados são columbita-tantalita, granada, ilmenita, magnetita e zircão, enquanto cassiterita, gahnita, microlita, monazita e xenotímio ocorrem na grande maioria dos corpos, porém em proporções variadas (Fig. 81). Andaluzita foi encontrada apenas nos pegmatitos intrusivos nos filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostras FA-09 e FA-10), enquanto monazita e xenotímio apresentam uma concentração mais elevada nos corpos pegmatíticos intrusivos nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (amostras FA-11 e FA-12), sendo que a cassiterita está praticamente ausente nesses corpos (Fig. 81).

iv) Os pegmatitos estão associados a um ou vários pulsos mineralizadores?

Em relação à contemporaneidade ou não dos corpos da Província Pegmatítica de São João del Rei, grande parte dos estudos apontaram para uma única geração (Rolff, 1947; 1948a) ou no máximo para duas gerações cogenéticas (Guimarães & Guedes, 1944; Heinrich, 1964). Com os estudos dos últimos anos foram identificadas pelo menos quatro gerações de pegmatitos, com idades que variam desde o Neoarqueano até o Riáciano, sendo essas gerações representadas por: i) Corpos aflorantes na região de São Tiago, deformados e dobrados, cuja idade Neoarqueana de 2665 ± 47 Ma os correlaciona ao protólito do ortogneisse São Tiago (2679 ± 3 Ma; Simon, 2016). Porém não existe informação quanto à presença de cassiterita ou columbita-tantalita nesses corpos. Segundo Ávila (inf. verbal) existe

uma geração mais nova de corpos pegmatíticos que cortam o ortogneisse São Tiago e que é escassamente mineralizada em columbita-tantalita. ii) Corpos encontrados na região próxima a cidade de Cassiterita que apresentaram idade sideriana de 2489 ± 10 Ma (neste trabalho) e que estariam associados ao ortogneisse Cassiterita, que possui idade de cristalização de 2472 ± 11 Ma (Ávila, inf. verbal). Esses corpos foram caracterizados como não mineralizados em columbita-tantalita e cassiterita. iii) Corpos aflorantes na região de Itutinga e Itumirim com idade riaciana de 2158 ± 27 Ma e que estariam relacionados ao metagranitoide Represa de Camargos, cuja idade de cristalização é de 2170 ± 36 Ma (Barbosa *et al.*, 2015) e, segundo Pereira (inf. verbal), apresenta mineralização em cassiterita. iv) Corpos expostos na região entre Nazareno e Ritópolis que são mineralizados em cassiterita, columbita-tantalita e microlita. Essa geração apresentou idade riaciana entre 2129 ± 33 Ma e 2121 ± 9 Ma (neste trabalho).

Essa grande variedade de idades, em conjunto com a diversidade de corpos plutônicos encontrados na área (ortogneisses São Tiago, Resende Costa, Morro do Resende e Cassiterita, metagranitoide Ritópolis, metadiorito Brumado, metagranitoide Represa de Camargos, Nazareno e Ribeirão do Amaral, entre outros), indica uma evolução complexa com recorrência de eventos pegmatíticos, podendo as diferentes gerações estar mineralizadas ou não. O enriquecimento da última geração de corpos pegmatíticos em elementos de interesse econômico (Sn-Nb-Ta) parece estar associado a alguns fatores, dentre os quais a fonte dos corpos pegmatíticos, o seu fracionamento, e a interação com as rochas encaixantes.

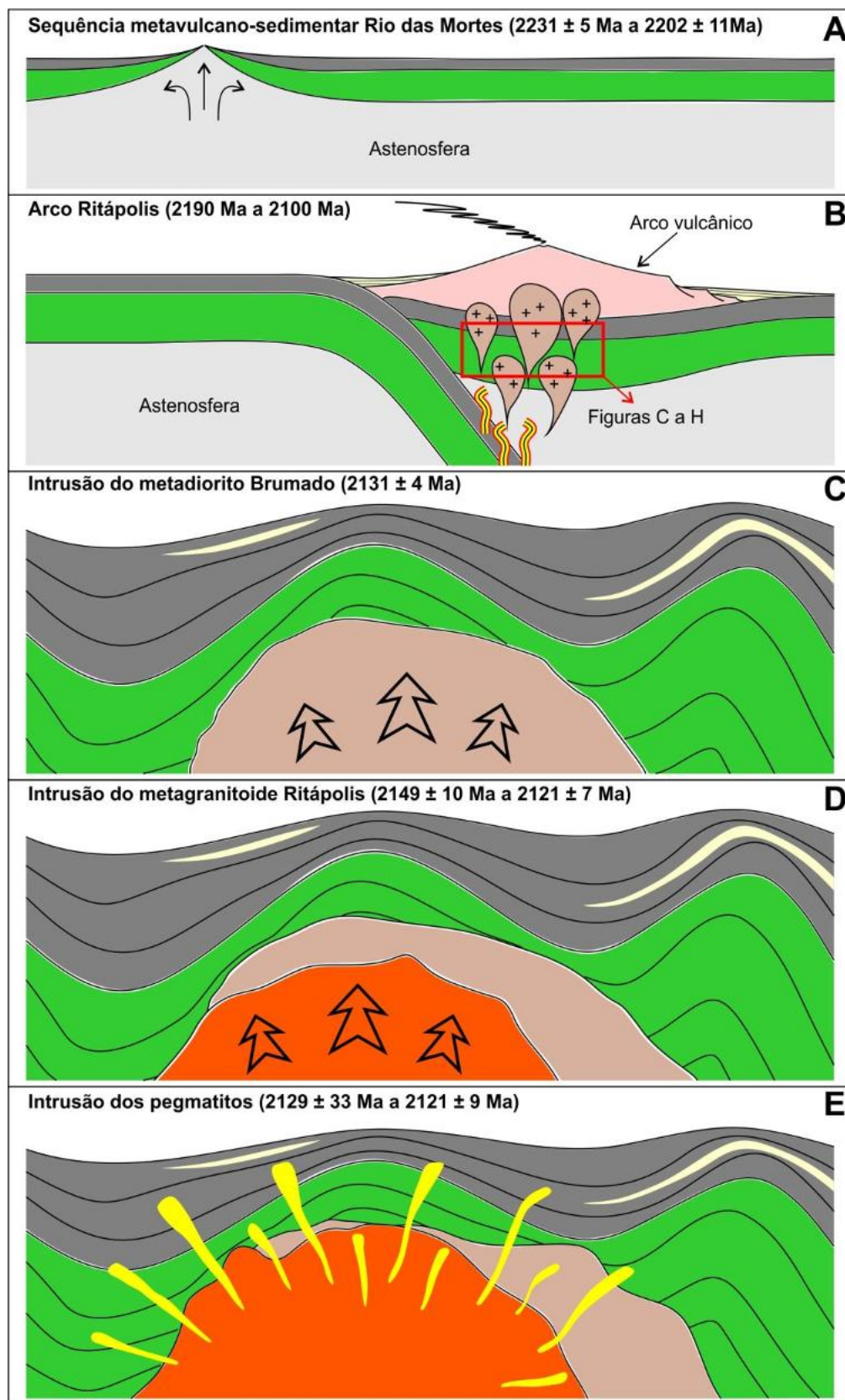
v) Os pegmatitos estão relacionados geneticamente ao metagranitoide Ritópolis? Ou a outros corpos plutônicos que ocorrem na área?

Com exceção dos corpos pegmatíticos que intrudem o ortogneisse Cassiterita, os demais corpos estão diretamente relacionados ao metagranitoide Ritópolis. Essa correlação genética pode ser embasada pelas semelhanças na mineralogia dos concentrados de minerais pesados, assim como pelas idades U-Pb LA-ICPMS obtidas. Em termos gerais as idades encontradas nos grãos de zircão das amostras FA-03 (2121 ± 28 Ma; pegmatito intrusivo no metadiorito Brumado), FA-08 (2121 ± 9 Ma - pegmatito intrusivo no metagranitoide Ritópolis) e FA-12 (2129 ± 33 Ma - pegmatito intrusivo no anfibolito da sequência metavulcano-sedimentar Rio das

Mortes) são muito semelhantes ao intervalo temporal admitido para o metagranitoide Ritápolis, que varia de 2149 ± 10 Ma (Teixeira *et al.*, 2015) até 2121 ± 7 Ma (Ávila, 2000).

A partir do conjunto de dados obtidos é possível apresentar um modelo de evolução geológica para parte da Província Pegmatítica de São João del Rei. Essa evolução está relacionada à formação de uma crosta oceânica entre 2231 ± 5 Ma e 2202 ± 11 Ma (Fig. 84a), cuja subducção formou o arco Ritápolis (Fig. 84b) e propiciou a geração de intrusões plutônicas intermediárias (metadiorito Brumado - 2131 ± 4 Ma) na sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Fig. 84c). No intervalo entre 2149 ± 10 e 2121 ± 7 Ma (Fig. 84d) tanto a sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes quanto o metadiorito Brumado foram intrudidos pelo metagranitoide Ritápolis e pelos corpos pegmatíticos associados (Fig. 84e).

A interpretação dos dados obtidos pela mineralogia, em conjunto com a química mineral, indica que ocorreu um fracionamento dos corpos, onde os pegmatitos intrusivos no metadiorito Brumado seriam os mais evoluídos, seguidos pelos pegmatitos intrusivos no metagranitoide Ritápolis. Os corpos intrusivos nos filitos e anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes apresentaram indícios de um menor fracionamento, mas também são os mais modificados em sua mineralogia a partir da interação com as rochas encaixantes. Esse fracionamento seria um indicativo do nível crustal de colocação dos corpos pegmatíticos, sendo que a intrusão dos pegmatitos nas rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes ocorreu em nível mais profundo e a dos pegmatitos no metadiorito Brumado em um nível mais raso, acima da cúpula do metagranitoide Ritápolis (Fig. 84f). Convém ressaltar que os níveis de profundidade aqui citados são relativos e, segundo London (2008), a profundidade mínima de cristalização de pegmatitos miarolíticos (que cristalizaram em níveis mais rasos que os aqui estudados) varia de 4 a 5 km (~150 Mpa). Hoje, devido à intensa movimentação de blocos através de diversas falhas geradas durante a história geológica da região (Fig. 84g), estes corpos, que foram colocados em diferentes níveis crustais, encontram-se lado a lado. Sugere-se que os corpos pegmatíticos mais fracionados se encontram totalmente erodidos (Fig. 84h).



Continua na próxima página.

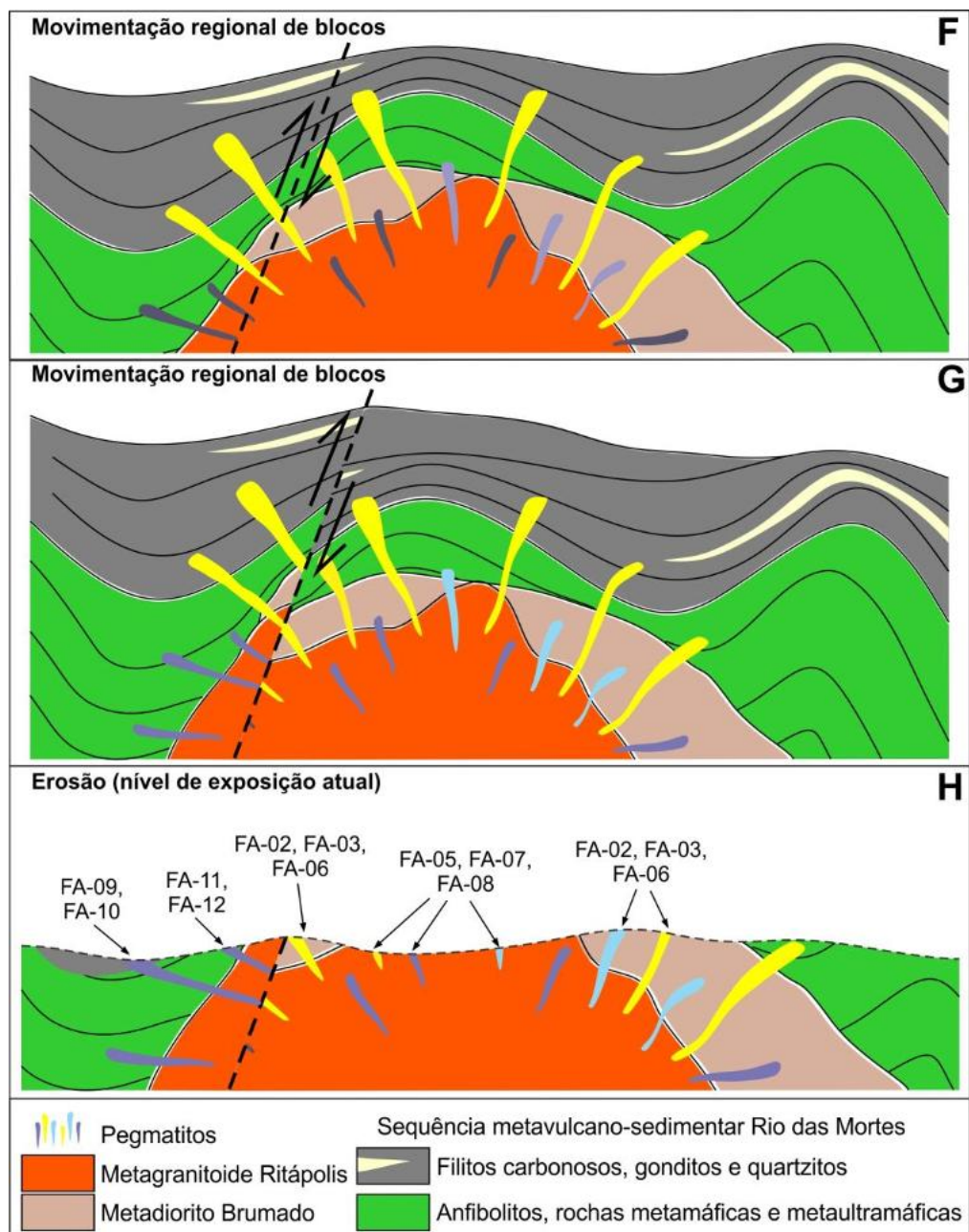


Figura 84 – Esboço evolutivo do arco Ritápolis com ênfase na intrusão de parte dos corpos pegmatíticos da Província Pegmatítica de São João del Rei. (A) Formação de crosta oceânica e rochas associadas (sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes) no Riacciano entre 2231 ± 5 Ma e 2202 ± 11 Ma. (B) Subducção da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e formação do plutonismo associado ao arco Ritápolis (2190 a 2100 Ma). (C) Detalhe da figura B mostrando a intrusão do metadiorito Brumado (2131 ± 4 Ma) nos anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. (D) Intrusão do metagranitoide Ritápolis (2149 ± 10 Ma a 2121 ± 7 Ma) na sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes e no metadiorito Brumado. (E) Injeção dos diques pegmatíticos (2129 ± 33 Ma a 2121 ± 9 Ma) nas rochas hospedeiras. (F) Diques pegmatíticos com diferentes cores indicando níveis crustais e de fracionamento distintos. Amarelo: corpos mais rasos e mais fracionados; azul claro: corpos com níveis intermediários de fracionamento e profundidade; azul escuro: corpos mais profundos e primitivos. (G) Movimentação regional sugerida dos blocos e colocação de corpos profundos ao lado de corpos mais rasos e fracionados. (H) Erosão do arco e atual nível de exposição de alguns dos corpos pegmatíticos intrusivos em rochas hospedeiras de diferentes níveis crustais (anfibolitos, filitos, metadiorito e metagranitoide).

14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1): 127-139.
- Alkmim, F.F. & Noce, C.M. (eds.) 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Field Guide & Abstracts, 114 p.
- Alkmim, F.F. 2004. O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B. (orgs.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 17-35.
- Alkmim, F.F.; Brito-Neves, B.B.; Alves, J.A.C. 1993. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: J.M.L. Dominguez & A. Misi. (orgs.), *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG-BA, p. 45-62.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.
- Alves de Souza, H.C. 1943. As bêtas e a cassiterita de São João del Rei. *Revista Brasileira de Geografia*, 5(2): 195-214.
- Anderson, A. 1984. The geochemistry, mineralogy and petrology of the Cross Lake Pegmatite Field, Central Manitoba. Dissertação de Mestrado, Universidade de Manitoba, Winnipeg. 251 p.
- Assumpção, C.S. 2015. Caracterização Mineralógica e Geoquímica do Pegmatito da Mina de Volta Grande, Província Pegmatítica de São João Del Rei, Nazareno, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais. 86 p.
- Atencio, D.; Andrade, M.B.; Christy, A.G.; Gieré, R. Kartashov, P.M. 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *Canadian Mineralogist*, 48: 673-698.
- Ávila, C.A. 2000. Geologia, petrografia e geocronologia de corpos plutônicos Paleoproterozoicos da borda meridional do Cráton São Francisco, região de São João del Rei, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 401 p.
- Ávila, C.A.; Barrueto, H.R.; Valença, J.G.; Ribeiro, A.; Pereira, R.M. 2007. Petrografia e evolução magmática da Suíte Serrinha, porção meridional do Cráton São Francisco, Estado de Minas Gerais, Brasil. *Arquivos do Museu Nacional*, 65: 59-81.
- Ávila, C.A.; Cherman, A.F.; Valença, J.V. 2008. Metamorfismo Paleoproterozóico do Cinturão Mineiro: considerações petrográficas a partir dos dioritos Brumado e Rio Grande. *Arquivos do Museu Nacional*, 66(3-4): 631-660.
- Ávila, C.A.; Pereira, R.M.; Silva, T.A.; Cherman, A.F.; Neumann, R.; Bezerra Filho, A.P.; Abreu, F.M., Vasques, F.S.G. 2006c. Controle geológico para a distribuição dos corpos pegmatíticos mineralizados em Sn-Ta-Li na região de São João Del Rei, Minas Gerais. In: 43º Congresso Brasileiro Geologia, Aracajú. Boletim de Resumos. Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM, 157.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Barrueto, H.R.; Pereira, R.M. 2006a. Geochemistry of the Glória quartz-monzodiorite: implications for Paleoproterozoic evolution of the southern sector of the Mineiro Belt, Minas Gerais state, Brazil. *Arquivos Do Museu Nacional*, 64(1): 73–92.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Bongioiolo, E.M.; Dussin, I.A.; Souza, V H.P.; Barbosa, N.S.; Guerra, F.G.V.; Bellam, I.O. 2013. Comparação petrográfica, geoquímica e geocronológica entre três gerações

- distintas de ortognaisses associados ao Cinturão Mineiro. *In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica*. Formato digital disponível em <http://www.sbgq.org.br/>
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Bongioio, E.M.; Dussin, I.A.; Vieira, T.A.T. 2014. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 243: 221–251.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Cordani, U.G.; Barrueto, H.R.; Pereira, R.M.; Martins, V.T.S.; Dunyi, L. 2006b. The Glória quartz-monzodiorite: isotopic and chemical evidence of arc-related magmatism in the central part of the Paleoproterozoic Mineiro belt, Minas Gerais State, Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 78(3): 543–556.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Cordani, U.G.; Moura, C.A.V., Pereira, R.M. 2010. Rhyacian (2.23-2.20 Ga) juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: Geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 464-482.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Dussin, I.A.; Souza, V.H.P.; Bongioio, E.M., Vasques, F.S.G. 2011. Implicação tectônica da caracterização geoquímica e da idade sideriana do ortogneisse Resende Costa, Estado de Minas Gerais. *In: Simpósio De Geologia Do Sudeste 12*, Nova Friburgo, 2011. Resumos, Nova Friburgo, Sociedade Brasileira de Geologia, 1: 48.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Pereira, R.M. 2004. Geologia e petrografia do Quartzo Monzodiorito Glória, Cinturão Mineiro, porção sul do Craton São Francisco, Minas Gerais. *Arquivos do Museu Nacional*, Rio de Janeiro, 62(1): 83-98.
- Ávila, C.A.; Teixeira, W.; Vasques, F.S.G.; Dussin, I.A.; Mendes, J.C.; 2012. Geoquímica e idade U-Pb (LA-ICPMS) da crosta oceânica Riacciana do Cinturão Mineiro, borda meridional do Cráton São Francisco. *In: 46º Congresso Brasileiro Geologia*, Santos. Boletim de Resumos. Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM.
- Ávila, C.A.; Valença, J.G.; Moura, C.A.V.; Klein, V.C.; Pereira, R.M. 2003. Geoquímica e idade do Tonalito/trondhjemitó Cassiterita, borda meridional do Cráton São Francisco, Minas Gerais. *Arquivos do Museu Nacional*, Rio de Janeiro, 61(4): 267-284.
- Ávila, C.A.; Valença, J.G.; Moura, C.A.V.; Ribeiro, A. & Paciuolo, F.V. 1998. Idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em zircões de corpos metaplutônicos da região de São João Del Rei, borda sul do Cráton do São Francisco, Minas Gerais. *In: Congresso Brasileiro de Geologia 40*, Belo Horizonte, Anais... Sociedade Brasileira de Geologia, 1: 34.
- Aza, P. N. de; Guitián, F.; Santos, C.; Aza, S. de; Cuscó, R.; Artús, L. 1997. Vibrational Properties of Calcium Phosphate Compounds. 2. Comparison between Hydroxyapatite and beta-Tricalcium Phosphate. *Chemistry of Materials*, 9(4): 916–922.
- Babinski, M.; Chemale Jr, F.; Van Schmus, W.R. 1995 The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research*, 72(3-4): 235-245.
- Baldwin, J.R. & von Knorring, O. 1983. Compositional range of Mn-garnet in zoned granitic pegmatites. *Canadian Mineralogist*, 21: 683-688.
- Barbosa, N.S.; Teixeira, W.; Ávila, C.A.; Bongioio, E.M.; Dussin, I.A. 2013. Ortognaisses siderianos (2450 a 2410 Ma) na parte sul do cráton do São Francisco: geocronologia e significado para o

- cinturão Mineiro. *In*: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica. Formato digital disponível em <http://www.sbgq.org.br/>
- Barbosa, N.S.; Teixeira, W.; Ávila, C.A.; Montecinos, P.M.; Bongioiolo, E.M. 2015. 2.17-2.10 Ga plutonic episodes in the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil: U-Pb ages, geochemical constraints and tectonics. *Precambrian Research*, 270: 204-225.
- Bastin, G.F.; Dijkstra, J.M.; Heijligers, H.J.M. 1998. PROZA96: an improved matrix correction program for electron probe microanalysis, based on a double Gaussian $\phi(\rho z)$ approach. *X-Ray Spectrometry*, 27(1): 3-10.
- Beard, J.S. & Tracy, R.J. 2002. Spinel and other oxides in Mn-rich rocks from the Hutter Mine, Pittsylvania County, Virginia, U.S.A.: Implications for miscibility and solvus relations among jacobsonite, galaxite, and magnetite. *American Mineralogist*, 87: 690-698.
- Belezkij, V. 1956. Mineralização tântalo-estanífera e uranífera do município de São João del Rei, Minas Gerais. *Boletim informativo do DNPM/DFPM*, 99:1-42.
- Bowles, J.F.W.; Howie, R.A.; Vaughan, D.J.; Zussman J. 2011. Rock-forming minerals/Volume 5A, Non-silicates: oxides, hydroxides and sulphides. Geological Society of London, 920p.
- Brongniart, A. 1813. Essai d'une classification minéralogique des roches mélangées. *Journal des Mines*, 34(199): 5-48.
- Brown, W.L. & Parsons, I. 1981. Towards a more practical two-feldspar geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76: 369-377.
- Campos, M.T.R.; Pinheiro, V.A.; Stohler, R.C.; Oliveira, F.V.C.S.R. 2009. Comparação entre os minerais pesados de saprólitos do gnisso São Tiago, do granitoide Ritópolis e de corpos pegmatíticos, região de São Tiago, Estado de Minas Gerais. *In*: XXXI Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural UFRJ, Rio de Janeiro, Anais..., 479-480.
- Černý, P. & Ercit, T.S. 2005 The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 43(6), 2005-2026.
- Černý, P. 1991. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? *Precambrian Research*, 51(1-4): 429.
- Černý, P.; London, D.; Novak, M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements*, 8(4): 289-294.
- Černý, P.; Meintzer, R.E.; Anderson, A.J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanism. *Canadian Mineralogist*, 23: 381-421.
- Chakhmouradian, A.R. & Mitchell, R.H. 1999. Niobian ilmenite, hydroxylapatite and sulfatite monazite: alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from Internatsional'Naya, Yakutia. *Canadian Mineralogist*, 37: 1177-1189.
- Cherman, A.F. 2004. Geologia, petrografia e geocronologia de ortognaisses paleoproterozoicos da borda meridional do Cráton do São Francisco, na região entre Itumirim e Nazareno, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 259 p.
- Chopelas, A. & Hofmeister, A.M. 1991. Vibrational Spectroscopy of Aluminate Spinel at 1 atm and of $MgAl_2O_4$ to Over 200 kbar. *Physical and Chemistry of Minerals*, 18: 279-293.
- Coelho, I.S. 1942. Ocorrência de cassiterita em São João del Rei, Estado de Minas Gerais. *Mineração e Metalurgia*, 6(36): 288-289.

- Costa, L.B.F. 2010. Geologia da porção nordeste do granitoide Ritópolis entre Resende Costa e Ritópolis, Estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 101 p.
- Cynn, H.; Sharma, S.K.; Cooney, T.F.; Nicol, M. 1992. High-temperature Raman investigation of order-disorder behaviour in the MgAl_2O_4 spinel. *Physical Review B*, 45(1): 500-502.
- D'Ippolito, V.; Andreozzi, G.B.; Bosi, F.; Lenius, U.H.; Mantovani, L.; Bersani, D.; Fregola, R.A. 2013. Crystallographic and spectroscopic characterization of a natural Zn-rich spinel approaching the endmember gahnite (ZnAl_2O_4) composition. *Mineralogical Magazine*, 77: 2941–2953.
- Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. 2013. An introduction to the rock-forming minerals (3ª ed.). Mineralogical Society, EUA. 498 p.
- Diniz-Pinto, H.S. 2000. Pyrochlore der Pegmatit-Provinz Nazareno/Brasilien: Modellvorstellungen zu Mineralisation - Alteration – Kristallchemie (Em alemão). Tese de Doutorado, Universität Johannes Gutenberg Mainz, Mainz, Alemanha. 195 p.
- Diniz-Pinto, H.S. 2004a. Aspectos texturais de microlitas dos pegmatitos de Volta Grande, Nazareno, MG. *In: Congresso Brasileiro de Geologia 42, Araxá (MG), Anais...* Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM, resumo 23_620.
- Diniz-Pinto, H.S. 2004b. Cristaloquímica de microlitas dos pegmatitos de Volta Grande, Nazareno, MG. *In: Congresso Brasileiro de Geologia 42, Araxá (MG), Anais...* Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM, resumo 23_621.
- Diniz-Pinto, H.S. 2004c. Datação Pb-Pb em zircões e microlitas dos pegmatitos de Volta Grande, Nazareno, MG. *In: Congresso Brasileiro de Geologia 42, Araxá (MG), Anais...* Sociedade Brasileira de Geologia, CD-ROM, resumo 30_622.
- Droop, G.T.R. 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431-435.
- Ebert, H. 1956. Relatório Anual do Diretor Ano de 1955, DNPM/DGM, Rio de Janeiro, 62-81.
- Elkins, L.T. & Grove, T.L. 1990. Ternary feldspar experiments and thermodynamic models. *American Mineralogist*, 75: 544-559.
- Erichsen, A.I. 1929. Geologia da Folha São João D'El Rey, Estado de Minas Gerais. *Boletim do Departamento Nacional Produção Mineral – Serviço de Geologia e Mineralogia*, 36: 1-26.
- Evensen, N.M.; Hamilton, P.J.; O'Nions, R.K. 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 1199-1212.
- Fang, C., Loong, C.-K., de Wijs, G., & de With, G. 2002. Phonon spectrum of ZnAl_2O_4 spinel from inelastic neutron scattering and first-principles calculations. *Physical Review B*, 66(14): 1–7.
- Faulstich, F.R.L.; Ávila, C.A.; Neumann, R.; Silveira, V.S.L.; Callegario, L.S. 2016 (no prelo). Gahnite from the São João del Rei Pegmatitic Province, Minas Gerais, Brazil: Chemical Composition and Genetic Implications. *Canadian Mineralogist*.
- Fleischer, M. 1954. New mineral names. *American Mineralogist*, 39(1-2): 159-160.
- Förster, H.-J. 1998. The chemical composition of REE-Y-Th-U-rich accessory minerals in peraluminous granites of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany. Part II: Xenotime. *American Mineralogist*, 83: 1302-1315.

- Francesconi, R. 1972. Pegmatitos da Região de São João Del Rei, MG. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências/USP, 101p.
- Francesconi, R.; Valarelli, J.V.; Amaral, G. 1975. Análise de tendência de superfície aplicada à prospecção de minerais de pegmatitos pelo método do concentrado de bateia na região de Nazareno-Cassiterita - MG. Boletim IG - USP, 6: 145–155.
- Fuhrman, M.L. & Lindsley, D.H. 1988. Ternary-feldspar modeling and thermometry. *American Mineralogist*, 73: 201-215.
- Ginsburg, A.I. & Rodionov, G.G. 1960. On the depth of formation of granitic pegmatites. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*, 1: 45-54 (em russo).
- Ginsburg, A.I. 1984. The geological condition of the location and the formation of granitic pegmatites. *International Geological Congress, Proceedings*, 27: 245-260.
- Ginsburg, A.I.; Timofeyev, I.N.; Feldman, L.G. 1979. Principles of Geology of the Granitic Pegmatites. Nedra, Moscow, USSR, 296p. (em russo).
- Gomes, C.B. 2015. A Microsonda Eletrônica na Geologia. Edusp, São Paulo. 248p.
- Gramaccioli, C.M. & Segalstad, T.V. 1978. A uranium- and thorium-rich monazite from a south-alpine pegmatite at Piona, Italy. *American Mineralogist*, 63: 757-761.
- Green T.H. 1977. Garnet in silicic liquids and its possible use as P-T indicator. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65: 59-67.
- Guerra, F.G.V.M. 2014. Mapeamento Geológico, petrografia e geoquímica preliminar do ortognaisse granodiorítico Ribeirão dos Mosquitos. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 113p.
- Guimarães, D. & Belezkij, V. 1956. The stano-tantalo-uraniferous deposits and occurrences in the region of São João del Rei, Minas Gerais, Brazil. *In: International Conference On The Peaceful Uses Of Atomic Energy*, Genebra, 6: 143-146.
- Guimarães, D. & Florêncio, W. 1949. L'âge de quelques pegmatites brésiliennes, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 21(4): 315-328.
- Guimarães, D. & Guedes, S.V. 1944. Nota preliminar sobre a região estanífera de São João Del Rei, Minas Gerais. *Avulso do Departamento Nacional Produção Mineral – Departamento de Fomento a Produção Mineral*, Rio de Janeiro, 58: 13-26.
- Guimarães, D. 1950. A jazida de djalmaíta, de Volta Grande Rio das Mortes, Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 22(1): 51-71.
- Guimarães, D. 1956. Concentrados estaníferos do município de São João del Rei, Minas Gerais. *Avulso do Departamento Nacional da Produção Mineral - Departamento de Fomento a Produção Mineral*, Rio de Janeiro, 99: 43-72.
- Guimarães, D. 1957. Ocorrência de um mineral raro no pegmatito de Germinal, distrito de Nazareno, Minas Gerais. *Revista da Escola de Minas*, 21(2): 76.
- Harrison, T.N. 1988. Magmatic garnets in the Cairngorm granite, Scotland. *Mineralogical Magazine*, 52: 659-667.
- Hawthorne, F.C. & Henry, D.J. 1999. Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, 11(2): 201-215.

- Heilbron, M.; Duarte, B.P.; Valeriano, C.D.M.; Simonetti, A.; Machado, N.; Nogueira, J.R. 2010. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U-Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research*, 178(1-4): 136-148.
- Heinrich, E.W. 1953. Zoning in pegmatite districts. *American Mineralogist*, 38: 68-87.
- Heinrich, E.W. 1959. Lithium tantalum pegmatites of the São João del Rei district, Minas Gerais, Brazil. *Geological Society American Bulletin*, 70(12): 1617.
- Heinrich, E.W. 1964. Tin-tantalum-lithium pegmatites of the São João del Rei district, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 59: 982-1002.
- Hetherington, C.J. & Harlov, D.E. 2008. Metasomatic thorite and uraninite inclusions in xenotime and monazite from granitic pegmatites, Hydra anorthosite massif, southwestern Norway: Mechanics and fluid chemistry. *American Mineralogist*, 93: 806-820.
- Hofmeister, A.M. & Chopelas, A. 1991. Vibrational spectroscopy of end-member silicate garnets. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17: 503-526.
- Hogarth, D.D. 1977. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62(5-6): 403-410.
- Hoskin, P.W. & Schaltegger, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar, J.M & Hoskin P.W.O (eds.), *Zircon, Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53:27-62.
- Jackson, J.A. 1997. *Glossary of Geology*, Fourth Edition. Alexandria, Virginia, American Geological Institute, 769 p.
- Jackson, S.E.; Pearson, N.J.; Griffin, W.L.; Belousova, E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1–2): 47-69.
- Jahns, R.H. 1953. The genesis of pegmatites. I. Occurrence and origin of giant crystals. *The American Mineralogist*, 38(7-8): 563-598.
- Kleck W.D. & Foord E.E. 1999. The chemistry, mineralogy, and petrology of the George Ashley Block pegmatite body. *American Mineralogist*, 84: 695-707.
- Klein, C. & Dutrow, B. 2012. *Manual de Ciências dos Minerais*. Bookman, Porto Alegre, 706p.
- Koslov B.A. & Geiger C.A. 1998. Raman spectra of silicate garnets. *Physics and Chemistry of Minerals*, 25: 142-151.
- Košler, J.; Fonneland, H.; Sylvester, P.; Tubrett, M.; Pedersen, R.B. 2002. U–Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. *Chemical Geology*, 182(2–4): 605-618.
- Lafuente, B; Downs, R. T.; Yang H.; Stone, N. 2015. The power of databases: the RRUFF project. In: *Highlights in Mineralogical Crystallography* (T. Armbruster & R.M. Danisi, eds), Berlim, Alemanha: W. De Gruyter, 1-30.
- Lagache, M. & Quéméneur, J. 1997. The Volta Grande pegmatites, Minas Gerais, Brazil: an example of rare-element granitic pegmatites exceptionally enriched in lithium and rubidium. *Canadian Mineralogist*, 35: 153-165.
- Landes, K.K. 1933a. Origin and classification of pegmatites. *American Mineralogist*, 18(2): 33-56.

- Landes, K.K. 1933b. Origin and classification of pegmatites (concluded). *American Mineralogist*, 18(3): 95-103.
- Lewis I.R. & Edwards H.G.M. 2001. *Handbook of Raman Spectroscopy: From the Research Laboratory to the Process Line*. Marcel Dekker Inc., New York, EUA. 1054 pp.
- Locock A.J. 2008. An Excel spreadsheet to recast analysis of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computer & Geosciences*, 34: 1769-1780.
- London, D. & Burt, D.M. 1982. Alteration of spodumene, montebrasite and lithiophilite in pegmatites of the White Picacho district, Arizona. *American Mineralogist*, 67(1-2): 97-113.
- London, D. & Morgan, G.B. 2012. The Pegmatite Puzzle. *Elements*, 8(4): 263-268.
- London, D. 1984. Experimental phase equilibria in the system $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$: a petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites. *American Mineralogist*, 69(11-12): 995-1004.
- London, D. 1996. Granitic pegmatites. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 87: 305-319.
- London, D. 2008. Pegmatites. *Mineralogical Association of Canada, Quebec, Canadá*. 347 p.
- London, D. 2011. Competing models for the internal evolution of granitic pegmatites. *Contributions to the 5th International Symposium on granitic pegmatites. Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial 14*: 131-133.
- London, D. 2013. Reading pegmatites: what minerals say. *In: PEG 2013: Contributions to the 6th International Symposium on Granitic Pegmatites, Abstract Volume*, 5-6.
- London, D.; Morgan, G.B.; Wolf, M.B. 2001. Amblygonite-montebrasite solid solutions as monitors of fluorine in evolved granitic and pegmatitic melts. *American Mineralogist*, 86(3): 225-233.
- López-Moreno, S.; Rodríguez-Hernández, P.; Muñoz, A.; Romero, A.H.; Manjón, F.J.; Errandonea, D.; Rusu, E.; Ursaki, V.V. 2011. Lattice dynamics of ZnAl_2O_4 and ZnGa_2O_4 under high pressure. *Annalen Der Physik (Leipzig)* 523(1-2): 157–167.
- Ludwig, K.R. 2001. *Squid 1.02: A User Manual*. Berkeley Geochronological Center Special Publication 4, 119 p.
- Ludwig, K.R. 2003. *User's manual for ISOPLOT 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronological Center Special Publication 4, 70 p.
- Machado, N.; Schrank, A.; Noce, C.M.; Gauthier, G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 141(1-4): 259-276.
- Mange, M.A. & Morton, A.C. 2007. Geochemistry of heavy minerals. *In: Heavy Minerals in Use* (M.A. Mange & D.T. Wright, eds.), *Developments in Sedimentology*, 58: 345-391.
- Manning, D.A.C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 206-215.
- Manson, D.V. & Stockton, C.M. 1981. Gem garnets in the red-to-violet color range. *Gems & Gemology*, 17: 191-204.
- Martin, R.F. & De Vito, C. 2005. The Patterns of Enrichment in Felsic Pegmatites Ultimately Depend on Tectonic Setting. *Canadian Mineralogist*, 43(6): 2027-2048.

- Miller, C.F. & Stoddard, E.F. 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: an example from the Old Woman-Piute Range, California. *Journal of Geology*, 89: 233–246.
- Möller, P.; Dulski, P.; Szacki, W.; Malow, G., Riedel, E. 1988. Substitution of tin in cassiterite by tantalum, niobium, tungsten, iron and manganese. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1497-1503.
- Moore R.K., White W.B., Long T.V. 1971. Vibrational spectra of the common silicates: I. The garnets. *American Mineralogist* 56: 54-71.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C.R. 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. *In: Heavy Minerals in Use* (M.A. Mange & D.T. Wright, eds.), *Developments in Sedimentology*, 58: 215-245.
- Müller, A.; Kearsley, A.; Spratt, J.; Seltnann R. 2012. Petrogenetic implications of magmatic garnet in granitic pegmatites from southern Norway. *Canadian Mineralogist*, 50: 1095-1115.
- Neiva, A.M.R. 1996. Geochemistry of cassiterite and its inclusions and exsolution products from tin and tungsten deposits in Portugal. *Canadian Mineralogist*, 34: 745-768.
- Ni, Y.; Hughes, J.M.; Mariano, A.N. 1995. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures. *American Mineralogist*, 80: 21–26.
- Noce, C.M.; Pedrosa-Soares, A.C.; da Silva, L.C.; Armstrong, R.; Piuzana, D. 2007. Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuaí Orogen, based on U-Pb SHRIMP data: Implications for Brazil-Africa links in Paleoproterozoic time. *Precambrian Research*, 159(1-2): 60.
- Nunes, L.C. 2007. Geocronologia, Geoquímica Isotópica e Litoquímica do Plutonismo Diorítico-Granítico entre Lavras e Conselheiro Lafaiete: Implicações para a Evolução Paleoproterozóica da Parte Central do Cinturão Mineiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. 96p.
- Oliveira, F.V.C.S.R.S. 2011. Mapeamento geológico, petrografia e geoquímica preliminar dos ortognaisses tonalítico Bandeira e trodhjemito Canoas. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ. 98 p.
- Parfenoff, A.; Pomerol, C; Tourenq, J. 1970. Les minéraux en grains: méthodes d'étude et détermination. Paris, França: Masson, 578 p.
- Pereira R.M.; Netto A.M.; Ávila C.A.; Barrueto H.R.; Neumann R.; Atencio D. 2004a. Zirconiferous hafnon and hafniferous zircon from São João Del Rei, Minas Gerais, Brazil. *In: ICAM, International Congress on Applied Mineralogy*, 8, Águas de Lindóia, Extended Abstract, 2: 919-921.
- Pereira, R.M.; Ávila, C.A.; Neumann, R. 2004b. Estudo mineralógico e químico da cassiterita e de suas inclusões sólidas: implicação com a paragénese das mineralizações da Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Arquivos do Museu Nacional*, 62(3): 321-336.
- Pereira, R.M.; Ávila, C.A.; Neumann, R. 2007a. Ocorrências de zircão hafnífero no sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(2): 215-223.
- Pereira, R.M.; Ávila, C.A.; Neumann, R.; Netto, A.M.; Atencio, D. 2003. Borda de hafnã zirconífero em zircão hafnífero da mina do Volta Grande, Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Boletim do Museu Nacional, Série Geologia*, 69: 1-14.

- Pereira, R.M.; Neumann, R.; Ávila, C.A. 2007b. Plúton Desembarque: exemplo de corpo a metais raros (Nb, Zr, Hf) e estanho, São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(2): 257-267.
- Pereira, R.M.; Neumann, R.; Ávila, C.A. 2008a. Hafnian zircon as a tracer for rare metal exploration. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3): 586-589.
- Pereira, R.M.; Neumann, R.; Ávila, C.A.; Castro, C. 2008b. Determinação da gênese da cassiterita com base na sua composição química e inclusões minerais: ocorrências no sul e sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2): 246-252.
- Pereira, R.M.; Rodrigues, D.; Ávila, C.A.; Neumann, R. 2011. Stockscheider Quartzo-Moscovíticos e Pegmatíticos na Zona de Cúpula do Granitóide Ritápolis, Região de São João del Rei, Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ*, 34(2): 59-69.
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E.; Siever, R. 1987. *Sand and Sandstone*. Nova Iorque, EUA: Springer New York, 553 p.
- Pires, F.R.M. & Pires, H.L. 1992. Regional zoning in the São João del Rei Pegmatite District and its relation with the Collisional Santa Rita Granite, Minas Gerais, Brazil. *In: Congresso Brasileiro Geologia*, 37, São Paulo. *Anais*, 1: 269-272.
- Pires, F.R.M. & Porto Júnior, R. 1986. A mineralização de Sn-Ta-Nb-Li e o Granito Santo Rita, São João Del Rey, Minas Gerais. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 34, Goiânia. *Anais*, 5: 2023-2034.
- Pires, F.R.M. 1978. The Archaean Barbacena Greenstone Belt in its typical development and the Minas Itabirite distribution at the Lafaiete district, Minas Gerais, Brazil. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 50(4): 599-600.
- Pires, F.R.M.; Ribeiro, A.; Barbosa, M.I.M. 1990. Distribuição do Greenstone Belt Barbacena na região de São João Dei Rei, Minas Gerais. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 36, Natal, *Anais*, 6: 2941-2951.
- Pouchou, J.L. & Pichoir, F. 1991. Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model "PAP". *In: Electron Probe Quantitation* (K.F.J. Heinrich & D.E. Newbury, eds.). New York, Plenum Press, 31-75.
- Pyle, J.M.; Spear, F.S.; Rudnick, R.L.; McDonough, W.F. 2001. Monazite-Xenotime-Garnet equilibrium in metapelites and a new monazite-garnet thermometer. *Journal of Petrology*, 42(11): 2083-2107.
- Quéméneur, J.J.G. & Baraud, E.R. 1983. Estrutura do embasamento Arqueano e geologia econômica da área pegmatítica de São João Del Rei - MG. *In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 2, Belo Horizonte. *Anais*, 1: 449-460.
- Quéméneur, J.J.G. & Garcia, D. 1993. Os maciços de Tabuões e Ritápolis na região de São João Del Rei, Granitoides transamazônicos com a associação granito-trondhjemitó-pegmatito. *In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 7, Belo Horizonte. *Anais*, 1: 105-107.
- Quéméneur, J.J.G. & Lagache, M. 1994. La holmquistite de Volta Grande près de São João del Rei, Minas Gerais, Brésil: caractéristiques chimiques et minéralogiques. *Geonomos*, 2(2): 15-21.
- Quéméneur, J.J.G. & Lagache, M. 1997. Comparison between two groups of rare-element pegmatites from Brazil: partition of Rb and Cs between the fluids and the minerals of the pegmatites and contact aureoles. *In: Second International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, Extended Abstracts*, 80-81.

- Quéméneur, J.J.G. & Lagache, M. 1999. Comparative study of two pegmatite fields from Minas Gerais, Brazil, using the Rb and Cs contents of Micas e Feldspars. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(1): 27-32.
- Quéméneur, J.J.G. 1987. Petrography of the pegmatites from Rio das Mortes Valley, southeast Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(4): 595-600.
- Quéméneur, J.J.G.; Ribeiro, A.; Paciullo, F.V.P.; Heilbron, M.; Trouw, R.A.J.; Valença, J.G.; Noce, C.M. 2003. Mapa Geológico - folha Lavras. *In*: Soares, A.C.P. (Org.). Projeto Sul de Minas – Etapa I. Belo Horizonte: CODEMIG, disponível on-line em: <http://www.portalgeologia.com.br/mapa/>
- Reed, S.J.B. 2006. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* (2^a ed.). Cambridge University Press, New York, EUA. 232 p.
- Ribeiro, A.; Ávila, C.A.; Valença, J.G.; Paciullo, F.V.P.; Trouw, R.A.J. 2003. Geologia da Folha São João del Rei (1:100.000). *In*: Companhia Mineradora de Minas Gerais – COMIG (Ed.). *Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Brasileiro*, 3: 521-622.
- Ribeiro, A.; Paciullo, F.V.P.; Noce, C.M.; Valeriano, C.M.; Valença, J.G.; Ávila, C.A.; Trouw, R.A.J.; Silva, M.A. 2003. Mapa Geológico - folha São João del Rei. *In*: Soares, A.C.P. (Org.). Projeto Sul de Minas – Etapa I. Belo Horizonte: CODEMIG, disponível on-line em: <http://www.portalgeologia.com.br/mapa/>
- Ribeiro, A.; Teixeira, W.; Dussin, I.A., Ávila, C.A.; Nascimento, D. 2013. U/Pb LA-ICP-MS detrital zircon ages of the São João del Rei and Carandaí basins: New evidence of intermittent Proterozoic rifting in the São Francisco paleocontinent. *Gondwana Research*, 24(2): 713-726.
- Rieder, M.; Cavazzini, G.; D'Yakonov, Y.; Frank-Kamenetskii, V.A.; Gottardi, G.; Guggenheim, S.; Koval, P.V.; Müller, G.; Neiva, A.M.R.; Radoslovich, E.W.; Robert, J.-L.; Sassi, F.P.; Takeda, H.; Weiss, Z.; Wones, D.R. 1998. Nomenclature of the micas. *Canadian Mineralogist*, 36: 905-912.
- Rividi, N., van Zuilen, M., Philippot, P., Ménez, B., Godard, G., & Poidatz, E. 2010. Calibration of carbonate composition using micro-Raman analysis: application to planetary surface exploration. *Astrobiology*, 10(3): 293–309.
- Rocha, F.M. & Fiuza, R.V. 2007. Comparação da mineralogia de corpos pegmatíticos relacionados ao granitoide Ritópolis com aqueles intrusivos em diferentes unidades do embasamento da região de São João del Rei, Minas Gerais. *In*: XXIX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural UFRJ, Rio de Janeiro, Anais..., 213-214.
- Rodrigues, I.J. 1998. Efeitos metassomáticos nos pegmatitos litíferos de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/UFRJ. 147 p.
- Rodrigues, J.R.S.S.; Rodrigues, P.M.L.S.; Silveira, V.S.L. 2013. Presença de corpos quartzo-muscovíticos mineralizados em columbita e cassiterita na região de Resende Costa, Minas Gerais. *In*: XXXV Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural UFRJ, Rio de Janeiro, Anais..., 392-393.
- Roedder, E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in mineralogy* 12. Mineralogical Society of America. 644p.
- Rolff, P.A.M.A. 1947. A Província Estanífera do Rio das Mortes, Minas Gerais. *Revista da Escola de Minas*, 12(3): 25-27.

- Rolff, P.A.M.A. 1948a. A Província Estanífera do Rio das Mortes. *Revista da Escola de Minas*, 13(3): 5-10 e 20.
- Rolff, P.A.M.A. 1948b. Possibilidades econômicas da monazita de São João del Rei. *Revista da Escola de Minas*, 13(4): 15-18.
- Rolff, P.A.M.A. 1951. Nota sobre a geologia da Serra do Lenheiro. *Revista da Escola de Minas*, 16(3): 31-36.
- Rolff, P.A.M.A. 1952a. Urânio e tório em São João del Rei. *Revista da Escola de Minas*, 17(2): 11-12.
- Rolff, P.A.M.A. 1952b. Geologia da Província Estano-Litínifera do Rio das Mortas, Minas Gerais. *Revista da Escola de Minas*, 17(6): 3-12 e 39-40.
- Rolff, P.A.M.A. 1953. Os pegmatitos da Colônia, Prados, Minas Gerais. *Revista da Escola de Minas*, 18(3): 5-10.
- Rosenblum, S. & Brownfield, I.K. 2000. Magnetic susceptibilities of minerals. Open-File report n. 99-529, U.S. Geological Survey, 37 p.
- Rosenblum, S. 1958. Magnetic susceptibilities of minerals in the Frantz Isodynamic magnetic separator. *American Mineralogist*, 43(1-2): 170-173.
- Sato, K.; Basei, M.A.S.; Siga Junior, O.; Onoi, A.T. 2010. In situ U-Th-Pb isotopic analyses by excimer laser ablation/ICP-MS on Brazilian megacrystal xenotime: First results on U-Pb isoptes at CPGeo-IGC-USP. *In: VII SSAGI-South American Symposium on Isotope Geology, Brasília, Abstracts*, 349-352.
- Sato, K.; Siga Jr., O.; Silva, J.A.; McReath, I.; Liu, D.; Iizuka, T.; Rino, S.; Hirata, T.; Sproesser, W.M.; Basei, M.A.S. 2009. In Situ Isotopic Analyses of U and Pb in Zircon by Remotely Operated SHRIMP II, and Hf by LA-ICP-MS: an Example of Dating and Genetic Evolution of Zircon by $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ from the Ita Quarry in the Atuba Complex, SE Brazil. *Geologia USP, Série Científica* 9(3): 61-69.
- Schulze, D.J. 2003. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring diamonds. *Lithos*, 71: 195-213.
- Simon, M.B. 2016. Novas evidências para a transição Neoarqueana entre o magmatismo de médio-K e alto-K na região de São Tiago, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/UFRJ, Rio de Janeiro. 94 p.
- Smeds, S.-A. 1994. Zoning and fractionation trends of a peraluminous NYF granitic pegmatite field at Falun, south-central Sweden. *GFF*, 116: 175-184.
- Smith E. & Dent G. 2005. *Modern Raman Spectroscopy – A Practical Approach*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, Inglaterra. 210 p.
- Soares, D.R.; Beurlen, H.; Ferreira, A.C.M.; Silva, M.R.R. 2007. Chemical composition of gahnite and degree of pegmatitic fractionation in the Borborema Pegmatitic Province, northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79: 395-404.
- Soares, M.B.; Stohler, R.C.; Oliveira, F.V.C.S.R.S.; Vieira, T.A.T. 2009. Estudo por MEV-EDS dos minerais pesados de saprólitos das fácies média e grossa do granitoide Ritópolis, região de São João del Rei, estado de Minas Gerais. *In: XXXI Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural UFRJ, Rio de Janeiro, Anais...*, 426.

- Sokolov Y.M. & Khlestov V.V. 1990. Garnets as indicators of the physicochemical conditions of pegmatite formation. *International Geology Review*, 32: 1095-1107.
- Souza, A.N. 2009. Evolução petrográfica e geoquímica do granitóide Ritápolis, borda meridional do cráton São Francisco. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/UFRJ, 119 p.
- Souza, V.H.P. 2013. Mapeamento geológico, petrografia, geoquímica e implicação tectônica do ortogneisse trochhemítico Resende Costa, Estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 119 p.
- Spry, P.G. 1987. Compositional zoning in zirconian spinel. *Canadian Mineralogist*, 25: 97-104.
- Stenina, N.G.; Bazarov, L.S.; Shcherbakova, M.Y.; Mashkovtsev, R.I. 1984. Structural state and diffusion of impurities in natural quartz of different genesis. *Physics and Chemistry of Minerals*, 10(4): 180-186.
- Stohler, R.C. 2011. Mapeamento Geológico, petrografia e geoquímica preliminar do ortogneisse granítico São Tiago, estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 123 p.
- Stohler, R.C.; Oliveira, F.V.C.S.R.S.; Garcia, R.T.; Guerrero, J.C. 2008. Estudo dos minerais pesados de saprólitos da fácies média do granitoide Ritápolis, Minas Gerais. *In: XXX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural UFRJ, Rio de Janeiro, Anais...*, 473.
- Taylor, S.R. & McLennan, S.M. 1985. The Continental Crust; Its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford. 312 p.
- Teixeira, N.A. 1992. Contribuição a geologia do "greenstone belt" Itumirim-Nazareno (MG). *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 37, São Paulo, Anais..., 2: 476-477.
- Teixeira, W.; Ávila, C.A.; Dussin, I.A.; Corrêa Neto, A.V.; Bongioiolo, E.M.; Santos, J.O.; Barbosa, N.S. 2015. A juvenile accretion episode (2.35 – 2.32 Ga) in the Minero belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research*, 256: 148-169.
- Teixeira, W.; Ávila, C.A.; Nunes, L.C. 2008. Nd-Sr Isotopic Geochemistry and U-Pb Geochronology of the Fé Granitic Gneiss and Lajedo Granodiorite: Implications for Paleoproterozoic Evolution of the Mineiro Belt, Southern São Francisco Craton, Brazil. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, 8(1): 53-74.
- Teixeira, W.; Sabatè, P.; Barbosa, J.; Noce, C.M.; Carneiro, M.A. 2000. Archean and Paleoproterozoic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. *In: Tectonic Evolution of South America*. (U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos, eds.). 31st International Geological Congress, 101–137.
- Thomas, R. & Davidson, P. 2012. Water in granite and pegmatite-forming melts. *Ore Geology Reviews*, 46(0): 32-46.
- Thomas, R.; Davidson, P.; Beurlen, H. 2012. The competing models for the origin and internal evolution of granitic pegmatites in the light of melt and fluid inclusion research. *Mineralogy and Petrology*, 106(1-2): 55-73.
- Thomas, R.; Davidson, P.; Schmidt, C. 2011. Extreme alkali bicarbonate- and carbonate-rich fluid inclusions in granite pegmatite from the Precambrian Ronne granite, Bornholm Island, Denmark. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(2): 315-329.

- Toledo, C.L.B. 2002. Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, na região de Nazareno, MG. Campinas. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 307 p.
- Uchoa, J.C.F. 2006. Análise Espacial dos corpos plutônicos do Cinturão Mineiro através da integração de dados geológicos, aerogeofísicos e geoquímicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 176 p.
- Valença, J.G.; Paciullo, F.V.P.; Ribeiro, A.; Andreis, R.R. 1998. Komatiitos da Fazenda Chapadinha, Faixa Greenstone Itumirim-Tiradentes, borda sul do Cráton do São Francisco, Minas Gerais. *In: Congresso Brasileiro Geologia*, 40, Belo Horizonte. Boletim Resumos..., 1: 62.
- Van Emdem, B.; Thornber, M.R.; Graham, J.; Lincoln, F.J. 1997. The incorporation of actinides in monazite and xenotime from placer deposits in western Australia. *Canadian Mineralogist*, 35: 95-104.
- Vasques, F.S.G. 2007. Mapeamento geológico de rochas metamáficas e metassedimentares do Greenstone Belt Rio das Mortes na região de São Tiago – Cassiterita e estudo petrográfico e geoquímico de diques metabásicos e de diabásio. Monografia de Graduação, UFRJ, Rio de Janeiro. 50 p.
- Vasques, F.S.G. 2009. Mapeamento geológico, petrografia, geoquímica das rochas anfibolíticas do greenstone belt Rio das Mortes e estudo de diques metabásicos e de gabro-diabásio, região de Cassiterita – Ritópolis, Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/UFRJ, Rio de Janeiro. 109 p.
- Vennum, W.R. & Meyer, C.E. 1979. Plutonic garnets from the Werner batholith, Lassier Coast, Antarctic Peninsula. *American Mineralogist*, 64: 268-273.
- von Knorring, O. & Hornung, G. 1961. Hafnian Zircon. *Nature*, 190: 1098-1099.
- Wang, R.C., Fontan, F., Xu, S., Chen, X., Mouchoux, P. 1996. Hafnian zircon from the apical part of the Suzhou Granite, China. *Canadian Mineralogist*, 34: 1001-1010.
- Whitney, D.L., & Evans, B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95: 185–187.
- Whitworth, M.P. & Feely, M. 1994. The compositional range of magmatic Mn-garnets in the Galway granite, Connemara, Ireland. *Mineralogical Magazine*, 58: 163-168.
- Zagorsky, V.Y.; Makagon, V.M.; Shmakina, B.M. 2003. Systematics of Granitic Pegmatites. *Russian Geology and Geophysics*, 44(5): 422-435.

Anexo I

Mapa geológico integrado da área de estudo em escala 1:50.000

Anexos II a XI

Anexo II – Inclusões na cassiterita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS
(meio digital)

Anexo III – Cassiterita: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio
digital)

Anexo IV – Cassiterita: tabela de resultados analíticos ME/WDS (meio digital)

Anexo V – Gahnita: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio digital)

Anexo VI – Gahnita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS (meio digital)

Anexo VII – Ilmenita: tabela de resultados analíticos de ME/WDS (meio digital)

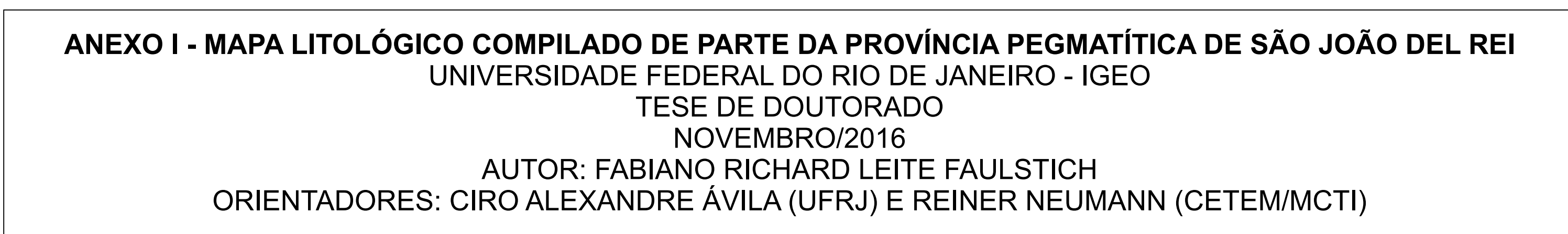
Anexo VIII – Granada: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio
digital)

Anexo IX – Xenotímio: tabela de resultados analíticos de MEV/EDS (meio
digital)

Anexo X – Carta de aceite de artigo (meio digital)

Anexo XI – Artigo submetido para publicação (meio digital)

AUTOR: FABIANO RICHARD LEITE FAULSTICH NOVEMBRO/2016



Inclusoes
Measurement
WDS elements

Condition

	Element	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos.	Peak	Back	Standard	Curr.(A)
1	Al	Ka	TAP	1	15	90,648	10	5.0 (s)	AN_100	2,00E-08
2	Si	Ka	TAP	2	15	77,421	10	5.0 (s)	Enstatite_Al_5	2,00E-08
3	Sr	La	TAP	2	15	74,596	20	10.0 (s)	Sr_AN	2,00E-08
4	Ca	Ka	PETL	3	15	107,585	10	5.0 (s)	DIOPSIDIO	2,00E-08
5	W	La	LIFL	3	15	102,673	10	5.0 (s)	CaWO4	2,00E-08
6	Ta	Ma	PETL	3	15	232,257	10	5.0 (s)	Ta	2,00E-08
7	Ba	La	PETL	3	15	88,926	20	10.0 (s)	Celsiana	2,00E-08
8	Zr	La	PETL	4	15	194,389	20	10.0 (s)	ZrSiO4	2,00E-08
9	Mn	Ka	LIFL	4	15	146,142	10	5.0 (s)	Mn_Hort	2,00E-08
10	U	Ma	PETL	4	15	125,21	20	10.0 (s)	UO2	2,00E-08
11	Ti	Ka	PETL	4	15	88,073	20	10.0 (s)	A-128	2,00E-08
12	Nb	La	PETH	5	15	183,313	10	5.0 (s)	Nb	2,00E-08
13	Pb	Ma	PETH	5	15	169,31	20	10.0 (s)	XGLASS	2,00E-08
14	Fe	Ka	LIFH	5	15	134,632	10	5.0 (s)	Fe3O4	2,00E-08
15	Sn	La	PETH	5	15	115,268	10	5.0 (s)	SnO2	2,00E-08
16	Sc	Ka	PETH	5	15	97,035	20	10.0 (s)	Sc_THORT	2,00E-08

Measurement
Order

Order	Channel 1	2	3	4	5
1	Al_1TAP_	Si_2TAP_	Ca_3PETL	Zr_CH4_P	Nb_5PETH
2	0	Sr_2TAP_	W_3LIFL_	Mn_4LIFL	Pb_CH5_P
3	0	0	Ta_3PETL	U_CH4_PE	Fe_5LIFH
4	0	0	Ba_3PETL	Tl_4PETL	Sn_5PETH
5	0	0	0	0	Sc_5PETH

Rocha encaixante	Amostra_análise	Óxidos (% em peso)														Cátions																	Total	O	Classificação		
		SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	UO ₂	SnO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	BaO	SrO	PbO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	WO ₃	Total	Si	Ti	Zr	U	Sn	Al	Fe	Mn	Ca	Ba	Sr	Pb	Nb	Ta				Sc	W
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_01	0,12	1,52	0,07	0,05	20,51	0,02	10,55	4,46	0,22	0,00	0,04	0,00	40,54	18,32	0,09	0,41	96,93	0,01	0,08	0,00	0,00	0,54	0,00	0,59	0,25	0,02	0	0,00	0	1,22	0,33	0,01	0,01	3,04	6	Ferrowodginite
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_02	0,07	1,81	0,08	0,00	4,88	0,00	12,26	5,75	0,18	0,00	0,07	0,00	56,08	19,22	0,09	0,41	100,90	0,00	0,08	0,00	0	0,12	0	0,62	0,30	0,01	0	0,00	0	1,54	0,32	0,00	0,01	3,01	6	Columbita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_03	0,08	1,57	0,38	0,00	0,84	0,00	14,02	3,79	0,02	0,00	0,66	0,00	42,79	37,59	0,15	0,45	102,37	0,01	0,08	0,01	0	0,02	0,00	0,75	0,21	0,00	0	0,02	0	1,24	0,66	0,01	0,01	3,02	6	Columbita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_04	0,18	1,31	0,37	0,04	2,51	0,00	13,32	4,03	0,03	0,00	0,58	0,00	44,52	34,08	0,14	0,00	101,11	0,01	0,06	0,01	0,00	0,06	0	0,72	0,22	0,00	0	0,02	0	1,30	0,60	0,01	0	3,02	6	Columbita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_05	1,18	1,66	0,11	0,30	0,86	0,39	0,88	0,66	12,12	0,00	0,00	0,29	60,76	15,18	0,03	0,53	94,96	0,07	0,07	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,03	0,78	0	0	0,00	1,64	0,25	0,00	0,01	2,96	6	Pirocloro
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_06	0,05	0,11	0,00	0,02	91,69	0,01	0,04	0,08	1,57	0,00	0,00	0,00	5,43	1,99	0,00	0,00	100,99	0,00	0,01	0	0,00	2,66	0,00	0,00	0,00	0,12	0	0	0	0,18	0,04	0	0	3,02	6	Mistura
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_07	0,31	1,07	0,05	6,15	6,47	0,09	2,93	0,03	0,01	0,00	0,69	23,76	16,16	37,43	0,16	0,12	95,44	0,03	0,08	0,00	0,13	0,24	0,01	0,23	0,00	0,00	0,00	0,04	0,60	0,69	0,96	0,01	0,00	3,03	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_08	0,80	1,02	0,18	6,50	5,52	0,12	3,14	0,02	0,12	0,06	0,84	22,05	16,67	39,31	0,15	0,09	96,58	0,07	0,07	0,01	0,13	0,20	0,01	0,24	0,00	0,01	0,00	0,04	0,54	0,69	0,97	0,01	0,00	3,01	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_09	9,44	0,73	6,14	1,42	3,88	1,44	2,35	0,15	1,02	0,05	0,41	3,39	15,67	28,56	0,10	0,06	74,83	0,77	0,04	0,24	0,03	0,13	0,14	0,16	0,01	0,09	0,00	0,02	0,07	0,58	0,63	0,01	0,00	2,91	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_10	9,80	0,82	5,03	2,63	3,58	1,07	1,68	0,09	0,66	0,19	0,74	3,65	14,03	38,80	0,14	0,06	82,95	0,76	0,05	0,19	0,05	0,11	0,10	0,11	0,01	0,05	0,01	0,03	0,08	0,49	0,81	0,01	0,00	2,84	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_11	0,80	1,52	0,14	1,18	2,45	0,08	0,56	0,29	10,96	0,00	1,18	0,38	25,66	54,17	0,21	0,27	99,84	0,06	0,08	0,00	0,02	0,07	0,01	0,03	0,02	0,82	0	0,05	0,01	0,81	1,03	0,01	0,00	3,01	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_12	0,70	1,05	0,05	0,57	35,34	0,15	0,47	0,22	3,37	0,00	0,53	4,43	20,03	31,22	0,13	0,19	98,44	0,05	0,06	0,00	0,01	1,04	0,01	0,03	0,01	0,27	0	0,02	0,09	0,67	0,62	0,01	0,00	2,89	6	Estanopirocloro
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_13	0,39	1,60	0,05	1,59	2,80	0,02	0,24	0,20	0,31	0,25	1,42	10,43	20,29	59,96	0,28	0,00	99,82	0,03	0,10	0,00	0,03	0,09	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,23	0,74	1,31	0,02	0	2,67	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_14	0,25	1,39	0,00	1,39	2,91	0,01	0,13	0,17	1,96	0,07	1,45	10,35	18,56	60,33	0,26	0,00	99,23	0,02	0,09	0	0,03	0,09	0,00	0,01	0,01	0,17	0,00	0,07	0,23	0,68	1,33	0,02	0	2,75	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_15	2,62	1,32	0,50	4,39	8,55	0,36	0,47	0,08	0,15	0,13	0,72	2,51	15,57	41,12	0,16	0,17	78,83	0,24	0,09	0,02	0,09	0,32	0,04	0,04	0,01	0,02	0,00	0,04	0,06	0,65	1,04	0,01	0,00	2,67	6	Estanomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_16	0,11	0,63	0,44	0,96	5,47	0,00	0,53	0,48	12,64	0,00	1,41	2,27	14,67	59,48	0,27	0,04	99,40	0,01	0,04	0,02	0,02	0,16	0	0,03	0,03	1,02	0	0,06	0,05	0,50	1,22	0,02	0,00	3,17	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_17	0,35	1,59	0,02	5,97	3,44	0,09	2,24	0,86	0,00	0,07	0,79	19,07	13,03	43,64	0,19	0,11	91,45	0,03	0,12	0,00	0,13	0,13	0,01	0,18	0,07	0	0,00	0,04	0,50	0,57	1,16	0,02	0,00	2,97	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_18	1,87	1,14	0,46	4,11	12,46	0,22	2,09	0,68	0,29	0,00	0,48	12,09	9,82	31,39	0,14	0,00	77,24	0,20	0,09	0,02	0,10	0,52	0,03	0,18	0,06	0,03	0	0,03	0,34	0,47	0,90	0,01	0,00	2,99	6	Estanomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_19	0,03	1,18	0,07	0,01	0,48	0,01	14,11	4,30	0,03	0,00	0,60	0,00	46,07	36,86	0,20	0,46	104,42	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	0,74	0,23	0,00	0	0,02	0	1,31	0,63	0,01	0,01	3,02	6	Columbita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_20	2,75	0,70	0,28	0,14	1,93	0,67	6,88	3,63	4,95	0,02	0,00	0,00	56,31	13,67	0,08	0,51	92,52	0,17	0,03	0,01	0,00	0,05	0,05	0,36	0,19	0,33	0,00	0	0	1,57	0,23	0,00	0,01	3,00	6	Columbita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_21	0,25	1,56	0,00	0,16	2,88	0,03	0,21	0,30	11,78	2,77	1,47	1,65	15,72	59,77	0,21	0,00	98,76	0,02	0,09	0	0,00	0,09	0,00	0,01	0,02	0,95	0,08	0,06	0,03	0,54	1,23	0,01	0	3,15	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_22	0,08	2,53	1,37	0,05	10,23	0,05	12,42	2,31	0,03	0,00	1,10	0,00	20,33	50,68	0,22	0,49	101,89	0,01	0,14	0,05	0,00	0,29	0,00	0,74	0,14	0,00	0	0,05	0	0,65	0,98	0,01	0,01	3,06	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_23	0,02	0,48	0,04	0,00	79,64	0,00	2,96	1,84	0,47	0,00	0,00	0,00	14,16	5,07	0,00	0,21	104,89	0,00	0,02	0,00	0	2,16	0,00	0,17	0,11	0,03	0	0	0	0,44	0,09	0	0,00	3,03	6	Mistura
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_24	0,09	0,11	0,30	0,01	92,13	0,00	1,07	0,25	0,44	0,00	0,00	0,00	1,49	6,20	0,00	0,10	102,19	0,01	0,01	0,01	0,00	2,71	0	0,07	0,02	0,03	0	0	0	0,05	0,12	0	0,00	3,02	6	Cassiterita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_25	0,01	0,05	0,15	0,00	97,71	0,00	0,54	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,34	1,53	0,00	0,00	100,78	0,00	0,00	0,01	0	2,92	0	0,03	0	0,04	0	0	0	0,01	0,03	0	0	3,04	6	Cassiterita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_26	0,10	1,03	0,07	0,00	2,03	0,03	14,08	0,66	0,06	0,00	1,92	0,00	7,61	77,74	0,35	0,01	105,68	0,01	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,90	0,04	0,00	0	0,08	0	0,26	1,61	0,02	0,00	3,05	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_27	0,08	0,75	0,00	0,03	0,99	0,00	0,30	0,65	15,60	0,00	2,02	0,00	2,55	80,40	0,36	0,00	103,74	0,01	0,04	0	0,00	0,03	0	0,02	0,04	1,28	0	0,09	0,00	0,09	1,67	0,02	0	3,29	6	Microlita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_28	0,00	1,22	0,21	0,00	0,85	0,03	12,76	3,90	0,00	0,00	1,15	0,00	26,15	58,33	0,23	0,16	105,00	0	0,06	0,01	0,00	0,02	0,00	0,74	0,23	0,00	0	0,05	0	0,82	1,09	0,01	0,00	3,03	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_29	0,04	1,57	1,10	0,00	11,62	0,00	12,00	2,35	0,08	0,00	1,30	0,00	14,31	56,20	0,23	0,95	101,73	0,00	0,09	0,04	0,00	0,34	0	0,74	0,15	0,01	0	0,06	0	0,48	1,13	0,02	0,02	3,07	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_30	0,08	0,84	0,16	0,00	0,52	0,02	12,90	3,65	0,02	0,00	1,22	0,00	27,72	55,47	0,25	0,06	102,91	0,01	0,04	0,01	0	0,01	0,00	0,75	0,22	0,00	0,00	0,05	0	0,87	1,05	0,02	0,00	3,03	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_31	0,59	2,58	0,00	8,92	3,91	0,10	0,28	0,00	0,17	0,18	1,24	2,61	13,56	60,39	0,25	0,28	95,04	0,05	0,16	0	0,17	0,13	0,01	0,02	0	0,02	0,01	0,06	0,06	0,52	1,39	0,02	0,01	2,61	6	Estanomicrolita
Metadiorito Brumado	FA02_Incl_32	0,71	1,74	0,00	7,95	4,72	0,13	0,20	0,01	0,30	0,18	1,16	2,57	14,10	56,49	0,24	0,23	90,74	0,06	0,12	0,00	0,16	0														

Anexo IV - Inclusões Cassiterita_Resultados Analíticos WDS.xlsx

Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_02	1,10	1,09	0,01	0,14	1,52	0,02	0,05	0,16	0,00	0,00	0,00	3,93	8,80	65,09	0,31	0,12	82,34	0,11	0,08	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,10	0,39	1,74	0,03	0,00	2,53	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_03	0,82	1,04	0,00	0,06	1,33	0,02	0,08	0,09	0,00	0,00	0,00	30,02	10,05	54,94	0,31	0,01	98,77	0,08	0,08	0	0,00	0,05	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,79	0,44	1,45	0,03	0,00	2,93	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_04	0,72	1,37	0,02	0,05	1,67	0,01	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	30,94	17,43	42,49	0,23	0,19	95,19	0,07	0,10	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,76	1,11	0,02	0,00	2,94	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_05	1,58	1,77	0,00	1,93	2,60	0,13	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	15,44	22,16	50,03	0,25	0,09	97,39	0,13	0,11	0	0,03	0,08	0,01	0,10	0	0,00	0,00	0,00	0,34	0,82	1,11	0,02	0,00	2,74	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_06	0,93	1,06	0,03	0,57	1,84	0,00	0,15	0,06	0,00	0,00	0,00	29,29	13,24	51,51	0,27	0,23	99,18	0,09	0,08	0,00	0,01	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,74	0,56	1,32	0,02	0,01	2,91	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_07	0,77	3,87	0,00	7,42	4,02	0,02	1,18	0,04	0,00	0,00	0,00	7,02	25,35	43,69	0,17	0,04	93,57	0,06	0,23	0	0,13	0,13	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,15	0,91	0,95	0,01	0,00	2,65	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_08	1,78	1,91	0,89	3,07	2,43	0,23	1,61	0,08	0,00	0,00	0,00	20,46	14,68	43,65	0,24	0,00	91,03	0,17	0,13	0,04	0,06	0,09	0,02	0,13	0,01	0,00	0,00	0,51	0,62	1,11	0,02	0	2,91	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_09	0,96	1,64	0,65	0,00	4,08	0,00	12,44	3,42	0,00	0,00	0,00	0,00	24,28	53,38	0,23	0,00	101,08	0,07	0,09	0,02	0,00	0,11	0,00	0,73	0,20	0,00	0,00	0	0,77	1,02	0,01	0	3,03	6	Tantalita-(Fe)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_10	0,40	0,00	0,07	0,00	86,91	0,02	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,43	0,00	0,00	88,08	0,03	0	0,00	0	2,95	0,00	0,01	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,01	0	0	3,01	6	Cassiterita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_11	24,60	0,06	51,76	0,19	1,18	1,51	0,79	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,24	0,83	0,35	0,00	81,55	1,40	0,00	1,44	0,00	0,03	0,10	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0	3,05	6	Mistura	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_12	0,82	1,16	0,00	0,00	1,65	0,00	0,02	0,15	0,00	0,00	0,00	32,09	9,88	53,43	0,26	0,17	99,63	0,08	0,09	0	0	0,06	0	0,00	0,01	0,00	0,00	0,84	0,44	1,42	0,02	0,00	2,97	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_13	0,94	1,28	0,00	0,05	1,78	0,00	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	31,93	8,23	52,80	0,27	0,06	97,44	0,09	0,10	0	0,00	0,07	0	0,00	0,01	0,00	0,00	0,87	0,38	1,45	0,02	0,00	2,99	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_14	1,05	2,43	0,04	1,19	2,87	0,02	0,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,08	9,41	61,21	0,22	0,21	78,80	0,10	0,18	0,00	0,03	0,11	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,42	1,63	0,02	0,01	2,50	6	Tantalita-(Mn)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_15	1,44	0,40	0,04	0,00	0,83	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,25	3,78	71,86	0,31	0,10	79,29	0,15	0,03	0,00	0	0,03	0	0	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,18	2,02	0,03	0,00	2,48	6	Tantalita-(Fe)
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_16	1,08	1,78	0,00	0,49	2,93	0,01	0,02	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	14,14	57,94	0,24	0,00	78,76	0,10	0,13	0	0,01	0,11	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0	0,61	1,50	0,02	0	2,49	6	Tantalita-(Mn)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_17	0,71	1,39	0,01	0,19	1,43	0,01	0,02	0,33	0,00	0,00	0,00	30,57	15,90	47,89	0,22	0,00	98,67	0,07	0,10	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,77	0,67	1,22	0,02	0	2,93	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_18	1,04	1,51	0,00	0,04	2,51	0,01	0,12	0,06	0,00	0,00	0,00	0,20	57,47	23,10	0,10	0,03	86,18	0,07	0,08	0	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78	0,43	0,01	0,00	2,46	6	Columbita-(Fe)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_19	0,86	2,07	0,05	3,02	2,01	0,03	1,03	0,15	0,00	0,00	0,00	29,06	16,29	40,25	0,20	0,01	95,02	0,08	0,15	0,00	0,06	0,08	0,00	0,08	0,01	0,00	0,00	0,75	0,70	1,05	0,02	0,00	2,99	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_20	1,71	1,66	0,51	2,04	6,45	0,72	1,36	0,07	0,00	0,00	0,00	20,53	15,67	28,72	0,22	0,04	79,70	0,18	0,13	0,03	0,05	0,27	0,09	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,57	0,73	0,81	0,02	0,00	2,99	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_21	0,71	1,10	0,09	0,04	0,35	0,01	14,36	3,58	0,00	0,00	0,00	0,00	39,71	41,35	0,17	0,24	101,72	0,05	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,78	0,20	0,00	0,00	0	1,17	0,74	0,01	0,00	3,02	6	Columbita-(Fe)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_22	0,57	0,31	0,00	0,00	0,22	0,00	0,01	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	70,88	10,01	0,00	0,21	82,39	0,04	0,02	0	0	0,01	0	0,00	0,01	0,00	0,00	0	2,17	0,18	0,00	0,00	2,42	6	Columbita-(Mn)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_23	1,03	0,90	0,00	0,00	1,54	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	28,37	5,29	59,22	0,31	0,00	96,69	0,10	0,07	0	0	0,06	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,78	0,24	1,64	0,03	0	2,93	6	Plumbomicrolita
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_24	0,68	1,12	0,07	0,00	0,30	0,00	13,52	4,41	0,00	0,00	0,00	0,00	39,08	41,53	0,19	0,14	101,04	0,04	0,06	0,00	0	0,01	0	0,75	0,25	0,00	0,00	0	1,16	0,74	0,01	0,00	3,02	6	Columbita-(Fe)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_25	0,53	0,95	0,37	0,01	0,54	0,02	14,40	4,12	0,00	0,00	0,00	0,00	49,89	31,07	0,16	0,08	102,15	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,75	0,22	0,00	0,00	0	1,40	0,53	0,01	0,00	3,01	6	Columbita-(Fe)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_26	0,79	0,68	0,01	0,38	1,48	0,08	1,08	0,47	0,00	0,00	0,00	20,09	32,26	37,39	0,22	0,24	95,17	0,07	0,04	0,00	0,01	0,05	0,01	0,07	0,03	0,00	0,00	0,44	1,20	0,83	0,02	0,01	2,77	6	Plumbopirocloro	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_27	1,04	2,12	0,00	2,86	2,36	0,03	1,20	0,08	0,00	0,00	0,00	27,12	16,88	42,52	0,23	0,08	96,52	0,10	0,15	0	0,06	0,09	0,00	0,09	0,01	0,00	0,00	0,67	0,70	1,06	0,02	0,00	2,95	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_28	2,22	1,09	0,52	2,60	2,11	0,46	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	24,64	13,65	38,10	0,26	0,07	87,60	0,22	0,08	0,03	0,06	0,08	0,05	0,16	0	0,00	0,00	0,66	0,62	1,03	0,02	0,00	3,02	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_29	1,36	1,77	0,05	1,84	2,34	0,04	0,59	0,03	0,00	0,00	0,00	11,41	9,22	66,31	0,32	0,24	95,52	0,12	0,12	0,00	0,04	0,08	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,27	0,37	1,59	0,02	0,01	2,67	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_30	1,15	2,00	0,06	1,78	2,69	0,09	0,37	0,01	0,00	0,00	0,00	10,00	21,71	53,33	0,28	0,18	93,63	0,09	0,12	0,00	0,03	0,09	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,22	0,81	1,20	0,02	0,00	2,63	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_31	1,02	1,30	0,01	0,06	2,68	0,03	0,06	0,12	0,00	0,00	0,00	32,01	13,83	41,99	0,28	0,00	93,40	0,10	0,10	0,00	0,00	0,11	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,87	0,63	1,15	0,02	0	3,01	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_32	4,99	1,79	0,02	0,39	2,94	0,35	0,11	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	8,35	60,80	0,25	0,00	80,36	0,44	0,12	0,00	0,01	0,10	0,04	0,01	0,03	0,00	0,00	0	0,34	1,47	0,02	0	2,58	6	Tantalita-(Mn)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_33	9,45	1,37	0,07	0,03	1,98	1,02	0,04	0,42	0,00	0,00	0,00	3,55	6,45	59,73	0,25	0,22	84,58	0,76	0,08	0,00	0,00	0,06	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,08	0,24	1,31	0,02	0,00	2,69	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_34	0,97	1,23	0,02	0,00	1,54	0,03	0,04	0,23	0,00	0,00	0,00	31,89	11,41	51,22	0,27	0,11	98,95	0,09	0,09	0,00	0	0,06	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,83	0,50	1,35	0,02	0,00	2,97	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_35	1,17	0,82	0,00	0,00	2,39	0,08	0,04	0,15	0,00	0,00	0,00	10,53	9,27	61,58	0,22	0,00	86,25	0,11	0,06	0	0	0,09	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,28	0,41	1,64	0,02	0,00	2,64	6	Plumbomicrolita	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_36	1,03	0,97	0,00	0,03	2,54	0,00	0,05	0,21	0,00	0,00	0,00	0,10	15,65	59,11	0,23	0,00	79,91	0,10	0,07	0	0,00	0,10	0	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,66	1,51	0,02	0	2,48	6	Tantalita-(Mn)	
Metadiorito Brumado	FA06A_Incl_37	0,82	0,98	0,00	0,00	2,47	0,02	0,03	0,17	0,00	0,00	0,00	32,65	13,58	47,53	0,23	0,00	98,46	0,08	0,07	0	0	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,85								

Anexo IV - Inclusões Cassiterita_Resultados Analíticos WDS.xlsx

Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_05	0,92	0,36	0,01	0,00	0,05	0,00	7,59	8,94	0,04	0,00	0,00	0,00	26,93	53,50	0,26	0,14	98,75	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0	0,46	0,54	0,00	0,00	0,00	0	0,87	1,04	0,02	0,00	3,03	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_06	0,76	1,13	0,00	0,00	6,58	0,03	0,14	0,08	0,06	0,00	0,00	23,74	15,46	47,64	0,25	0,18	96,05	0,07	0,08	0	0	0,24	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,59	0,64	1,19	0,02	0,00	2,85	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_07	0,33	0,35	0,00	0,04	0,45	0,03	6,89	10,74	0,60	0,00	0,00	0,00	57,70	19,99	0,18	0,27	97,56	0,02	0,02	0	0,00	0,01	0,00	0,36	0,57	0,04	0,00	0,00	0	1,63	0,34	0,01	0,00	3,00	6	Columbita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_08	1,30	1,44	0,03	0,58	3,66	0,01	0,04	0,08	0,44	0,00	0,00	9,71	11,11	65,79	0,33	0,09	94,61	0,11	0,09	0,00	0,01	0,13	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,23	0,44	1,56	0,03	0,00	2,65	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_09	0,80	0,45	0,01	0,00	0,48	0,00	5,89	8,92	1,76	0,00	0,00	0,00	29,79	51,23	0,26	0,15	99,75	0,06	0,02	0,00	0	0,01	0	0,34	0,53	0,13	0,00	0,00	0	0,94	0,97	0,02	0,00	3,03	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_10	1,05	0,51	0,09	0,00	0,27	0,02	7,21	9,18	0,04	0,00	0,00	0,00	25,08	57,48	0,28	0,33	101,52	0,07	0,03	0,00	0	0,01	0,00	0,43	0,55	0,00	0,00	0,00	0	0,80	1,10	0,02	0,01	3,02	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_11	1,08	0,19	0,20	0,02	4,20	0,00	6,76	8,22	0,05	0,00	0,00	0,00	16,61	63,83	0,30	0,20	101,65	0,08	0,01	0,01	0,00	0,12	0	0,42	0,51	0,00	0,00	0,00	0	0,55	1,28	0,02	0,00	3,01	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_12	1,11	0,46	0,02	0,00	2,20	0,01	0,49	0,45	0,19	0,00	0,00	21,17	4,72	64,47	0,32	0,19	95,81	0,11	0,03	0,00	0,00	0,09	0,00	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,56	0,21	1,72	0,03	0,01	2,85	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_13	0,34	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	12,86	6,79	0,00	0,00	0,00	0,00	59,16	22,35	0,13	0,18	102,34	0,02	0,02	0	0,00	0,00	0,00	0,64	0,34	0	0,00	0,00	0	1,60	0,36	0,01	0,00	3,01	6	Columbita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_14	0,31	0,51	0,10	0,01	0,07	0,03	9,48	9,68	0,00	0,00	0,00	0,00	58,84	21,82	0,14	0,43	101,42	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,49	0,00	0,00	0,00	0	1,61	0,36	0,01	0,01	3,00	6	Columbita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_15	1,22	0,13	0,08	0,00	0,03	0,00	7,27	8,73	0,03	0,00	0,00	0,00	20,63	62,56	0,30	0,00	100,96	0,09	0,01	0,00	0	0,00	0	0,44	0,54	0,00	0,00	0,00	0	0,68	1,24	0,02	0	3,02	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_16	0,92	0,24	0,03	0,00	0,19	0,04	7,27	8,93	0,04	0,00	0,00	0,00	24,93	58,11	0,29	0,02	101,01	0,07	0,01	0,00	0	0,01	0,00	0,43	0,54	0,00	0,00	0,00	0	0,80	1,13	0,02	0,00	3,01	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_17	0,97	0,16	0,01	0,00	0,06	0,04	7,42	8,81	0,02	0,00	0,00	0,00	25,36	58,81	0,27	0,00	101,93	0,07	0,01	0,00	0	0,00	0,00	0,44	0,53	0,00	0,00	0,00	0	0,81	1,13	0,02	0,00	3,01	6	Tantalita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_18	1,05	0,42	0,04	0,01	2,36	0,01	0,02	0,06	12,69	0,00	0,00	0,00	9,53	64,59	0,29	0,00	91,06	0,09	0,03	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	1,11	0,00	0,00	0	0,35	1,44	0,02	0	3,12	6	Plumbomicrolita
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_19	1,32	0,45	0,00	0,21	2,46	0,01	0,01	0,05	12,31	0,00	0,00	0,00	9,08	65,50	0,33	0,14	91,87	0,11	0,03	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,00	0,00	0	0,33	1,45	0,02	0,00	3,10	6	Plumbomicrolita
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_20	1,17	0,57	0,04	0,00	4,57	0,04	0,02	0,00	0,13	0,00	0,00	9,72	5,47	68,13	0,33	0,02	90,21	0,11	0,04	0,00	0	0,17	0,00	0,00	0	0,01	0,00	0,00	0,25	0,24	1,77	0,03	0,00	2,64	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_21	1,47	0,54	0,06	0,03	3,99	0,08	0,07	0,00	0,05	0,00	0,00	13,35	9,36	59,75	0,33	0,18	89,26	0,14	0,04	0,00	0,00	0,15	0,01	0,01	0	0,01	0,00	0,00	0,34	0,41	1,56	0,03	0,00	2,70	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_22	1,20	0,81	0,00	0,09	24,76	0,11	0,25	0,02	0,28	0,00	0,00	10,66	10,45	47,62	0,33	0,21	96,68	0,10	0,05	0	0,00	0,83	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,24	0,40	1,09	0,02	0,00	2,78	6	Estanomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_23	1,30	0,89	0,00	0,10	2,93	0,03	0,44	0,20	0,14	0,00	0,00	11,23	11,24	61,67	0,29	0,00	90,45	0,12	0,06	0	0,00	0,11	0,00	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,28	0,47	1,55	0,02	0	2,68	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_24	0,37	0,31	0,00	0,00	0,06	0,00	7,26	11,71	0,05	0,00	0,00	0,00	58,30	23,02	0,16	0,43	101,67	0,02	0,01	0	0	0,00	0	0,37	0,60	0,00	0,00	0,00	0	1,60	0,38	0,01	0,01	3,00	6	Columbita-(Mn)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_25	0,94	0,25	0,00	0,00	0,06	0,00	10,13	6,66	0,02	0,00	0,00	0,00	25,84	57,62	0,28	0,02	101,81	0,07	0,01	0	0	0,00	0	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0	0,82	1,11	0,02	0,00	3,03	6	Tantalita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_26	0,88	0,56	0,15	0,00	0,23	0,05	10,36	6,43	0,02	0,00	0,00	0,00	29,76	52,91	0,29	0,43	102,07	0,06	0,03	0,00	0	0,01	0,00	0,60	0,37	0,00	0,00	0,00	0	0,92	0,99	0,02	0,01	3,01	6	Tantalita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_27	0,83	0,49	0,05	0,00	0,28	0,01	10,30	6,45	0,01	0,00	0,00	0,00	29,50	54,70	0,29	0,36	103,28	0,06	0,03	0,00	0	0,01	0,00	0,59	0,37	0,00	0,00	0,00	0	0,91	1,02	0,02	0,01	3,01	6	Tantalita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_28	1,37	0,84	0,07	0,00	1,01	0,00	13,24	1,96	0,03	0,00	0,00	0,00	7,36	78,22	0,37	0,01	104,48	0,10	0,05	0,00	0	0,03	0,00	0,83	0,13	0,00	0,00	0,00	0	0,25	1,60	0,02	0,00	3,03	6	Tantalita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_29	1,42	0,76	0,03	0,00	0,95	0,00	13,21	2,01	0,03	0,00	0,00	0,00	6,87	77,03	0,35	0,00	102,65	0,11	0,04	0,00	0	0,03	0	0,85	0,13	0,00	0,00	0,00	0	0,24	1,61	0,02	0	3,04	6	Tantalita-(Fe)	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_30	1,31	0,91	0,06	0,03	3,13	0,06	0,07	0,10	0,22	0,00	0,00	1,78	14,12	62,95	0,28	0,19	85,21	0,12	0,06	0,00	0,00	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,04	0,57	1,54	0,02	0,00	2,52	6	Estanomicrolita
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_Incl_31	1,45	1,16	0,08	0,68	1,98	0,13	0,40	0,18	0,40	0,00	0,00	13,82	7,71	64,96	0,32	0,17	93,42	0,13	0,08	0,00	0,01	0,07	0,01	0,03	0,01	0,04	0,00	0,00	0,34	0,32	1,63	0,03	0,00	2,73	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_01	0,62	0,07	0,00	0,00	82,62	0,00	2,73	0,16	0,35	0,00	0,00	0,02	1,19	18,84	0,01	0,00	106,61	0,04	0,00	0	0	2,37	0	0,16	0,01	0,03	0	0	0,00	0,04	0,37	0,00	0,00	3,03	6	Mistura	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_02	1,35	0,33	0,09	0,00	3,45	0,00	0,04	0,03	13,00	0,00	0,00	0,00	3,82	71,80	0,34	0,00	94,25	0,12	0,02	0,00	0	0,12	0	0,00	0,00	1,19	0,00	0	0	0,15	1,67	0,03	0	3,30	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_03	1,22	0,13	0,00	0,00	1,61	0,01	0,01	0,00	1,97	0,18	0,00	18,51	2,42	69,44	0,40	0,00	95,91	0,12	0,01	0	0	0,07	0,00	0,00	0,00	0,22	0,01	0	0,51	0,11	1,94	0,04	0	3,03	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_04	1,41	0,34	0,09	0,00	3,85	0,05	0,12	0,00	0,08	0,27	0,00	24,10	3,71	61,59	0,32	0,00	95,93	0,15	0,03	0,00	0	0,16	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0	0,68	0,18	1,75	0,03	0	3,02	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_05	1,94	0,41	0,00	0,00	4,69	0,15	0,04	0,07	11,39	0,00	0,00	3,13	3,62	68,25	0,29	0,11	94,08	0,17	0,03	0	0	0,16	0,02	0,00	0,01	1,05	0	0	0,07	0,14	1,60	0,02	0,00	3,28	6	Microlita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_06	1,62	0,38	0,02	0,00	5,09	0,09	0,00	0,00	0,20	0,20	0,00	22,55	3,65	62,74	0,33	0,06	96,93	0,16	0,03	0,00	0	0,21	0,01	0	0,00	0,02	0,01	0	0,62	0,17	1,73	0,03	0,00	2,99	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_07	1,23	0,64	0,04	0,00	2,85	0,04	0,10	0,01	1,05	0,11	0,00	20,73	4,56	64,62	0,32	0,14	96,44	0,12	0,05	0,00	0	0,11	0,01	0,01	0,00	0,11	0,00	0	0,56	0,21	1,77	0,03	0,00	2,99	6	Plumbomicrolita	
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA010B_Incl_08	0,87	0,40	0,00	0,11	69,15	0,14	0,31	0,00	0,49	0,00	0,00	5,80	3,46	23,26	0,10	0,09	104,20	0,07	0,02	0,00	0,00	2,09	0,01	0,02	0	0,04	0	0	0,12	0,12	0,48	0,01	0,00	2,98	6	Mistura	
Filitos da SMVS Rio das Mortes</																																						

Rocha encaixante	Amostra_analise	Óxidos (% em peso)					Proporção atômica (2 oxigênios)					Ta/(Ta+Nb)
		SnO ₂	FeO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Total	Sn	Fe	Nb	Ta	Total	
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 1	94,8	1,2	0,0	4,0	100	0,95	0,03	0,00	0,03	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 2	98,8	0,0	0,0	1,2	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 3	95,3	0,0	0,0	4,7	100	0,96	0,00	0,00	0,03	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 4	98,0	0,0	0,0	2,0	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 5	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 6	92,8	1,7	0,0	5,5	100	0,93	0,04	0,00	0,04	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 7	98,7	0,0	0,0	1,3	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 8	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 9	97,7	0,0	0,0	2,3	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 10	88,5	1,5	3,3	6,7	100	0,88	0,03	0,04	0,05	1,00	0,55
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 11	95,7	0,9	1,5	1,9	100	0,95	0,02	0,02	0,01	1,00	0,43
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 12	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita_G 13	91,0	1,4	2,8	4,8	100	0,91	0,03	0,03	0,03	1,00	0,50
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 1	90,2	1,8	5,2	2,8	100	0,89	0,04	0,06	0,02	1,00	0,24
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 2	94,0	1,6	3,2	1,3	100	0,93	0,03	0,04	0,01	1,00	0,19
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 3	93,2	1,6	2,7	2,4	100	0,92	0,03	0,03	0,02	1,00	0,34
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 4	78,5	3,2	12,5	5,8	100	0,75	0,06	0,14	0,04	1,00	0,22
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 5	93,2	0,9	3,7	2,3	100	0,92	0,02	0,04	0,02	1,00	0,28
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 6	97,8	0,0	1,7	0,5	100	0,97	0,00	0,02	0,00	1,00	0,15
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 7	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 8	93,7	1,6	2,6	2,0	100	0,93	0,03	0,03	0,01	1,00	0,32
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 9	94,5	1,6	2,0	1,9	100	0,94	0,03	0,02	0,01	1,00	0,36
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 10	95,1	1,2	2,1	1,6	100	0,94	0,03	0,02	0,01	1,00	0,32
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 11	97,6	0,0	1,5	1,0	100	0,97	0,00	0,02	0,01	1,00	0,28
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 12	92,4	1,5	3,5	2,6	100	0,91	0,03	0,04	0,02	1,00	0,31
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 13	98,5	0,0	0,0	1,5	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA02_Cassiterita 0,8A_G 14	96,4	0,0	2,1	1,6	100	0,96	0,00	0,02	0,01	1,00	0,31
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 1	99,0	0,0	0,0	1,0	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 2	90,9	1,7	0,8	6,6	100	0,91	0,03	0,01	0,05	1,01	0,83
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 3	96,6	0,0	1,0	2,4	100	0,96	0,00	0,01	0,02	1,00	0,59
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 4	98,3	0,0	0,0	1,7	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 5	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 6	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 7	98,7	0,0	0,0	1,3	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 8	98,4	0,0	0,0	1,6	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 9	93,8	1,4	1,1	3,6	100	0,94	0,03	0,01	0,02	1,01	0,66
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 10	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 11	96,4	1,5	0,0	2,1	100	0,97	0,03	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 12	90,5	2,1	2,2	5,2	100	0,90	0,04	0,02	0,04	1,00	0,59
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 13	90,1	0,0	2,2	7,7	100	0,90	0,00	0,02	0,05	1,00	0,68
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 14	98,6	0,0	0,0	1,4	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 15	98,6	0,0	0,0	1,4	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_Cassiterita_G 16	95,0	1,4	1,3	2,3	100	0,95	0,03	0,01	0,02	1,00	0,51
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 1	98,7	0,0	0,0	1,3	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 2	91,6	1,4	1,6	5,3	100	0,92	0,03	0,02	0,04	1,00	0,67
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 3	97,5	0,0	1,0	1,5	100	0,97	0,00	0,01	0,01	1,01	0,48
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 4	97,6	0,0	0,0	2,4	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 5	97,5	0,0	0,0	2,5	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 6	99,7	0,0	0,0	0,3	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 7	98,9	0,0	0,0	1,1	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 8	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 9	98,4	0,0	0,0	1,6	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 10	99,3	0,0	0,0	0,7	100	0,99	0,00	0,00	0,00	1,01	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 11	97,7	0,0	1,6	0,7	100	0,97	0,00	0,02	0,01	1,00	0,22
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 12	98,4	0,0	0,0	1,6	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 13	97,6	0,0	0,5	1,9	100	0,98	0,00	0,01	0,01	1,00	0,69
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 14	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,01	-
Metadiorito Brumado	FA06_Cassiterita_G 15	98,0	0,0	0,0	2,0	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 1	98,3	0,0	0,0	1,7	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 2	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 3	98,0	0,0	0,0	2,0	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 4	98,4	0,0	0,0	1,6	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 5	99,0	0,0	0,0	1,0	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 6	92,7	1,3	4,0	2,0	100	0,91	0,03	0,04	0,01	1,00	0,23
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 7	98,2	0,0	0,0	1,8	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 8	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 9	98,1	0,0	0,0	1,9	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 10	93,7	0,0	2,8	3,5	100	0,93	0,00	0,03	0,02	1,00	0,42
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 11	98,2	0,0	0,0	1,8	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 12	98,1	0,0	0,0	1,9	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 13	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 14	99,4	0,0	0,0	0,6	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 15	96,3	0,0	2,4	1,3	100	0,96	0,00	0,03	0,01	1,00	0,24
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 16	95,5	1,5	2,1	0,8	100	0,95	0,03	0,02	0,01	1,00	0,19
Metadiorito Brumado	FA06 Cassiterita 05A_G_ 17	97,9	1,4	0,0	0,6	100	0,98	0,03	0,00	0,00	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 1	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 2	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 3	99,7	0,0	0,0	0,3	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 4	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 5	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 6	99,1	0,0	0,0	0,9	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 7	99,1	0,0	0,6	0,3	100	0,99	0,00	0,01	0,00	1,00	0,20
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 8	98,4	0,0	0,7	0,9	100	0,98	0,00	0,01	0,01	1,00	0,44
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 9	98,1	0,0	0,6	1,3	100	0,98	0,00	0,01	0,01	1,00	0,57
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 10	99,7	0,0	0,0	0,3	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 11	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 12	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 13	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 14	98,4	0,0	0,0	1,6	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 15	98,5	0,0	0,0	1,5	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 16	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritápolis	FA05_Cassiterita_G 17	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-

Metagranitoide Ritópolis	FA05_Cassiterita_G 18	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 1	97,9	0,0	0,0	2,1	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 2	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 3	92,6	1,3	1,3	4,7	100	0,93	0,03	0,01	0,03	1,01	0,68
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 4	98,6	0,0	0,0	1,4	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 5	96,3	0,0	1,1	2,6	100	0,96	0,00	0,01	0,02	1,00	0,60
Metagranitoide Ritópolis	FA08_Cassiterita_G 6	97,9	0,0	0,0	2,1	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 1	98,5	0,0	0,0	1,5	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 2	86,2	1,7	0,0	12,1	100	0,88	0,04	0,00	0,08	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 3	96,2	0,0	0,0	3,8	100	0,97	0,00	0,00	0,03	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 4	84,4	2,6	0,0	13,0	100	0,86	0,06	0,00	0,09	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 5	98,9	0,0	0,0	1,1	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 7	83,7	2,6	0,0	13,8	100	0,85	0,06	0,00	0,10	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 8	92,2	1,7	0,0	6,1	100	0,93	0,04	0,00	0,04	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 9	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 10	92,2	1,5	0,0	6,3	100	0,93	0,03	0,00	0,04	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 11	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 12	85,6	2,7	0,0	11,7	100	0,87	0,06	0,00	0,08	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 13	84,2	2,4	0,0	13,4	100	0,86	0,05	0,00	0,09	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 14	89,4	2,3	0,0	8,2	100	0,90	0,05	0,00	0,06	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10_Cassiterita_G 15	91,5	1,8	0,0	6,8	100	0,92	0,04	0,00	0,05	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 9	96,7	0,0	0,0	3,3	100	0,97	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 8	97,7	0,0	0,0	2,3	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 7	97,5	0,0	0,0	2,5	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,01	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 6	89,9	2,1	0,0	8,1	100	0,91	0,04	0,00	0,06	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 5	85,3	2,2	0,0	12,5	100	0,87	0,05	0,00	0,09	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 4	95,8	0,0	0,3	3,9	100	0,96	0,00	0,00	0,03	1,00	0,89
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 3	96,7	0,0	0,0	3,3	100	0,97	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 2	97,3	0,0	0,0	2,7	100	0,98	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10 Cassiterita 1A G_ 1	96,9	0,0	0,0	3,1	100	0,97	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 1	99,0	0,0	0,0	1,0	100	0,99	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 2	97,7	0,0	1,2	1,1	100	0,97	0,00	0,01	0,01	1,00	0,36
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 3	97,1	0,0	0,3	2,5	100	0,97	0,00	0,00	0,02	1,00	0,82
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 4	97,9	0,0	0,0	2,1	100	0,98	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 5	96,6	1,4	0,0	1,9	100	0,97	0,03	0,00	0,01	1,00	1,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_Cassiterita_G 6	100,0	0,0	0,0	0,0	100	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-

Cassiteritas
Measurement
WDS elements

Condition

	Element	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos.	Peak	Back	Standard	Curr.(A)
1	Al	Ka	TAP	1	15	90,648	20	10.0 (s)	AN_100	2,00E-08
2	W	La	LIFL	3	15	102,673	20	10.0 (s)	CaWO4	2,00E-08
3	Si	Ka	PETL	4	15	228,163	10	5.0 (s)	Enstatite_Al_5	2,00E-08
4	Mn	Ka	LIFL	4	15	146,142	20	10.0 (s)	Mn_Hort	2,00E-08
5	Ta	La	LIFL	4	15	105,843	20	10.0 (s)	Ta	2,00E-08
6	Ti	Ka	PETL	4	15	88,073	20	10.0 (s)	A-128	2,00E-08
7	Sn	La	PETH	5	15	115,262	10	5.0 (s)	SnO2	2,00E-08
8	Fe	Ka	LIFH	5	15	134,632	10	5.0 (s)	Fe3O4	2,00E-08
9	Nb	La	PETH	5	15	183,313	20	10.0 (s)	Nb	2,00E-08
10	Sc	Ka	PETH	5	15	97,035	20	10.0 (s)	Sc_THORT	2,00E-08

Measurement
Order

	Order	of	WDS					
	Channel 1		2	3	4	5		
1	Al_1TAP_		0	W_3LIFL_	Si_4PETL	Sn_5PETH		
2	0		0		Mn_4LIFL	Fe_5LIFH		
3	0		0		Ta_4LIFL	Nb_5PETH		
4	0		0		Ti_4PETL	Sc_5PETH		

	Amostra_	Óxidos (% em peso)											Proporção atômica (2 oxigênios)											Ta/	Mn/	(Ta+Nb)/
Rocha encaixante	análise	SiO ₂	TiO ₂	SnO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	WO ₃	Total	Si	Ti	Sn	Al	Fe	Mn	Nb	Ta	Sc	W	Total	(Ta+Nb)	(Fe+Mn)	(Fe+Mn)
Metadiorito Brumado	FA02A_01	0,09	0,04	83,75	0,06	0,56	0,11	0,77	1,94	0,00	0,00	87,32	0,003	0,001	0,957	0,002	0,013	0,003	0,010	0,015	0,000	0,000	1,003	0,60	0,16	1,57
Metadiorito Brumado	FA02A_02	0,07	0,01	84,46	0,07	0,60	0,11	0,94	1,66	0,00	0,00	87,91	0,002	0,000	0,959	0,002	0,014	0,003	0,012	0,013	0,000	0,000	1,005	0,51	0,16	1,46
Metadiorito Brumado	FA02A_03	0,05	0,00	86,00	0,00	0,30	0,03	0,11	1,17	0,00	0,02	87,69	0,002	0,000	0,982	0,000	0,007	0,001	0,001	0,009	0,000	0,000	1,003	0,87	0,10	1,30
Metadiorito Brumado	FA02A_04	0,03	0,00	83,83	0,00	0,16	0,00	0,08	0,78	0,00	0,05	84,93	0,001	0,000	0,988	0,000	0,004	0,000	0,001	0,006	0,000	0,000	1,001	0,85	0,00	1,87
Metadiorito Brumado	FA02A_05	0,00	0,01	77,01	0,00	1,05	0,06	1,16	4,05	0,00	0,00	83,34	0,000	0,000	0,926	0,000	0,026	0,002	0,016	0,033	0,000	0,000	1,003	0,68	0,06	1,75
Metadiorito Brumado	FA02A_06	0,01	0,00	84,40	0,00	0,24	0,02	0,02	0,85	0,00	0,09	85,62	0,000	0,000	0,989	0,000	0,006	0,000	0,000	0,007	0,000	0,001	1,003	0,96	0,06	1,15
Metadiorito Brumado	FA02A_07	0,04	0,05	82,99	0,04	0,53	0,00	0,66	1,42	0,00	0,12	85,85	0,001	0,001	0,965	0,002	0,013	0,000	0,009	0,011	0,000	0,001	1,002	0,56	0,00	1,54
Metadiorito Brumado	FA02A_08	0,02	0,03	84,54	0,00	0,20	0,00	0,06	0,74	0,00	0,02	85,61	0,001	0,001	0,990	0,000	0,005	0,000	0,001	0,006	0,000	0,000	1,003	0,88	0,00	1,34
Metadiorito Brumado	FA02A_09	0,04	0,01	87,19	0,00	0,05	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	87,34	0,001	0,000	0,999	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1,003	0,00	0,00	0,73
Metadiorito Brumado	FA02A_10	0,08	0,01	86,71	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,04	86,92	0,002	0,000	0,999	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,003	0,00	0,00	0,40
Metadiorito Brumado	FA02A_11	0,02	0,00	83,46	0,02	0,30	0,05	0,28	1,50	0,00	0,05	85,69	0,001	0,000	0,976	0,001	0,007	0,001	0,004	0,012	0,000	0,000	1,002	0,76	0,15	1,80
Metadiorito Brumado	FA02A_12	0,06	0,01	83,22	0,02	0,36	0,07	0,27	1,64	0,00	0,02	85,65	0,002	0,000	0,972	0,001	0,009	0,002	0,004	0,013	0,000	0,000	1,002	0,78	0,17	1,58
Metadiorito Brumado	FA02A_13	0,03	0,01	84,96	0,00	0,16	0,00	0,08	0,68	0,00	0,04	85,96	0,001	0,000	0,990	0,000	0,004	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,001	0,84	0,00	1,60
Metadiorito Brumado	FA02A_14	0,05	0,00	85,15	0,00	0,12	0,00	0,08	0,62	0,00	0,02	86,04	0,002	0,000	0,991	0,000	0,003	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,001	0,82	0,00	2,14
Metadiorito Brumado	FA02A_15	0,03	0,23	85,74	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	86,31	0,001	0,005	0,992	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,003	0,36	0,00	0,88
Metadiorito Brumado	FA02A_16	0,02	0,21	85,73	0,01	0,09	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	86,19	0,001	0,005	0,994	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	1,004	0,00	0,04	0,67
Metadiorito Brumado	FA02A_17	0,02	0,00	83,92	0,01	0,32	0,00	0,10	1,46	0,00	0,00	85,83	0,001	0,000	0,981	0,000	0,008	0,000	0,001	0,012	0,000	0,000	1,003	0,90	0,00	1,69
Metadiorito Brumado	FA02A_18	0,00	0,00	85,63	0,00	0,20	0,00	0,02	0,77	0,00	0,05	86,66	0,000	0,000	0,990	0,000	0,005	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	1,002	0,95	0,00	1,31
Metadiorito Brumado	FA02A_19	0,04	0,02	82,37	0,05	0,46	0,03	0,57	1,06	0,00	0,03	84,63	0,001	0,001	0,971	0,002	0,011	0,001	0,008	0,009	0,000	0,000	1,004	0,52	0,07	1,32
Metadiorito Brumado	FA02A_20	0,05	0,01	82,28	0,03	0,63	0,01	0,73	1,54	0,00	0,00	85,28	0,001	0,000	0,964	0,001	0,015	0,000	0,010	0,012	0,000	0,000	1,004	0,56	0,01	1,41
Metadiorito Brumado	FA02A_21	0,01	0,09	84,36	0,00	0,37	0,00	0,75	0,52	0,00	0,01	86,09	0,000	0,002	0,977	0,000	0,009	0,000	0,010	0,004	0,000	0,000	1,002	0,29	0,00	1,56
Metadiorito Brumado	FA02A_22	0,04	0,06	84,69	0,01	0,33	0,00	0,76	0,73	0,00	0,04	86,67	0,001	0,001	0,973	0,001	0,008	0,000	0,010	0,006	0,000	0,000	1,000	0,37	0,01	1,93
Metadiorito Brumado	FA02A_23	0,03	0,02	86,70	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,78	0,001	0,000	1,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,003	-	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA02A_24	0,03	0,02	86,40	0,00	0,02	0,02	0,07	0,00	0,00	0,04	86,61	0,001	0,001	0,997	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1,001	0,00	0,44	1,00
Metadiorito Brumado	FA02A_25	0,04	0,01	82,42	0,02	0,56	0,04	1,15	1,50	0,00	0,00	85,74	0,001	0,000	0,959	0,001	0,014	0,001	0,015	0,012	0,000	0,000	1,003	0,44	0,07	1,83
Metadiorito Brumado	FA02A_26	0,00	0,01	80,03	0,01	0,89	0,16	1,16	3,48	0,00	0,00	85,73	0,000	0,000	0,936	0,000	0,022	0,004	0,015	0,028	0,000	0,000	1,005	0,64	0,16	1,68
Metadiorito Brumado	FA02B_01	0,04	0,17	92,12	0,00	1,28	0,24	3,60	2,53	0,00	0,00	99,98	0,001	0,003	0,909	0,000	0,026	0,005	0,040	0,017	0,000	0,000	1,002	0,30	0,16	1,82
Metadiorito Brumado	FA02B_02	0,02	0,12	95,16	0,09	0,95	0,06	1,73	1,29	0,00	0,04	99,48	0,001	0,002	0,950	0,003	0,020	0,001	0,020	0,009	0,000	0,000	1,005	0,31	0,06	1,34
Metadiorito Brumado	FA02B_03	0,01	0,08	96,72	0,07	0,85	0,02	1,18	0,94	0,00	0,00	99,87	0,000	0,002	0,965	0,002	0,018	0,000	0,013	0,006	0,000	0,000	1,006	0,32	0,02	1,10
Metadiorito Brumado	FA02B_04	0,06	0,04	97,77	0,02	0,45	0,01	0,71	0,83	0,00	0,00	99,89	0,002	0,001	0,978	0,001	0,009	0,000	0,008	0,006	0,000	0,000	1,004	0,41	0,03	1,42
Metadiorito Brumado	FA02B_05	0,03	0,06	99,21	0,00	0,14	0,00	0,06	0,53	0,00	0,00	100,03	0,001	0,001	0,995	0,000	0,003	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,004	0,84	0,00	1,48
Metadiorito Brumado	FA02B_06	0,00	0,04	93,93	0,04	0,92	0,12	1,20	3,37	0,00	0,00	99,61	0,000	0,001	0,944	0,001	0,019	0,003	0,014	0,023	0,000	0,000	1,004	0,63	0,11	1,68
Metadiorito Brumado	FA02B_07	0,02	0,02	99,90	0,01	0,12	0,00	0,09	0,17	0,00	0,00	100,33	0,001	0,000	0,996	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,002	0,55	0,04	0,88
Metadiorito Brumado	FA02B_08	0,03	0,00	98,13	0,00	0,30	0,04	0,13	1,49	0,00	0,00	100,12	0,001	0,000	0,983	0,000	0,006	0,001	0,002	0,010	0,000	0,000	1,003	0,87	0,13	1,63
Metadiorito Brumado	FA02B_09	0,06	0,03	98,01	0,00	0,48	0,00	0,29	1,45	0,00	0,16	100,49	0,002	0,001	0,976	0,000	0,010	0,000	0,003	0,010	0,000	0,001	1,003	0,75	0,00	1,32
Metadiorito Brumado	FA02B_10	0,01	0,07	95,29	0,05	1,05	0,05	1,54	1,37	0,00	0,05	99,46	0,000	0,001	0,953	0,002	0,022	0,001	0,018	0,009	0,000	0,000	1,006	0,35	0,05	1,17
Metadiorito Brumado	FA02B_11	0,00	0,00	98,39	0,05	0,54	0,02	0,79	0,56	0,00	0,00	100,35	0,000	0,000	0,979	0,001	0,011	0,000	0,009	0,004	0,000	0,000	1,005	0,30	0,03	1,10
Metadiorito Brumado	FA02B_12	0,03	0,02	98,29	0,08	0,54	0,02	0,65	0,51	0,00	0,00	100,14	0,001	0,000	0,980	0,002	0,011	0,001	0,007	0,004	0,000	0,000	1,006	0,32	0,04	0,92
Metadiorito Brumado	FA02B_13	0,03																								

Metadiorito Brumado	FA02B_19	0,03	0,06	95,35	0,02	0,86	0,09	1,51	2,22	0,00	0,02	100,15	0,001	0,001	0,948	0,001	0,018	0,002	0,017	0,015	0,000	0,000	1,002	0,47	0,10	1,63
Metadiorito Brumado	FA02B_20	0,03	0,05	96,13	0,03	0,95	0,04	1,26	1,90	0,00	0,00	100,39	0,001	0,001	0,956	0,001	0,020	0,001	0,014	0,013	0,000	0,000	1,006	0,48	0,04	1,31
Metadiorito Brumado	FA02B_21	0,05	0,05	97,67	0,06	0,67	0,01	0,85	0,52	0,00	0,00	99,89	0,001	0,001	0,975	0,002	0,014	0,000	0,010	0,004	0,000	0,000	1,007	0,27	0,02	0,93
Metadiorito Brumado	FA02B_22	0,05	0,04	97,85	0,04	0,72	0,02	0,72	0,53	0,00	0,00	99,97	0,001	0,001	0,976	0,001	0,015	0,000	0,008	0,004	0,000	0,000	1,006	0,31	0,03	0,77
Metadiorito Brumado	FA02B_23	0,03	0,05	96,77	0,00	0,67	0,08	1,01	1,97	0,00	0,00	100,59	0,001	0,001	0,962	0,000	0,014	0,002	0,011	0,013	0,000	0,000	1,004	0,54	0,11	1,58
Metadiorito Brumado	FA02B_24	0,06	0,06	95,50	0,05	1,25	0,04	1,59	1,29	0,00	0,02	99,85	0,001	0,001	0,951	0,001	0,026	0,001	0,018	0,009	0,000	0,000	1,008	0,33	0,03	0,98
Metadiorito Brumado	FA02B_25	0,09	0,05	97,42	0,02	0,51	0,08	0,70	1,36	0,00	0,00	100,23	0,002	0,001	0,970	0,001	0,011	0,002	0,008	0,009	0,000	0,000	1,003	0,54	0,14	1,39
Metadiorito Brumado	FA02B_26	0,03	0,01	99,31	0,00	0,23	0,02	0,08	1,06	0,00	0,00	100,74	0,001	0,000	0,989	0,000	0,005	0,000	0,001	0,007	0,000	0,000	1,003	0,89	0,08	1,59
Metadiorito Brumado	FA02B_27	0,08	0,12	93,83	0,08	1,20	0,11	2,17	1,69	0,00	0,00	99,28	0,002	0,002	0,936	0,003	0,025	0,002	0,025	0,012	0,000	0,000	1,006	0,32	0,08	1,31
Metadiorito Brumado	FA03_01	0,10	0,02	95,49	0,00	0,84	0,00	0,59	3,49	0,03	0,00	100,55	0,003	0,000	0,952	0,000	0,018	0,000	0,007	0,024	0,001	0,000	1,003	0,78	0,01	1,71
Metadiorito Brumado	FA03_02	0,01	0,17	99,59	0,00	0,27	0,01	0,15	0,72	0,00	0,01	100,93	0,000	0,003	0,986	0,000	0,006	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000	1,002	0,75	0,03	1,10
Metadiorito Brumado	FA03_03	0,04	0,02	98,66	0,00	0,32	0,00	0,26	1,03	0,00	0,09	100,41	0,001	0,000	0,983	0,000	0,007	0,000	0,003	0,007	0,000	0,001	1,002	0,71	0,00	1,48
Metadiorito Brumado	FA03_04	0,02	0,11	95,12	0,00	0,98	0,01	0,55	3,38	0,00	0,00	100,17	0,001	0,002	0,953	0,000	0,021	0,000	0,006	0,023	0,000	0,000	1,005	0,79	0,01	1,41
Metadiorito Brumado	FA03_05	0,03	0,19	99,61	0,00	0,14	0,00	0,03	0,61	0,00	0,00	100,61	0,001	0,004	0,991	0,000	0,003	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	1,002	0,91	0,00	1,64
Metadiorito Brumado	FA03_06	0,04	0,06	97,30	0,00	0,59	0,02	0,48	1,90	0,00	0,00	100,39	0,001	0,001	0,971	0,000	0,012	0,000	0,005	0,013	0,000	0,000	1,004	0,70	0,03	1,43
Metadiorito Brumado	FA03_07	0,05	0,05	98,28	0,00	0,39	0,00	0,36	1,43	0,00	0,00	100,56	0,001	0,001	0,977	0,000	0,008	0,000	0,004	0,010	0,000	0,000	1,001	0,70	0,00	1,70
Metadiorito Brumado	FA03_08	0,04	0,15	97,71	0,00	0,39	0,01	0,18	1,45	0,00	0,00	99,94	0,001	0,003	0,979	0,000	0,008	0,000	0,002	0,010	0,000	0,000	1,003	0,83	0,04	1,41
Metadiorito Brumado	FA03_09	0,05	0,06	99,67	0,00	0,08	0,01	0,07	0,17	0,00	0,00	100,12	0,001	0,001	0,997	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,003	0,60	0,15	1,00
Metadiorito Brumado	FA03_10	0,02	0,05	99,51	0,01	0,13	0,00	0,11	0,40	0,00	0,00	100,22	0,001	0,001	0,993	0,000	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,002	0,69	0,00	1,44
Metadiorito Brumado	FA03_11	0,06	0,12	99,71	0,00	0,10	0,00	0,10	0,24	0,00	0,00	100,33	0,002	0,002	0,994	0,000	0,002	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	1,002	0,61	0,00	1,33
Metadiorito Brumado	FA03_12	0,05	0,09	99,60	0,00	0,17	0,00	0,11	0,28	0,00	0,00	100,30	0,001	0,002	0,993	0,000	0,004	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	1,003	0,59	0,00	0,91
Metadiorito Brumado	FA03_13	0,02	0,07	97,85	0,00	0,55	0,02	0,39	1,44	0,00	0,00	100,33	0,001	0,001	0,975	0,000	0,011	0,000	0,005	0,010	0,000	0,000	1,003	0,69	0,03	1,21
Metadiorito Brumado	FA03_14	0,03	0,06	99,25	0,00	0,15	0,00	0,11	0,51	0,00	0,00	100,11	0,001	0,001	0,993	0,000	0,003	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,003	0,74	0,00	1,47
Metadiorito Brumado	FA03_15	0,00	0,10	99,42	0,00	0,17	0,01	0,20	0,44	0,00	0,12	100,46	0,000	0,002	0,989	0,000	0,004	0,000	0,002	0,003	0,000	0,001	1,001	0,58	0,03	1,41
Metadiorito Brumado	FA03_16	0,02	0,06	100,33	0,00	0,10	0,02	0,03	0,21	0,00	0,00	100,77	0,001	0,001	0,997	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	1,003	0,82	0,17	0,71
Metadiorito Brumado	FA03_17	0,03	0,04	97,79	0,00	0,45	0,00	0,41	1,59	0,00	0,13	100,45	0,001	0,001	0,974	0,000	0,010	0,000	0,005	0,011	0,000	0,001	1,002	0,70	0,00	1,63
Metadiorito Brumado	FA03_18	0,02	0,09	97,80	0,00	0,51	0,03	0,54	1,36	0,00	0,05	100,40	0,000	0,002	0,973	0,000	0,011	0,001	0,006	0,009	0,000	0,000	1,003	0,60	0,06	1,34
Metadiorito Brumado	FA03_19	0,03	0,05	97,87	0,00	0,33	0,00	0,23	1,15	0,00	0,00	99,65	0,001	0,001	0,984	0,000	0,007	0,000	0,003	0,008	0,000	0,000	1,003	0,75	0,00	1,50
Metadiorito Brumado	FA03_20	0,02	0,08	98,88	0,00	0,21	0,00	0,04	0,67	0,00	0,00	99,90	0,001	0,002	0,992	0,000	0,004	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	1,003	0,92	0,02	1,14
Metadiorito Brumado	FA03_21	0,04	0,06	97,38	0,00	0,47	0,02	0,67	1,08	0,00	0,00	99,71	0,001	0,001	0,976	0,000	0,010	0,000	0,008	0,007	0,000	0,000	1,004	0,49	0,04	1,47
Metadiorito Brumado	FA03_22	0,00	0,12	94,02	0,00	0,93	0,00	0,66	3,48	0,02	0,00	99,23	0,000	0,002	0,951	0,000	0,020	0,000	0,008	0,024	0,001	0,000	1,005	0,76	0,01	1,60
Metadiorito Brumado	FA03_23	0,03	0,09	97,62	0,00	0,32	0,01	0,22	1,04	0,00	0,00	99,34	0,001	0,002	0,983	0,000	0,007	0,000	0,003	0,007	0,000	0,000	1,003	0,73	0,03	1,42
Metadiorito Brumado	FA03_24	0,06	0,02	98,84	0,00	0,07	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	99,54	0,001	0,000	0,994	0,000	0,002	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	1,001	1,00	0,00	2,38
Metadiorito Brumado	FA03_25	0,04	0,07	98,80	0,00	0,20	0,00	0,09	0,73	0,00	0,00	99,93	0,001	0,001	0,990	0,000	0,004	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,003	0,83	0,00	1,40
Metadiorito Brumado	FA03_26	0,02	0,05	99,68	0,00	0,05	0,01	0,04	0,61	0,00	0,00	100,47	0,001	0,001	0,995	0,000	0,001	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,002	0,89	0,21	3,29
Metadiorito Brumado	FA03_27	0,06	0,05	98,95	0,00	0,37	0,00	0,15	1,02	0,00	0,00	100,60	0,001	0,001	0,985	0,000	0,008	0,000	0,002	0,007	0,000	0,000	1,003	0,81	0,00	1,12
Metadiorito Brumado	FA03_28	0,06	0,00	97,53	0,00	0,56	0,00	0,41	1,54	0,00	0,00	100,10	0,001	0,000	0,975	0,000	0,012	0,000	0,005	0,011	0,000	0,000	1,003	0,70	0,00	1,28
Metadiorito Brumado	FA03_29	0,02	0,11	97,36	0,01	0,50	0,02	0,84	1,12	0,00	0,00	99,97	0,001	0,002	0,972	0,000	0,010	0,000	0,010	0,008	0,000	0,000	1,003	0,44	0,03	1,60
Metadiorito Brumado	FA06A_01	0,01	0,14	97,80	0,05	0,62	0,02	0,99	0,74	0,00	0,00	100,38	0,000	0,003	0,969	0,001	0,013	0,001	0,011	0,005	0,000	0,000	1,003	0,31	0,04	1,21
Metadiorito Brumado	FA06A_02	0,02	0,03	100,36	0,00	0,09	0,00	0,09	0,41	0,00	0,00	101,00	0,001	0,001	0,995	0,000	0,002	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,002	0,72	0,00	2,05
Metadiorito Brumado	FA06A_03	0,01	0,04	99,43	0,00	0,26	0,05	0,32	1,14	0,00	0,00	101,25	0,000	0,001	0,983	0,000	0,005	0,001	0,004	0,008	0,000	0,000	1,002	0,68	0,16	1,79
Metadiorito Brumado	FA06A_04	0,03	0,05	94,59	0,01	0,82	0,11	0,89	3,80	0,00	0,00	100,30	0,001	0,001	0,945	0,000	0,017	0,002	0,010	0,026	0,000	0,000	1,003	0,72	0,12	1,83
Metadiorito Brumado	FA06A_05	0,00	0,04	99,44	0,05	0,25	0,00	0,25	0,92	0,00	0,04	100,98	0,000	0,001	0,986	0,001	0,005	0,000	0,003	0,006	0,000	0,000	1,002	0,69	0,00	1,76
Metadiorito Brumado	FA06A_06	0,04	0,08	100,23	0,00	0,13	0,04	0,01	0,42	0,00	0,01	100,96	0,001	0,002	0,993	0,000	0,003	0,001	0,000	0,003	0,000	0,000	1,002	0,97	0,25	0,81
Metadiorito Brumado	FA06A_07	0,00	0,02	98,62	0,01	0,30	0,03	0,39	1,14	0,00	0,00	100,50	0,000	0,000	0,982	0,000	0,006	0,001	0,004	0,008	0,000	0,000	1,002	0,64	0,09	1,78
Metadiorito Brumado	FA06A_08	0,03	0,07	99,79	0,00	0,20	0,01	0,08	0,80	0,00	0,00	100,98	0,001	0,001	0,990	0,000	0,004	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,003	0,86	0,07	1,43
Metadiorito Brumado	FA06A_09																									

Anexo IV - Cassiterita_Resultados Analíticos WDS.xlsx

Metadiorito Brumado	FA06A_32	0,06	0,01	100,68	0,00	0,05	0,02	0,03	0,33	0,00	0,02	101,20	0,001	0,000	0,995	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	1,001	0,88	0,31	1,56
Metadiorito Brumado	FA06A_33	0,03	0,00	100,69	0,00	0,05	0,02	0,04	0,20	0,00	0,00	101,03	0,001	0,000	0,999	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,003	0,74	0,21	1,36
Metadiorito Brumado	FA06A_34	0,02	0,15	96,68	0,06	0,62	0,00	0,93	0,73	0,00	0,00	99,19	0,000	0,003	0,972	0,002	0,013	0,000	0,011	0,005	0,000	0,000	1,005	0,32	0,01	1,19
Metadiorito Brumado	FA06B_01	0,02	0,05	96,24	0,01	0,59	0,11	1,19	1,87	0,00	0,05	100,12	0,001	0,001	0,959	0,000	0,012	0,002	0,013	0,013	0,000	0,000	1,001	0,49	0,15	1,81
Metadiorito Brumado	FA06B_02	0,03	0,00	100,23	0,00	0,06	0,01	0,01	0,13	0,00	0,00	100,45	0,001	0,000	0,999	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	1,002	0,90	0,08	0,77
Metadiorito Brumado	FA06B_03	0,04	0,16	95,14	0,00	0,71	0,09	1,39	2,24	0,00	0,00	99,77	0,001	0,003	0,952	0,000	0,015	0,002	0,016	0,015	0,000	0,000	1,004	0,49	0,11	1,85
Metadiorito Brumado	FA06B_04	0,02	0,01	98,02	0,00	0,29	0,02	0,10	1,30	0,00	0,00	99,75	0,000	0,000	0,986	0,000	0,006	0,001	0,001	0,009	0,000	0,000	1,003	0,88	0,08	1,53
Metadiorito Brumado	FA06B_05	0,03	0,05	98,03	0,00	0,40	0,01	0,80	0,98	0,00	0,00	100,29	0,001	0,001	0,976	0,000	0,008	0,000	0,009	0,007	0,000	0,000	1,002	0,42	0,02	1,84
Metadiorito Brumado	FA06B_06	0,03	0,08	100,26	0,00	0,09	0,02	0,05	0,13	0,00	0,05	100,71	0,001	0,002	0,996	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,002	0,60	0,17	0,65
Metadiorito Brumado	FA06B_07	0,03	0,05	96,05	0,00	0,55	0,02	0,59	2,01	0,00	0,00	99,31	0,001	0,001	0,969	0,000	0,012	0,000	0,007	0,014	0,000	0,000	1,004	0,67	0,03	1,69
Metadiorito Brumado	FA06B_08	0,04	0,08	98,43	0,00	0,12	0,02	0,07	0,86	0,00	0,00	99,61	0,001	0,002	0,990	0,000	0,002	0,000	0,001	0,006	0,000	0,000	1,002	0,88	0,14	2,39
Metadiorito Brumado	FA06B_09	0,02	0,03	98,95	0,00	0,20	0,00	0,05	1,01	0,00	0,00	100,26	0,000	0,001	0,991	0,000	0,004	0,000	0,001	0,007	0,000	0,000	1,003	0,93	0,02	1,68
Metadiorito Brumado	FA06B_10	0,04	0,13	99,49	0,00	0,14	0,01	0,05	0,61	0,00	0,10	100,57	0,001	0,002	0,989	0,000	0,003	0,000	0,001	0,004	0,000	0,001	1,001	0,87	0,10	1,52
Metadiorito Brumado	FA06B_11	0,00	0,06	95,68	0,05	0,75	0,08	0,90	2,39	0,00	0,00	99,91	0,000	0,001	0,958	0,002	0,016	0,002	0,010	0,016	0,000	0,000	1,005	0,62	0,09	1,52
Metadiorito Brumado	FA06B_12	0,05	0,01	97,25	0,00	0,44	0,05	0,42	1,40	0,01	0,00	99,64	0,001	0,000	0,975	0,000	0,009	0,001	0,005	0,010	0,000	0,000	1,002	0,67	0,10	1,40
Metadiorito Brumado	FA06B_13	0,00	0,04	97,62	0,00	0,39	0,04	0,73	0,52	0,00	0,00	99,33	0,000	0,001	0,983	0,000	0,008	0,001	0,008	0,004	0,000	0,000	1,004	0,30	0,09	1,32
Metadiorito Brumado	FA06B_14	0,02	0,07	98,39	0,00	0,17	0,00	0,08	0,71	0,00	0,00	99,44	0,001	0,001	0,991	0,000	0,004	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,003	0,84	0,00	1,61
Metadiorito Brumado	FA06B_15	0,03	0,02	99,69	0,00	0,09	0,02	0,02	0,39	0,00	0,00	100,26	0,001	0,000	0,997	0,000	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	1,003	0,93	0,14	1,27
Metadiorito Brumado	FA06B_16	0,05	0,08	98,61	0,00	0,28	0,01	0,18	0,82	0,00	0,00	100,04	0,001	0,001	0,985	0,000	0,006	0,000	0,002	0,006	0,000	0,000	1,002	0,73	0,05	1,24
Metadiorito Brumado	FA06B_17	0,03	0,11	99,14	0,00	0,18	0,00	0,05	0,54	0,00	0,00	100,06	0,001	0,002	0,992	0,000	0,004	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,003	0,86	0,00	1,16
Metadiorito Brumado	FA06B_18	0,05	0,06	99,53	0,01	0,12	0,02	0,08	0,41	0,00	0,07	100,35	0,001	0,001	0,992	0,000	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,001	0,76	0,11	1,32
Metadiorito Brumado	FA06B_19	0,02	0,03	95,15	0,00	0,14	0,01	0,09	0,35	0,00	0,00	95,78	0,001	0,001	0,994	0,000	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,002	0,69	0,03	1,16
Metadiorito Brumado	FA06B_20	0,03	0,01	98,68	0,00	0,25	0,02	0,05	1,06	0,00	0,00	100,10	0,001	0,000	0,990	0,000	0,005	0,000	0,001	0,007	0,000	0,000	1,004	0,92	0,07	1,37
Metadiorito Brumado	FA06B_21	0,06	0,01	98,24	0,00	0,28	0,00	0,07	1,07	0,00	0,00	99,74	0,002	0,000	0,988	0,000	0,006	0,000	0,001	0,007	0,000	0,000	1,004	0,90	0,00	1,39
Metadiorito Brumado	FA06B_22	0,00	0,25	99,31	0,00	0,12	0,02	0,06	0,46	0,00	0,00	100,22	0,000	0,005	0,992	0,000	0,003	0,001	0,001	0,003	0,000	0,000	1,003	0,82	0,17	1,27
Metadiorito Brumado	FA06B_23	0,03	0,13	97,43	0,06	0,45	0,04	0,49	1,05	0,00	0,00	99,68	0,001	0,002	0,977	0,002	0,009	0,001	0,006	0,007	0,000	0,000	1,005	0,56	0,09	1,23
Metadiorito Brumado	FA06B_24	0,02	0,09	97,91	0,03	0,38	0,04	0,50	1,08	0,00	0,00	100,05	0,000	0,002	0,978	0,001	0,008	0,001	0,006	0,007	0,000	0,000	1,003	0,56	0,09	1,51
Metadiorito Brumado	FA06B_25	0,01	0,04	99,31	0,00	0,11	0,01	0,10	0,45	0,00	0,00	100,03	0,000	0,001	0,993	0,000	0,002	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,001	0,72	0,08	1,72
Metadiorito Brumado	FA06B_26	0,01	0,05	99,63	0,00	0,13	0,00	0,10	0,44	0,00	0,00	100,36	0,000	0,001	0,994	0,000	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,002	0,73	0,04	1,46
Metadiorito Brumado	FA06B_27	0,02	0,16	98,96	0,00	0,21	0,00	0,05	0,58	0,00	0,00	99,97	0,001	0,003	0,990	0,000	0,004	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,003	0,87	0,00	1,05
Metadiorito Brumado	FA06B_28	0,01	0,01	98,38	0,00	0,28	0,02	0,07	1,13	0,00	0,00	99,90	0,000	0,000	0,987	0,000	0,006	0,000	0,001	0,008	0,000	0,000	1,002	0,91	0,06	1,37
Metagranitoide Ritápolis	FA05_01	0,09	0,10	99,02	0,01	0,26	0,00	0,28	0,35	0,00	0,01	100,11	0,002	0,002	0,987	0,000	0,005	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	1,002	0,43	0,00	1,06
Metagranitoide Ritápolis	FA05_02	0,02	0,04	99,63	0,00	0,20	0,00	0,37	0,45	0,00	0,00	100,71	0,001	0,001	0,989	0,000	0,004	0,000	0,004	0,003	0,000	0,000	1,002	0,42	0,00	1,65
Metagranitoide Ritápolis	FA05_03	0,03	0,03	100,17	0,00	0,16	0,00	0,08	0,09	0,00	0,00	100,55	0,001	0,001	0,996	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,002	0,40	0,00	0,45
Metagranitoide Ritápolis	FA05_04	0,04	0,06	100,06	0,00	0,05	0,00	0,08	0,14	0,00	0,00	100,44	0,001	0,001	0,997	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	1,003	0,50	0,00	1,64
Metagranitoide Ritápolis	FA05_05	0,00	0,00	100,03	0,01	0,14	0,00	0,28	0,39	0,00	0,00	100,84	0,000	0,000	0,993	0,000	0,003	0,000	0,003	0,003	0,000	0,000	1,002	0,45	0,00	2,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_06	0,03	0,02	100,63	0,01	0,14	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	100,96	0,001	0,000	0,998	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1,004	0,00	0,00	0,47
Metagranitoide Ritápolis	FA05_07	0,02	0,03	100,20	0,00	0,18	0,00	0,27	0,22	0,00	0,00	100,92	0,001	0,001	0,993	0,000	0,004	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	1,002	0,33	0,00	1,22
Metagranitoide Ritápolis	FA05_08	0,03	0,00	99,14	0,00	0,16	0,00	0,32	0,28	0,00	0,00	99,94	0,001	0,000	0,992	0,000	0,003	0,000	0,004	0,002	0,000	0,000	1,002	0,35	0,00	1,67
Metagranitoide Ritápolis	FA05_09	0,01	0,07	98,84	0,00	0,31	0,00	0,22	1,11	0,00	0,00	100,56	0,000	0,001	0,985	0,000	0,007	0,000	0,003	0,008	0,000	0,000	1,003	0,75	0,00	1,54
Metagranitoide Ritápolis	FA05_10	0,02	0,08	98,34	0,00	0,35	0,01	0,25	1,18	0,00	0,00	100,23	0,001	0,002	0,983	0,000	0,007	0,000	0,003	0,008	0,000	0,000	1,003	0,74	0,01	1,49
Metagranitoide Ritápolis	FA05_11	0,06	0,02	99,73	0,00	0,14	0,00	0,11	0,53	0,00	0,00	100,59	0,001	0,000	0,993	0,000	0,003	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,002	0,75	0,03	1,60
Metagranitoide Ritápolis	FA05_12	0,04	0,06	98,96	0,00	0,27	0,00	0,21	0,92	0,00	0,04	100,51	0,001	0,001	0,985	0,000	0,006	0,000	0,002	0,006	0,000	0,000	1,002	0,73	0,02	1,49
Metagranitoide Ritápolis	FA05_13	0,05	0,01	99,68	0,00	0,15	0,02	0,40	0,07	0,00	0,00	100,36	0,001	0,000	0,993	0,000	0,003	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	1,002	0,08	0,09	1,44
Metagranitoide Ritápolis	FA05_14	0,07	0,04	99,71	0,00	0,16	0,00	0,38	0,00	0,00	0,03	100,38	0,002	0,001	0,992	0,000	0,003	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	1,002	0,00	0,00	1,34
Metagranitoide Ritápolis	FA05_15	0,03	0,01	99,06	0,00	0,28	0,00	0,53	0,60	0,00	0,00	100,51	0,001	0,000	0,985	0,000	0,006	0,000	0,006	0,004	0,000	0,000	1,002	0,41	0,00	1,69
Metagranitoide Ritápolis	FA05_16	0,04	0,01																							

Metagranitoide Ritápolis	FA08_05	0,00	0,00	95,48	0,00	0,82	0,05	0,98	2,86	0,00	0,00	100,19	0,000	0,000	0,955	0,000	0,017	0,001	0,011	0,020	0,000	0,000	1,004	0,64	0,06	1,66
Metagranitoide Ritápolis	FA08_06	0,00	0,00	96,34	0,00	0,74	0,01	0,87	2,45	0,00	0,00	100,40	0,000	0,000	0,961	0,000	0,016	0,000	0,010	0,017	0,000	0,000	1,004	0,63	0,01	1,70
Metagranitoide Ritápolis	FA08_07	0,03	0,09	98,94	0,00	0,23	0,01	0,15	0,65	0,00	0,00	100,09	0,001	0,002	0,989	0,000	0,005	0,000	0,002	0,004	0,000	0,000	1,003	0,71	0,02	1,29
Metagranitoide Ritápolis	FA08_08	0,00	0,10	99,31	0,00	0,26	0,00	0,12	0,70	0,00	0,00	100,49	0,000	0,002	0,990	0,000	0,006	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	1,004	0,77	0,02	1,09
Metagranitoide Ritápolis	FA08_09	0,00	0,02	95,67	0,00	0,84	0,06	1,48	2,80	0,00	0,00	100,87	0,000	0,000	0,948	0,000	0,017	0,001	0,017	0,019	0,000	0,000	1,003	0,53	0,06	1,91
Metagranitoide Ritápolis	FA08_10	0,08	0,02	95,65	0,00	0,84	0,01	0,85	2,60	0,00	0,00	100,04	0,002	0,000	0,957	0,000	0,018	0,000	0,010	0,018	0,000	0,000	1,004	0,65	0,02	1,52
Metagranitoide Ritápolis	FA08_11	0,00	0,07	99,30	0,00	0,27	0,00	0,20	0,67	0,00	0,00	100,53	0,000	0,001	0,990	0,000	0,006	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000	1,004	0,67	0,02	1,19
Metagranitoide Ritápolis	FA08_12	0,07	0,10	99,46	0,00	0,14	0,00	0,07	0,63	0,00	0,00	100,47	0,002	0,002	0,991	0,000	0,003	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	1,002	0,84	0,00	1,82
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_01	0,00	0,04	93,99	0,00	0,89	0,02	0,48	4,30	0,00	0,00	99,71	0,000	0,001	0,948	0,000	0,019	0,000	0,006	0,030	0,000	0,000	1,003	0,84	0,02	1,83
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_02	0,00	0,04	95,94	0,00	0,67	0,01	0,39	3,46	0,00	0,00	100,52	0,000	0,001	0,961	0,000	0,014	0,000	0,005	0,024	0,000	0,000	1,004	0,84	0,01	1,95
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_03	0,01	0,00	93,24	0,00	0,95	0,02	0,12	5,14	0,00	0,00	99,49	0,000	0,000	0,946	0,000	0,020	0,001	0,001	0,036	0,000	0,000	1,004	0,96	0,02	1,79
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_04	0,03	0,00	94,53	0,00	0,82	0,07	0,10	4,77	0,00	0,00	100,31	0,001	0,000	0,951	0,000	0,017	0,001	0,001	0,033	0,000	0,000	1,004	0,96	0,08	1,82
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_05	0,00	0,02	96,94	0,00	0,55	0,04	0,36	2,61	0,00	0,03	100,56	0,000	0,000	0,967	0,000	0,012	0,001	0,004	0,018	0,000	0,000	1,002	0,81	0,06	1,77
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_06	0,03	0,00	99,29	0,00	0,16	0,00	0,11	0,85	0,00	0,00	100,44	0,001	0,000	0,990	0,000	0,003	0,000	0,001	0,006	0,000	0,000	1,002	0,83	0,03	2,06
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_07	0,00	0,01	89,67	0,00	1,50	0,07	0,40	8,05	0,00	0,00	99,71	0,000	0,000	0,911	0,000	0,032	0,001	0,005	0,056	0,000	0,000	1,005	0,92	0,04	1,81
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_08	0,00	0,00	91,09	0,01	1,27	0,07	0,27	6,63	0,00	0,00	99,34	0,000	0,000	0,928	0,000	0,027	0,002	0,003	0,046	0,000	0,000	1,006	0,94	0,05	1,72
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_09	0,03	0,00	99,74	0,00	0,00	0,00	0,02	0,29	0,00	0,00	100,09	0,001	0,000	0,998	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	1,001	0,91	-	-
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_10	0,03	0,01	95,69	0,00	0,66	0,01	0,40	3,07	0,00	0,00	99,86	0,001	0,000	0,963	0,000	0,014	0,000	0,005	0,021	0,000	0,000	1,003	0,82	0,01	1,82
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_11	0,00	0,00	85,78	0,00	2,00	0,13	0,39	11,32	0,02	0,00	99,66	0,000	0,000	0,876	0,000	0,043	0,003	0,005	0,079	0,000	0,000	1,006	0,94	0,06	1,83
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_12	0,00	0,00	96,66	0,01	0,47	0,02	0,02	2,78	0,00	0,00	99,96	0,000	0,000	0,974	0,000	0,010	0,001	0,000	0,019	0,000	0,000	1,004	0,99	0,05	1,84
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_13	0,00	0,00	91,62	0,01	1,15	0,08	0,27	6,20	0,00	0,00	99,33	0,000	0,000	0,933	0,000	0,025	0,002	0,003	0,043	0,000	0,000	1,006	0,93	0,06	1,76
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_14	0,00	0,00	93,14	0,01	0,88	0,06	0,32	5,10	0,00	0,00	99,52	0,000	0,000	0,945	0,000	0,019	0,001	0,004	0,035	0,000	0,000	1,005	0,91	0,07	1,93
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_15	0,03	0,11	94,96	0,03	0,68	0,04	0,36	3,28	0,00	0,00	99,49	0,001	0,002	0,959	0,001	0,014	0,001	0,004	0,023	0,000	0,000	1,004	0,85	0,05	1,76
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_16	0,00	0,09	92,57	0,02	1,08	0,03	0,41	5,32	0,00	0,00	99,52	0,000	0,002	0,938	0,001	0,023	0,001	0,005	0,037	0,000	0,000	1,005	0,89	0,03	1,76
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_17	0,04	0,02	96,71	0,01	0,55	0,02	0,40	2,44	0,00	0,00	100,20	0,001	0,000	0,967	0,000	0,012	0,001	0,005	0,017	0,000	0,000	1,002	0,79	0,04	1,76
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_18	0,02	0,00	97,07	0,00	0,40	0,03	0,38	1,93	0,00	0,09	99,92	0,000	0,000	0,974	0,000	0,009	0,001	0,004	0,013	0,000	0,001	1,002	0,75	0,08	1,90
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_19	0,04	0,00	95,35	0,00	0,58	0,00	0,49	2,75	0,00	0,00	99,21	0,001	0,000	0,965	0,000	0,012	0,000	0,006	0,019	0,000	0,000	1,003	0,77	0,00	2,01
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_20	0,00	0,00	92,26	0,03	1,06	0,06	0,72	4,80	0,00	0,00	98,92	0,000	0,000	0,940	0,001	0,023	0,001	0,008	0,033	0,000	0,000	1,006	0,80	0,05	1,74
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_21	0,03	0,00	95,77	0,00	0,57	0,00	0,48	2,42	0,00	0,00	99,26	0,001	0,000	0,969	0,000	0,012	0,000	0,006	0,017	0,000	0,000	1,004	0,75	0,00	1,83
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_22	0,01	0,01	97,81	0,00	0,31	0,00	0,34	1,42	0,00	0,00	99,90	0,000	0,000	0,981	0,000	0,007	0,000	0,004	0,010	0,000	0,000	1,002	0,72	0,00	2,08
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_23	0,00	0,00	95,14	0,00	0,75	0,04	0,26	4,08	0,00	0,00	100,26	0,000	0,000	0,958	0,000	0,016	0,001	0,003	0,028	0,000	0,000	1,005	0,90	0,05	1,86
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_24	0,03	0,00	96,23	0,02	0,64	0,00	0,23	3,34	0,00	0,02	100,51	0,001	0,000	0,961	0,001	0,014	0,000	0,003	0,023	0,000	0,000	1,001	0,90	0,00	1,87
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_25	0,01	0,00	98,47	0,00	0,25	0,00	0,06	1,44	0,00	0,00	100,23	0,000	0,000	0,988	0,000	0,005	0,000	0,001	0,010	0,000	0,000	1,004	0,93	0,00	1,98
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_26	0,02	0,03	92,57	0,01	1,15	0,04	0,80	5,32	0,01	0,00	99,95	0,001	0,001	0,931	0,000	0,024	0,001	0,009	0,037	0,000	0,000	1,003	0,80	0,04	1,81
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_27	0,00	0,00	96,81	0,00	0,43	0,02	0,30	2,08	0,00	0,00	99,64	0,000	0,000	0,976	0,000	0,009	0,000	0,003	0,014	0,000	0,000	1,003	0,81	0,04	1,86
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_28	0,00	0,06	93,99	0,00	0,91	0,06	0,35	4,59	0,00	0,00	99,96	0,000	0,001	0,947	0,000	0,019	0,001	0,004	0,032	0,000	0,000	1,004	0,89	0,06	1,73
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10A_29	0,02	0,00	98,37	0,00	0,27	0,00	0,11	1,28	0,00	0,00	100,05	0,001	0,000	0,988	0,000	0,006	0,000	0,001	0,009	0,000	0,000	1,004	0,88	0,00	1,79
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_01	0,02	0,00	97,57	0,01	0,42	0,00	0,19	2,29	0,00	0,00	100,50	0,000	0,000	0,975	0,000	0,009	0,000	0,002	0,016	0,000	0,000	1,003	0,88	0,00	2,02
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_02	0,01	0,00	98,06	0,00	0,32	0,03	0,15	1,80	0,00	0,00	100,38	0,000	0,000	0,980	0,000	0,007	0,001	0,002	0,012	0,000	0,000	1,002	0,88	0,09	1,85
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_03	0,06	0,00	99,86	0,00	0,07	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	100,46	0,002	0,000	0,996	0,000	0,001	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	1,002	1,00	0,00	2,29
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_04	0,00	0,01	96,84	0,00	0,57	0,01	0,42	2,83	0,00	0,00	100,67	0,000	0,000	0,966	0,000	0,012	0,000	0,005	0,019	0,000	0,000	1,003	0,80	0,02	1,99
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_05	0,01	0,00	97,63	0,00	0,40	0,00	0,11	2,27	0,00	0,06	100,48	0,000	0,000	0,975	0,000	0,008	0,000	0,001	0,015	0,000	0,000	1,001	0,92	0,01	1,99
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_06	0,04	0,00	97,33	0,00	0,47	0,02	0,37	1,94	0,00	0,00	100,16	0,001	0,000	0,974	0,000	0,010	0,000	0,004	0,013	0,000	0,000	1,003	0,76	0,04	1,71
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_07	0,01	0,02	99,97	0,02	0,17	0,00	0,12	0,42	0,00	0,00	100,74	0,000	0,000	0,993	0,001	0,004	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000	1,002	0,67	0,03	1,14
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_08	0,00	0,00	91,50	0,01	1,39	0,08	0,61	6,58	0,00	0,00	100,19	0,000	0,000	0,922	0,000	0,030	0,002	0,007	0,045	0,000	0,000	1,006	0,87	0,05	1,67
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA10B_09	0,00	0,03	91,75	0,00	1,24	0,04	0,38	6,60	0,00	0,00	100,04	0,000	0,001	0,926	0,000	0,026	0,001	0,004	0,045	0,000	0,000	1,004	0,91		

Rocha encaixante	Amostra_analise	% em peso dos óxidos							Proporções atômicas (32 oxigênios)							Razões entre cátions			Membros finais (mol %)							
		Al ₂ O ₃	ZnO	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	Total	Al	Zn	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Mn	Zn+Mn/A I	Fe+Mg/A I	mol Zn/FeT*	Gahnita	Espinelio	Hercinita	Jacobsita	Magnesi oferrita	Outro	Franklinit a	Galaxita	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 1	52,6	40,6	4,1	3,1	0,0	0,0	100,4	15,24	7,37	0,75	0,64	0,00	0,00	0,48	0,09	5,3	87,32	0,00	7,95	0,00	0,00	0,00	4,71	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 2	54,3	38,8	2,2	5,0	0,0	0,0	100,2	15,60	6,98	0,40	1,02	0,00	0,00	0,45	0,09	4,9	84,72	0,00	12,79	0,00	0,00	0,00	2,47	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 3	53,9	38,8	2,6	4,9	0,0	0,0	100,3	15,53	7,00	0,47	1,00	0,00	0,00	0,45	0,10	4,7	84,50	0,00	12,54	0,00	0,00	0,00	2,95	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 4	53,4	39,5	3,2	4,2	0,0	0,0	100,3	15,41	7,14	0,59	0,87	0,00	0,00	0,46	0,09	4,9	85,49	0,00	10,83	0,00	0,00	0,00	3,66	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 6	53,4	39,5	3,2	4,2	0,0	0,0	100,3	15,41	7,14	0,59	0,87	0,00	0,00	0,46	0,09	4,9	85,50	0,00	10,81	0,00	0,00	0,00	3,67	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 7	54,9	38,6	1,4	5,2	0,0	0,0	100,1	15,74	6,94	0,26	1,07	0,00	0,00	0,44	0,08	5,2	85,06	0,00	13,32	0,00	0,00	0,00	1,60	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 9	54,9	38,6	1,4	5,3	0,0	0,0	100,1	15,74	6,93	0,26	1,07	0,00	0,00	0,44	0,08	5,2	85,00	0,00	13,38	0,00	0,00	0,00	1,61	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 10	53,0	39,2	3,7	4,4	0,0	0,0	100,4	15,31	7,10	0,68	0,91	0,00	0,00	0,46	0,10	4,5	84,40	0,00	11,32	0,00	0,00	0,00	4,26	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 11	56,4	36,7	0,0	6,9	0,0	0,0	100,0	16,07	6,54	0,00	1,39	0,00	0,00	0,41	0,09	4,7	81,76	0,00	17,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Metadiorito Brumado	FA02_espinelio 12	52,7	39,7	4,0	3,9	0,0	0,0	100,4	15,26	7,20	0,74	0,81	0,00	0,00	0,47	0,10	4,7	85,28	0,00	10,06	0,00	0,00	0,00	4,64	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 1	54,3	37,0	2,5	5,6	0,5	0,3	100,3	15,54	6,63	0,46	1,14	0,17	0,06	0,43	0,11	4,1	82,81	0,04	14,25	0,77	2,11	0,00	0,00	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 2	54,3	37,3	2,5	5,5	0,4	0,3	100,2	15,55	6,68	0,45	1,12	0,15	0,06	0,43	0,11	4,3	83,19	0,00	13,99	0,73	1,81	0,00	0,26	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 3	51,9	39,1	5,5	3,4	0,5	0,3	100,5	14,99	7,07	1,01	0,70	0,17	0,06	0,48	0,13	4,1	84,91	0,00	8,77	0,75	2,10	0,00	3,44	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 4	56,4	34,2	0,0	8,6	0,3	0,4	100,0	15,99	6,07	0,00	1,74	0,11	0,08	0,38	0,12	3,5	75,87	1,40	21,68	0,02	0,00	0,00	0,00	1,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 8	55,7	36,1	0,6	7,6	0,0	0,0	100,1	15,88	6,46	0,12	1,54	0,00	0,00	0,41	0,10	3,9	79,95	0,00	19,30	0,00	0,00	0,00	0,73	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 9	53,6	37,0	3,4	5,6	0,3	0,5	100,3	15,37	6,65	0,62	1,13	0,13	0,10	0,44	0,12	3,8	81,95	0,00	14,13	1,19	1,57	0,00	1,13	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 10	54,1	37,1	2,7	5,8	0,3	0,2	100,3	15,50	6,65	0,49	1,18	0,13	0,05	0,43	0,12	4,0	82,15	0,00	14,74	0,61	1,56	0,00	0,91	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 11	53,2	38,2	3,5	5,4	0,0	0,0	100,4	15,35	6,89	0,65	1,11	0,00	0,00	0,45	0,11	3,9	82,02	0,00	13,88	0,00	0,00	0,00	4,07	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 12	54,3	37,6	2,2	6,1	0,0	0,0	100,2	15,60	6,76	0,40	1,24	0,00	0,00	0,43	0,11	4,1	81,98	0,00	15,50	0,00	0,00	0,00	2,51	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 13	54,5	37,5	2,0	6,2	0,0	0,0	100,2	15,62	6,74	0,37	1,27	0,00	0,00	0,43	0,10	4,1	81,82	0,00	15,84	0,00	0,00	0,00	2,33	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 14	52,7	39,1	4,2	4,5	0,0	0,0	100,4	15,23	7,09	0,77	0,92	0,00	0,00	0,47	0,11	4,2	83,71	0,00	11,45	0,00	0,00	0,00	4,82	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 15	54,1	37,5	2,6	5,7	0,3	0,0	100,3	15,51	6,74	0,48	1,16	0,10	0,00	0,43	0,11	4,1	82,51	0,00	14,45	0,00	1,29	0,00	1,73	0,00	
Metadiorito Brumado	FA03_gahnita 16	52,7	38,5	4,2	5,1	0,0	0,0	100,4	15,23	6,96	0,77	1,04	0,00	0,00	0,46	0,12	3,8	82,16	0,00	13,03	0,00	0,00	0,00	4,80	0,00	
Metadiorito Brumado	FA06_gahnita 1	55,5	34,1	1,4	8,5	0,7	0,0	100,1	15,75	6,05	0,25	1,70	0,25	0,00	0,38	0,14	3,1	75,58	1,56	21,28	0,00	1,57	0,00	0,00	0,00	
Metadiorito Brumado	FA06_gahnita 2	54,0	35,1	3,2	7,4	0,6	0,0	100,3	15,42	6,28	0,58	1,50	0,23	0,00	0,41	0,15	3,0	77,68	0,00	18,70	0,00	2,86	0,00	0,74	0,00	
Metadiorito Brumado	FA06_gahnita 3	53,5	38,8	3,4	4,3	0,4	0,0	100,3	15,38	6,99	0,62	0,87	0,14	0,00	0,45	0,11	4,7	85,18	0,00	10,93	0,00	1,74	0,00	2,13	0,00	
Metadiorito Brumado	FA06_gahnita 4	52,7	38,7	4,5	4,0	0,6	0,0	100,4	15,17	6,99	0,82	0,81	0,21	0,00	0,46	0,12	4,3	84,71	0,00	10,13	0,00	2,58	0,00	2,56	0,00	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_gahnita 1	57,2	32,1	0,0	10,7	0,0	0,0	100,0	16,16	5,68	0,00	2,15	0,00	0,00	0,35	0,13	2,6	71,04	0,00	26,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_gahnita 2	56,3	32,8	0,1	10,8	0,0	0,0	100,0	15,98	5,83	0,02	2,17	0,00	0,00	0,36	0,14	2,7	72,70	0,00	27,16	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_gahnita 3	56,4	35,8	0,0	7,8	0,0	0,0	100,0	16,05	6,39	0,00	1,57	0,00	0,00	0,40	0,10	4,1	79,82	0,00	19,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_gahnita 4	55,8	35,8	0,5	8,0	0,0	0,0	100,0	15,91	6,39	0,08	1,61	0,00	0,00	0,40	0,11	3,8	79,34	0,00	20,11	0,00	0,00	0,00	0,53	0,00	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_gahnita 5	56,6	32,8	0																						

Anexo V - Gahnita EDS.xlsx

Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 14	54,1	36,4	0,0	8,9	0,2	0,4	100,0	15,49	6,53	0,00	1,81	0,09	0,08	0,43	0,12	3,6	74,47	1,05	21,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 15	54,4	34,3	0,0	10,6	0,2	0,5	100,0	15,54	6,14	0,00	2,15	0,08	0,09	0,40	0,14	2,9	70,75	0,91	25,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 16	54,9	35,4	0,0	9,0	0,3	0,4	100,0	15,66	6,33	0,00	1,83	0,10	0,08	0,41	0,12	3,5	74,74	1,25	21,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 30	53,9	36,3	0,0	9,2	0,2	0,4	100,0	15,45	6,52	0,00	1,86	0,09	0,07	0,43	0,13	3,5	73,71	1,05	21,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 31	54,7	33,2	0,0	11,2	0,5	0,4	100,0	15,57	5,92	0,00	2,27	0,16	0,09	0,39	0,16	2,6	68,50	1,94	26,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 32	54,2	34,2	0,0	10,9	0,2	0,5	100,0	15,48	6,12	0,00	2,21	0,09	0,11	0,40	0,15	2,8	69,73	1,05	25,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 33	54,3	36,4	0,0	8,7	0,2	0,4	100,0	15,55	6,52	0,00	1,77	0,08	0,08	0,42	0,12	3,7	75,25	0,94	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 34	53,7	36,8	0,0	8,8	0,1	0,5	100,0	15,42	6,63	0,00	1,80	0,05	0,10	0,44	0,12	3,7	74,80	0,61	20,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 35	54,9	35,7	0,0	8,8	0,2	0,4	100,0	15,67	6,38	0,00	1,77	0,08	0,09	0,41	0,12	3,6	75,64	1,02	21,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 37	54,5	36,2	0,0	8,7	0,3	0,4	100,0	15,57	6,48	0,00	1,77	0,10	0,07	0,42	0,12	3,7	75,08	1,22	21,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09-gahnita 0.6A 39	55,4	35,2	0,0	8,8	0,2	0,4	100,0	15,77	6,27	0,00	1,78	0,09	0,09	0,40	0,12	3,5	75,87	1,03	21,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita outra	56,5	34,5	0,0	9,0	0,0	0,0	100,0	16,04	6,15	0,00	1,81	0,00	0,00	0,38	0,11	3,4	76,85	0,00	22,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 1	55,9	32,4	1,1	9,9	0,8	0,0	100,1	15,80	5,73	0,19	1,99	0,28	0,00	0,36	0,16	2,6	71,55	2,32	24,91	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 2	56,7	29,8	0,3	12,1	0,8	0,4	100,0	15,94	5,26	0,05	2,41	0,27	0,07	0,33	0,17	2,1	65,67	3,34	30,06	0,34	0,00	0,00	0,00	0,56
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 3	56,0	31,0	1,1	10,9	0,8	0,4	100,1	15,79	5,47	0,20	2,17	0,28	0,08	0,35	0,17	2,3	68,32	3,22	27,18	0,97	0,29	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 4	56,2	30,5	0,9	11,6	0,8	0,0	100,1	15,84	5,39	0,16	2,33	0,28	0,00	0,34	0,18	2,2	67,34	2,55	29,08	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 5	56,1	30,9	1,1	11,2	0,9	0,0	100,1	15,81	5,45	0,19	2,25	0,31	0,00	0,34	0,17	2,2	68,04	2,64	28,10	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 6	56,8	30,4	0,1	11,9	0,8	0,0	100,0	15,97	5,36	0,02	2,37	0,27	0,00	0,34	0,17	2,2	66,98	3,26	29,59	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 7	55,9	31,6	1,1	10,7	0,8	0,0	100,1	15,79	5,59	0,20	2,13	0,28	0,00	0,35	0,17	2,4	69,82	2,21	26,67	0,00	1,27	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 8	56,4	31,1	0,6	11,2	0,8	0,0	100,1	15,88	5,48	0,11	2,23	0,29	0,00	0,35	0,17	2,3	68,44	2,93	27,89	0,00	0,72	0,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_gahnita B 9	56,8	30,5	0,3	11,6	0,9	0,0	100,0	15,95	5,37	0,05	2,31	0,32	0,00	0,34	0,17	2,3	67,09	3,70	28,90	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00

Measurement Condition															
	Element	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos.	(nm)	BG_L	BG_U	Peak	Back	Gain	High.V	Base.L	Window.W
1	Al	Ka	TAP	1	15	90,606	0,83393	2,5	2,0	10	5.0 (s)	8	1656	0,7	9.3 (V)
2	Mg	Ka	TAP	1	15	107,47	0,989	2,5	1,5	10	5.0 (s)	8	1656	0,7	9.3 (V)
3	Zn	Ka	LIFL	3	15	99,871	0,14352	1,0	1,0	15	7.5 (s)	32	1700	0,7	0 (V)
4	Mn	Ka	LIFL	3	15	146,171	0,21018	2,5	2,5	20	10.0 (s)	32	1700	0,7	0 (V)
5	Fe	Ka	LIFH	5	15	134,494	0,1936	2,0	2,0	10	5.0 (s)	32	1700	0,7	0 (V)
6	Si	Ka	TAP	1	15	77,386	0,71254	2,5	1,0	10	5.0 (s)	8	1656	0,7	9.3 (V)
7	K	Ka	PETH	5	15	119,65	0,37414	1,5	1,5	10	5.0 (s)	64	1716	1,1	0 (V)
8	Na	Ka	TAP	2	15	129,477	1,19101	4,0	1,5	10	5.0 (s)	8	1718	0,7	9.3 (V)
9	Ca	Ka	PETL	4	15	107,185	0,33584	1,5	1,5	10	5.0 (s)	64	1700	0,7	0 (V)
10	Bi	Ma	PETH	5	15	163,752	0,5118	2,0	2,0	20	10.0 (s)	64	1716	1,1	0 (V)
11	Te	La	PETH	5	15	105,159	0,32892	2,0	2,0	20	10.0 (s)	64	1716	1,1	0 (V)
12	S	Ka	PETL	3	15	172,098	0,53722	2,0	1,0	10	5.0 (s)	64	1700	0,7	0 (V)

Standard Data							
	Element	Standard	Mass(%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1	Al2O3	AN_100	36,638	4,2157	5,8647	0,7128	1
2	MgO	Olivina	48,087	4,7301	7,8961	0,5973	1
3	ZnO	ZnO	100,004	0,0636	0,0641	0,9933	1
4	MnO	Mn_Hort	5,126	0,2677	0,2729	0,9809	1
5	FeO	Fe3O4	93,090	0,2153	0,2181	0,9872	1
6	SiO2	Enstatita	56,860	2,9782	4,3721	0,6812	1
7	K2O	Ortoclasio	16,575	1,0703	1,2024	0,8901	1
8	Na2O	Jadeita	13,399	5,412	10,7292	0,5025	1
9	CaO	Dolomita	30,433	0,8808	0,9214	0,9559	1
10	Bi	Bi	100,000	2,7708	3,4515	0,8028	1
11	Te	Te	100,000	0,9884	1,0865	0,9097	1
12	S	FeS2	53,450	2,3122	2,7738	0,833	1

Standard Intensity of WDS							
	Element	Curr.(A)	Net(cps)	Bg-(cps)	Bg+(cps)	S.D.(%)	Date
1	Al	2,13E-08	8772,5	73,9	51,8	0,15	02/02/2016
2	Mg	2,04E-08	8340,9	73,7	58,1	0,16	02/02/2016
3	Zn	2,04E-08	9356	110,9	117,4	0,12	02/02/2016
4	Mn	2,03E-08	469,3	15,1	14	0,48	02/02/2016
5	Fe	2,10E-08	12712,4	57,5	65,1	0,13	02/02/2016
6	Si	2,09E-08	12329	115	155,2	0,13	02/02/2016
7	K	1,51E-08	6399,2	40,9	38,2	0,18	17/06/2015
8	Na	2,10E-08	1783,9	16,3	21,5	0,34	02/02/2016
9	Ca	2,04E-08	10551,2	52	56,3	0,14	02/02/2016
10	Bi	2,06E-08	9849,8	167,2	97,5	0,1	03/02/2016
11	Te	2,05E-08	31751,3	347,4	321,6	0,06	03/02/2016
12	S	2,04E-08	10742	27,5	55	0,11	02/02/2016

Rocha encaixante	Amostra (analise)	% em peso dos óxidos						Proporções atômicas (32 oxigênios)				Membros finais (mol %)							
		Al ₂ O ₃	ZnO	FeO	MgO	MnO	Total	Al	Zn	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mg	Mn	Ghn	Spl	Hc	Jac	Mfr	Glx
Metadiorito Brumado	FA02(1)	55,77	38,03	6,97	0,12	0,23	101,12	15,77	6,74	0,23	1,17	0,04	0,05	84,47	0,00	14,41	0,59	0,54	0,00
Metadiorito Brumado	FA02(2)	54,35	36,87	6,97	0,08	0,23	98,50	15,78	6,71	0,22	1,22	0,03	0,05	84,16	0,00	14,87	0,60	0,37	0,00
Metadiorito Brumado	FA02(3)	57,17	37,49	6,95	0,08	0,22	101,92	15,98	6,57	0,02	1,36	0,03	0,04	82,07	0,35	17,03	0,10	0,00	0,45
Metadiorito Brumado	FA02(4)	55,61	36,64	7,15	0,09	0,23	99,73	15,91	6,56	0,09	1,36	0,03	0,05	82,05	0,40	16,95	0,59	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA02(5)	54,82	36,79	7,38	0,09	0,28	99,36	15,77	6,63	0,23	1,28	0,03	0,06	83,12	0,00	15,75	0,73	0,41	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(1)	55,35	36,08	8,19	0,06	0,24	99,93	15,81	6,46	0,19	1,47	0,02	0,05	80,94	0,00	18,18	0,62	0,27	0,00

Anexo VI - Gahnita_Resultados Analíticos WDS.xlsx

Metadiorito Brumado	FA03(2)	55,77	35,42	8,89	0,05	0,33	100,46	15,83	6,30	0,17	1,62	0,02	0,07	78,72	0,00	20,22	0,84	0,22	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(3)	55,29	36,26	8,58	0,07	0,25	100,46	15,73	6,46	0,27	1,46	0,03	0,05	81,37	0,00	17,67	0,64	0,32	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(4)	55,37	35,93	8,64	0,04	0,35	100,33	15,76	6,41	0,24	1,51	0,01	0,07	80,42	0,00	18,51	0,90	0,18	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(5)	55,26	35,52	8,74	0,08	0,31	99,92	15,78	6,35	0,22	1,55	0,03	0,06	79,59	0,00	19,25	0,80	0,36	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(6)	55,49	35,67	8,78	0,08	0,30	100,32	15,78	6,35	0,22	1,55	0,03	0,06	79,62	0,00	19,25	0,77	0,36	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(7)	55,71	36,18	8,20	0,09	0,23	100,41	15,83	6,44	0,17	1,48	0,03	0,05	80,55	0,00	18,46	0,59	0,40	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(8)	55,04	36,26	8,22	0,07	0,24	99,82	15,75	6,50	0,25	1,42	0,03	0,05	81,76	0,00	17,30	0,62	0,32	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(9)	55,45	36,03	8,33	0,06	0,25	100,12	15,81	6,43	0,19	1,49	0,02	0,05	80,66	0,00	18,43	0,64	0,27	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(10)	55,62	36,48	8,15	0,06	0,23	100,53	15,80	6,49	0,20	1,44	0,02	0,05	81,46	0,00	17,68	0,59	0,27	0,00
Metadiorito Brumado	FA03(11)	55,06	36,41	8,45	0,06	0,22	100,19	15,71	6,51	0,29	1,42	0,02	0,05	82,14	0,00	17,01	0,57	0,27	0,00
Metadiorito Brumado	FA06(1)	55,74	34,31	9,76	0,29	0,24	100,34	15,79	6,09	0,21	1,76	0,10	0,05	76,12	0,63	21,97	0,61	0,67	0,00
Metadiorito Brumado	FA06(2)	55,63	33,84	10,55	0,35	0,19	100,55	15,73	5,99	0,27	1,84	0,13	0,04	74,91	0,34	23,05	0,48	1,22	0,00
Metadiorito Brumado	FA06(3)	55,19	37,12	7,26	0,15	0,16	99,87	15,79	6,65	0,21	1,26	0,05	0,03	83,34	0,00	15,57	0,41	0,68	0,00
Metadiorito Brumado	FA06(4)	55,04	36,63	8,12	0,10	0,15	100,04	15,73	6,56	0,27	1,38	0,04	0,03	82,67	0,00	16,49	0,39	0,46	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA05(1)	55,71	32,23	10,20	0,21	0,34	98,68	15,98	5,79	0,02	2,06	0,08	0,07	72,41	0,95	25,76	0,10	0,00	0,78
Metagranitoide Ritapolis	FA05(3)	54,60	35,44	8,12	0,20	0,30	98,66	15,78	6,42	0,22	1,45	0,07	0,06	80,21	0,33	18,10	0,78	0,58	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA05(4)	54,12	34,61	9,19	0,05	0,20	98,17	15,74	6,30	0,26	1,64	0,02	0,04	79,51	0,00	19,73	0,53	0,23	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA05(5)	55,81	31,78	10,74	0,09	0,40	98,81	16,00	5,71	0,00	2,18	0,03	0,08	71,32	0,41	27,25	0,03	0,00	1,00
Metagranitoide Ritapolis	FA05(6)	55,53	31,54	11,12	0,10	0,40	98,69	15,94	5,67	0,06	2,21	0,04	0,08	70,90	0,45	27,61	0,35	0,00	0,68
Metagranitoide Ritapolis	FA05(7)	55,35	37,96	5,87	0,08	0,21	99,47	15,90	6,83	0,10	1,10	0,03	0,04	85,38	0,28	13,71	0,54	0,08	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA05(8)	55,92	31,67	10,65	0,09	0,43	98,77	16,03	5,69	0,00	2,17	0,03	0,09	71,31	0,41	27,17	0,00	0,00	1,11
Metagranitoide Ritapolis	FA07(1)	55,82	31,90	11,28	0,60	0,27	99,87	15,81	5,66	0,19	2,07	0,21	0,05	70,72	2,16	25,90	0,69	0,53	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA07(2)	56,22	29,63	13,36	0,42	0,27	99,90	15,88	5,24	0,12	2,55	0,15	0,05	65,52	1,79	31,92	0,68	0,09	0,00
Metagranitoide Ritapolis	FA07(3)	56,45	33,73	10,26	0,40	0,34	101,18	15,83	5,92	0,17	1,87	0,14	0,07	74,04	1,54	23,33	0,86	0,23	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(1)	55,54	34,44	9,07	0,10	0,37	99,51	15,88	6,17	0,12	1,72	0,04	0,08	77,10	0,45	21,50	0,75	0,00	0,20
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(2)	55,98	32,67	10,72	0,13	0,29	99,79	15,91	5,82	0,09	2,08	0,05	0,06	72,72	0,58	25,96	0,54	0,00	0,20
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(3)	56,03	32,14	11,33	0,15	0,38	100,03	15,88	5,71	0,12	2,16	0,05	0,08	71,34	0,67	27,02	0,73	0,00	0,24
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(4)	56,08	32,36	11,29	0,09	0,42	100,24	15,88	5,74	0,12	2,14	0,03	0,09	71,73	0,40	26,80	0,77	0,00	0,29
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(5)	56,19	34,64	8,97	0,13	0,37	100,30	15,92	6,15	0,08	1,73	0,05	0,08	76,87	0,58	21,61	0,47	0,00	0,47
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(6)	56,37	32,22	10,90	0,13	0,33	99,94	15,97	5,72	0,03	2,17	0,05	0,07	71,49	0,58	27,08	0,16	0,00	0,68
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(7)	56,17	34,94	8,85	0,12	0,31	100,39	15,91	6,20	0,09	1,69	0,04	0,06	77,51	0,54	21,17	0,54	0,00	0,25
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(8)	56,26	34,41	9,09	0,09	0,36	100,21	15,95	6,11	0,05	1,78	0,03	0,07	76,40	0,40	22,28	0,29	0,00	0,63
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(9)	56,08	34,64	9,11	0,11	0,37	100,31	15,90	6,15	0,10	1,73	0,04	0,08	76,90	0,49	21,66	0,62	0,00	0,32
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(10)	55,93	34,88	9,12	0,14	0,36	100,43	15,85	6,19	0,15	1,68	0,05	0,07	77,40	0,61	21,06	0,92	0,02	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(13)	55,85	34,76	9,10	0,10	0,39	100,20	15,87	6,19	0,13	1,70	0,04	0,08	77,31	0,45	21,24	0,84	0,00	0,15
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(16)	55,85	34,76	9,25	0,12	0,32	100,30	15,85	6,18	0,15	1,71	0,04	0,07	77,24	0,42	21,41	0,82	0,12	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09(37)	56,18	34,39	9,26	0,12	0,43	100,37	15,91	6,10	0,09	1,77	0,04	0,09	76,25	0,54	22,12	0,57	0,00	0,52
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(1)	56,22	32,01	11,07	0,13	0,38	99,80	15,96	5,69	0,04	2,19	0,05	0,08	71,13	0,58	27,32	0,28	0,00	0,69
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(2)	56,00	31,65	11,39	0,12	0,36	99,51	15,94	5,64	0,06	2,24	0,04	0,07	70,54	0,54	28,00	0,38	0,00	0,54
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(3)	56,02	31,99	11,19	0,14	0,42	99,75	15,92	5,69	0,08	2,17	0,05	0,09	71,16	0,63	27,14	0,53	0,00	0,54
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(4)	56,62	32,63	11,17	0,11	0,38	100,90	15,91	5,74	0,09	2,14	0,04	0,08	71,80	0,49	26,75	0,55	0,00	0,41
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(5)	56,93	32,80	10,77	0,12	0,40	101,01	15,97	5,76	0,03	2,11	0,04	0,08	72,04	0,53	26,42	0,19	0,00	0,82
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(6)	56,41	31,96	11,15	0,12	0,39	100,02	15,97	5,67	0,03	2,21	0,04	0,08	70,84	0,54	27,63	0,19	0,00	0,81
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(7)	55,81	31,87	11,12	0,10	0,39	99,29	15,93	5,70	0,07	2,18	0,04	0,08	71,24	0,45	27,31	0,42	0,00	0,58
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(8)	56,78	31,82	11,03	0,46	0,29	100,37	15,97	5,61	0,03	2,17	0,16	0,06	70,08	2,05	27,15	0,19	0,00	0,55
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09b(9)	56,59	32,69	11,05	0,12	0,38	100,83	15,92	5,76	0,08	2,12	0,04	0,08	71,99	0,53	26,52	0,52	0,00	0,44
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(1)	55,62	31,34	11,61	0,37	0,27	99,20	15,86	5,60	0,14	2,21	0,13	0,06	69,98	1,50	27,66	0,69	0,17	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(2)	56,13	29,83	13,47	0,42	0,33	100,18	15,82	5,27	0,18	2,52	0,15	0,07	65,84	1,60	31,46	0,84	0,28	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(3)	55,79	31,13	12,37	0,42	0,28	99,99	15,79	5,52	0,21	2,27	0,15	0,06	68,98	1,28	28,42	0,71	0,60	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(4)	56,13	30,28	12,86	0,40	0,32	99,99	15,86	5,36	0,14	2,43	0,14	0,06	66,97	1,70	30,43	0,81	0,09	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(5)	55,86	30,04	13,22	0,42	0,26	99,80	15,81	5,33	0,19	2,47	0,15	0,05	66,59	1,38	30,87	0,66	0,50	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(6)	55,78	30,70	12,60	0,35	0,32	99,75	15,82	5,45	0,18	2,36	0,13	0,07	68,17	1,26	29,44	0,82	0,31	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(7)	56,52	31,58	12,16	0,34	0,29	100,90	15,85	5,55	0,15	2,27	0,12	0,06	69,35	1,32	28,41	0,73	0,19	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(8)	55,79	30,70	12,42	0,35	0,28	99,55	15,85	5,46	0,15	2,35	0,13	0,06	68,29	1,35	29,42	0,71	0,22	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11(9)	55,91	30,87	12,77	0,43	0,25	100,23	15,78	5,46	0,22	2,34	0,15	0,05	68,22	1,18	29,23	0,63	0,74	0,00

Ilmenitas
Measurement
WDS elements

Condition

	Elemen	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos.	Peak	Back	Standard
1	Al	Ka	TAP	1	15,00	90,627	10,00	5.0 (s)	AN_100
2	Mg	Ka	TAP	2	15,00	107,481	20,00	10.0 (s)	Olivina
3	Si	Ka	TAP	2	15,00	77,416	10,00	5.0 (s)	Enstatite_AI_5
4	Mn	Ka	LIFL	3	15,00	146,152	30,00	15.0 (s)	Mn_Hort
5	Cr	Ka	PETL	3	15,00	73,358	15,00	7.5 (s)	GS-3
6	Ti	Ka	PETL	4	15,00	88,088	20,00	10.0 (s)	A-128
7	Ca	Ka	PETL	4	15,00	107,625	10,00	5.0 (s)	DIOPSIDIO
8	Nb	La	PETH	5	15,00	183,289	30,00	15.0 (s)	Nb
9	V	Ka	LIFH	5	15,00	174,120	30,00	15.0 (s)	W-GLASS
10	Fe	Ka	LIFH	5	15,00	134,614	20,00	10.0 (s)	Fe3O4
11	Ni	Ka	LIFH	5	15,00	115,309	20,00	10.0 (s)	P140_Olivina
12	Zn	Ka	LIFH	5	15,00	99,722	20,00	10.0 (s)	ZnO

Measurement
Order

Order of WDS					
Channel 1		2	3	4	5
1	CH1_T	Mg_2TAP_	Mn_CH3_L	Ti_4PETL	Nb_5PETH
2	##	Si_CH2_T	Cr_3PETL	Ca_4PETL	V_5LIFH_
3	##	0,000	0,000	0,000	Fe_5LIFH
4	##	0,000	0,000	0,000	Ni_CH5_L
5	0	0	0	0	Zn_5LIFH

Rocha encaixante	Amostra /Análise	Oxidos (% em peso)												Proporção atômica (6 oxigênios)												Membros finais						
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Nb ₂ O ₅	Total	Si	Ti	Al	V	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Ni	Mn	Mg	Ca	Nb	Soma	MgTiO ₃	MnTiO ₃	FeTiO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Metadiorito Brumado	FA03_01	0,075	52,130	0,011	0,293	0,011	0,000	41,282	0,000	2,013	0,075	0,000	0,087	95,977	0,004	2,039	0,001	0,012	0,000	0,000	1,795	0,000	0,089	0,006	0,000	0,002	3,948	0,31	4,69	94,97	0,00	0,04
Metadiorito Brumado	FA03_02	0,050	49,575	0,000	0,251	0,000	3,554	41,684	0,029	2,748	0,129	0,009	0,080	98,109	0,003	1,921	0,000	0,010	0,000	0,138	1,795	0,001	0,120	0,010	0,001	0,002	4,000	0,48	5,81	87,03	6,68	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_03	0,078	50,232	0,000	0,243	0,000	2,908	41,214	0,000	3,533	0,269	0,003	0,000	98,479	0,004	1,935	0,000	0,010	0,000	0,112	1,765	0,000	0,153	0,021	0,000	0,000	4,000	1,00	7,47	86,06	5,46	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_04	0,071	50,398	0,000	0,230	0,033	2,845	42,175	0,000	2,832	0,208	0,000	0,000	98,793	0,004	1,936	0,000	0,009	0,001	0,109	1,802	0,000	0,123	0,016	0,000	0,000	4,000	0,77	5,98	87,91	5,34	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_05	0,100	48,482	0,000	0,506	0,032	5,628	42,291	0,000	1,167	0,142	0,001	0,000	98,347	0,005	1,875	0,000	0,021	0,001	0,218	1,818	0,000	0,051	0,011	0,000	0,000	4,000	0,52	2,42	86,68	10,38	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_06	0,071	52,054	0,000	0,229	0,031	0,043	46,184	0,000	0,314	0,217	0,020	0,010	99,172	0,004	1,990	0,000	0,009	0,001	0,002	1,963	0,000	0,013	0,016	0,001	0,000	4,000	0,83	0,68	98,42	0,08	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_07	0,057	51,954	0,000	0,200	0,000	0,000	43,652	0,017	2,601	0,069	0,001	0,066	98,617	0,003	1,997	0,000	0,008	0,000	0,000	1,865	0,001	0,113	0,005	0,000	0,002	3,994	0,26	5,68	94,06	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_08	0,026	51,962	0,005	0,236	0,000	0,000	43,629	0,000	2,608	0,053	0,010	0,057	98,585	0,001	1,998	0,000	0,010	0,000	0,000	1,865	0,000	0,113	0,004	0,001	0,001	3,994	0,20	5,70	94,09	0,00	0,02
Metadiorito Brumado	FA03_09	0,064	48,179	0,000	0,370	0,003	6,363	41,654	0,000	1,335	0,215	0,017	0,000	98,200	0,003	1,866	0,000	0,015	0,000	0,247	1,793	0,000	0,058	0,017	0,001	0,000	4,000	0,78	2,75	84,81	11,66	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_10	0,080	49,682	0,000	0,328	0,024	3,587	42,156	0,000	2,579	0,016	0,021	0,039	98,511	0,004	1,918	0,000	0,013	0,001	0,139	1,809	0,000	0,112	0,001	0,001	0,001	4,000	0,06	5,44	87,78	6,72	0,00
Metadiorito Brumado	FA03_11	0,086	49,425	0,000	0,358	0,000	4,307	41,902	0,000	2,549	0,035	0,017	0,009	98,688	0,004	1,905	0,000	0,015	0,000	0,166	1,796	0,000	0,111	0,003	0,001	0,000	4,000	0,13	5,33	86,54	8,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_01	0,080	49,222	0,000	0,528	0,131	4,703	42,834	0,000	1,453	0,033	0,013	0,013	99,011	0,004	1,892	0,000	0,022	0,005	0,181	1,830	0,000	0,063	0,003	0,001	0,000	4,000	0,12	3,03	88,14	8,71	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_02	0,065	50,754	0,000	0,499	0,051	1,685	44,208	0,000	1,515	0,012	0,046	0,087	98,922	0,003	1,950	0,000	0,020	0,002	0,065	1,888	0,000	0,066	0,001	0,002	0,002	4,000	0,04	3,25	93,50	3,21	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_03	0,072	51,835	0,000	0,233	0,000	0,000	40,790	0,013	5,823	0,130	0,000	0,289	99,184	0,004	1,983	0,000	0,010	0,000	0,000	1,735	0,001	0,251	0,010	0,000	0,007	3,999	0,49	12,57	86,94	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_04	0,087	51,891	0,000	0,217	0,000	0,000	40,730	0,005	5,803	0,135	0,007	0,294	99,170	0,004	1,984	0,000	0,009	0,000	0,000	1,732	0,000	0,250	0,010	0,000	0,007	3,997	0,51	12,55	86,94	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_05	0,096	51,784	0,000	0,242	0,007	0,623	43,702	0,000	2,800	0,073	0,027	0,011	99,364	0,005	1,978	0,000	0,010	0,000	0,024	1,856	0,000	0,120	0,006	0,001	0,000	4,000	0,28	6,00	92,53	1,19	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_06	0,070	52,352	0,000	0,216	0,004	0,000	43,693	0,000	2,856	0,061	0,021	0,022	99,293	0,004	1,998	0,000	0,009	0,000	0,000	1,854	0,000	0,123	0,005	0,001	0,001	3,993	0,23	6,19	93,57	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_07	0,074	52,916	0,000	0,201	0,008	0,000	42,509	0,012	3,012	0,147	0,024	0,015	98,916	0,004	2,017	0,000	0,008	0,000	0,000	1,802	0,000	0,129	0,011	0,001	0,000	3,974	0,57	6,66	92,77	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_08	0,037	53,074	0,000	0,232	0,014	0,000	43,253	0,000	2,985	0,160	0,001	0,017	99,774	0,002	2,010	0,000	0,009	0,001	0,000	1,821	0,000	0,127	0,012	0,000	0,000	3,983	0,61	6,49	92,90	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_09	0,097	51,344	0,002	0,189	0,000	0,000	40,645	0,000	5,429	0,046	0,018	0,893	98,663	0,005	1,975	0,000	0,008	0,000	0,000	1,738	0,000	0,235	0,004	0,001	0,021	3,986	0,18	11,89	87,92	0,00	0,01
Metadiorito Brumado	FA06_10	0,107	51,560	0,000	0,200	0,000	0,000	41,166	0,000	5,525	0,072	0,007	0,393	99,030	0,005	1,977	0,000	0,008	0,000	0,000	1,755	0,000	0,239	0,005	0,000	0,009	4,000	0,27	11,93	87,79	0,00	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_11	0,073	51,019	0,000	0,229	0,001	0,231	40,072	0,000	5,797	0,118	0,018	0,186	97,743	0,004	1,981	0,000	0,009	0,000	0,009	1,729	0,000	0,253	0,009	0,001	0,004	4,000	0,45	12,66	86,44	0,45	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_12	0,115	51,441	0,000	0,223	0,000	0,368	43,123	0,000	3,704	0,031	0,011	0,497	99,512	0,006	1,965	0,000	0,009	0,000	0,014	1,832	0,000	0,159	0,002	0,001	0,011	4,000	0,12	7,94	91,25	0,70	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_13	0,129	48,638	0,000	0,209	0,006	5,738	40,254	0,013	3,891	0,021	0,012	0,332	99,244	0,007	1,867	0,000	0,009	0,000	0,220	1,718	0,001	0,168	0,002	0,001	0,008	4,000	0,08	7,98	81,49	10,45	0,00
Metadiorito Brumado	FA06_14	0,114	48,775	0,000	0,228	0,000	5,556	40,031	0,000	4,133	0,057	0,018	0,309	99,220	0,006	1,872	0,000	0,009	0,000	0,213	1,708	0,000	0,179	0,004	0,001	0,007	4,000	0,21	8,49	81,17	10,14	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_01	0,075	51,402	0,000	0,253	0,011	0,000	42,673	0,000	3,167	0,133	0,017	0,045	97,776	0,004	1,992	0,000	0,010	0,000	0,000	1,839	0,000	0,138	0,010	0,001	0,001	3,997	0,51	6,96	92,53	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_02	0,098	51,323	0,005	0,206	0,000	0,000	42,567	0,000	3,203	0,091	0,024	0,064	97,581	0,005	1,993	0,000	0,009	0,000	0,000	1,838	0,000	0,140	0,007	0,001	0,001	3,995	0,35	7,06	92,58	0,00	0,02
Metagranitoide Ritápolis	FA05_03	0,042	52,199	0,000	0,204	0,002	0,000	42,667	0,010	3,150	0,106	0,013	0,097	98,489	0,002	2,005	0,000	0,008	0,000	0,000	1,822	0,000	0,136	0,008	0,001	0,002	3,985	0,41	6,93	92,66	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_04	0,119	52,272	0,000	0,280	0,089	0,000	40,906	0,035	2,824	0,343	0,009	0,035	96,910	0,006	2,025	0,000	0,012	0,004	0,000	1,762	0,001	0,123	0,026	0,000	0,001	3,960	1,38	6,44	92,18	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_05	0,105	51,985	0,000	0,260	0,097	0,000	41,233	0,039	2,820	0,322	0,013	0,046	96,920	0,005	2,017	0,000	0,011	0,004	0,000	1,779	0,002	0,123	0,025	0,001	0,001	3,968	1,29	6,39	92,32	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA05_06	0,110	49,256	0,033	0,334	0,000	3,903	43,400	0,000	0,365	0,377	0,000	0,006	97,783	0,006	1,910	0,002	0,014	0,000	0,151	1,872	0,000	0,016	0,029	0,000	0,000	4,000	1,40	0,77	90,42	7,32	0,10
Metagranitoide Ritápolis	FA05_07																															

Metagranitoide Ritápolis	FA07_15	0,061	50,341	0,000	0,248	0,000	2,717	42,583	0,000	2,874	0,024	0,025	0,200	99,071	0,003	1,933	0,000	0,010	0,000	0,104	1,818	0,000	0,124	0,002	0,001	0,005	4,000	0,09	6,07	88,75	5,10	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA07_16	0,076	51,744	0,000	0,241	0,009	0,000	42,271	0,000	4,202	0,090	0,023	0,223	98,879	0,004	1,986	0,000	0,010	0,000	0,000	1,803	0,000	0,182	0,007	0,001	0,005	3,998	0,34	9,12	90,54	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA07_17	0,081	51,671	0,000	0,246	0,000	0,000	42,036	0,022	4,448	0,114	0,038	0,245	98,901	0,004	1,983	0,000	0,010	0,000	0,000	1,793	0,001	0,192	0,009	0,002	0,006	4,000	0,44	9,64	89,93	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA07_18	0,106	51,721	0,000	0,234	0,007	0,000	42,593	0,016	3,881	0,107	0,030	0,329	99,025	0,005	1,982	0,000	0,010	0,000	0,000	1,814	0,001	0,167	0,008	0,002	0,008	3,997	0,41	8,41	91,18	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA07_19	0,042	51,994	0,000	0,224	0,008	0,000	42,783	0,000	3,311	0,063	0,023	0,298	98,746	0,002	1,995	0,000	0,009	0,000	0,000	1,825	0,000	0,143	0,005	0,001	0,007	3,988	0,24	7,25	92,51	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_01	0,087	50,888	0,000	0,255	0,000	0,596	38,946	0,003	7,577	0,000	0,000	0,692	99,045	0,004	1,955	0,000	0,010	0,000	0,023	1,663	0,000	0,328	0,000	0,000	0,016	4,000	0,00	16,27	82,59	1,14	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_02	0,083	50,072	0,000	0,258	0,003	4,000	41,577	0,008	3,339	0,141	0,000	0,074	99,555	0,004	1,912	0,000	0,010	0,000	0,153	1,765	0,000	0,144	0,011	0,000	0,002	4,000	0,52	6,93	85,18	7,37	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_03	0,088	50,151	0,000	0,252	0,000	3,805	41,481	0,015	3,496	0,133	0,000	0,056	99,477	0,004	1,916	0,000	0,010	0,000	0,145	1,762	0,001	0,150	0,010	0,000	0,001	4,000	0,49	7,27	85,21	7,03	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_04	0,042	52,874	0,000	0,212	0,000	0,000	41,733	0,000	3,774	0,089	0,020	0,084	98,827	0,002	2,018	0,000	0,009	0,000	0,000	1,771	0,000	0,162	0,007	0,001	0,002	3,972	0,35	8,36	91,29	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_05	0,045	52,826	0,000	0,200	0,000	0,000	41,345	0,000	3,968	0,102	0,000	0,077	98,562	0,002	2,021	0,000	0,008	0,000	0,000	1,758	0,000	0,171	0,008	0,000	0,002	3,970	0,40	8,82	90,78	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_06	0,074	52,212	0,000	0,242	0,000	0,000	43,228	0,000	3,298	0,081	0,017	0,190	99,342	0,004	1,992	0,000	0,010	0,000	0,000	1,834	0,000	0,142	0,006	0,001	0,004	3,993	0,31	7,15	92,54	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_07	0,045	52,446	0,000	0,203	0,000	0,000	43,504	0,003	3,290	0,070	0,007	0,152	99,721	0,002	1,994	0,000	0,008	0,000	0,000	1,839	0,000	0,141	0,005	0,000	0,003	3,994	0,27	7,10	92,64	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_08	0,071	51,510	0,000	0,239	0,000	0,997	43,972	0,000	2,447	0,022	0,014	0,084	99,356	0,004	1,970	0,000	0,010	0,000	0,038	1,869	0,000	0,105	0,002	0,001	0,002	4,000	0,08	5,23	92,79	1,89	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_09	0,034	52,357	0,000	0,240	0,007	0,182	43,849	0,000	3,288	0,055	0,011	0,146	100,170	0,002	1,985	0,000	0,010	0,000	0,007	1,848	0,000	0,140	0,004	0,001	0,003	4,000	0,21	7,02	92,43	0,35	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_10	0,033	52,146	0,000	0,268	0,000	0,454	43,551	0,000	3,399	0,047	0,010	0,137	100,045	0,002	1,980	0,000	0,011	0,000	0,017	1,838	0,000	0,145	0,004	0,001	0,003	4,000	0,18	7,25	91,71	0,86	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_11	0,066	52,507	0,000	0,245	0,000	0,000	40,981	0,000	4,920	0,090	0,000	0,222	99,031	0,003	2,004	0,000	0,010	0,000	0,000	1,739	0,000	0,211	0,007	0,000	0,005	3,980	0,35	10,80	88,85	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_12	0,066	51,851	0,000	0,229	0,000	0,000	41,766	0,033	4,206	0,034	0,015	0,484	98,684	0,003	1,991	0,000	0,009	0,000	0,000	1,783	0,001	0,182	0,003	0,001	0,011	3,984	0,13	9,24	90,63	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_13	0,043	51,949	0,000	0,235	0,006	0,000	42,451	0,000	4,274	0,052	0,005	0,154	99,169	0,002	1,988	0,000	0,010	0,000	0,000	1,807	0,000	0,184	0,004	0,000	0,004	3,999	0,20	9,23	90,57	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_14	0,077	51,547	0,000	0,242	0,000	1,390	43,658	0,011	2,720	0,062	0,000	0,074	99,781	0,004	1,962	0,000	0,010	0,000	0,053	1,848	0,000	0,117	0,005	0,000	0,002	4,000	0,23	5,77	91,38	2,62	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_15	0,068	51,884	0,000	0,263	0,000	1,078	43,965	0,003	2,798	0,026	0,000	0,093	100,180	0,003	1,968	0,000	0,011	0,000	0,041	1,854	0,000	0,119	0,002	0,000	0,002	4,000	0,10	5,93	91,95	2,03	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_16	0,093	51,649	0,000	0,238	0,000	0,516	43,173	0,000	3,456	0,051	0,000	0,184	99,359	0,005	1,974	0,000	0,010	0,000	0,020	1,835	0,000	0,149	0,004	0,000	0,004	4,000	0,19	7,41	91,41	0,98	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_17	0,099	50,747	0,000	0,228	0,000	1,618	42,501	0,000	3,755	0,020	0,015	0,551	99,535	0,005	1,940	0,000	0,009	0,000	0,062	1,807	0,000	0,162	0,002	0,001	0,013	4,000	0,08	7,96	88,92	3,05	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_18	0,112	50,628	0,000	0,194	0,000	1,492	42,485	0,000	3,623	0,032	0,008	0,510	99,084	0,006	1,944	0,000	0,008	0,000	0,057	1,814	0,000	0,157	0,002	0,000	0,012	4,000	0,12	7,72	89,34	2,82	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_19	0,045	51,743	0,000	0,244	0,000	0,000	41,532	0,000	4,588	0,060	0,004	0,404	98,620	0,002	1,989	0,000	0,010	0,000	0,000	1,775	0,000	0,199	0,005	0,000	0,009	3,989	0,23	10,04	89,73	0,00	0,00
Metagranitoide Ritápolis	FA08_20	0,040	52,028	0,000	0,227	0,000	0,000	41,365	0,024	4,394	0,055	0,016	0,435	98,585	0,002	1,998	0,000	0,009	0,000	0,000	1,766	0,001	0,190	0,004	0,001	0,010	3,981	0,22	9,69	90,09	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_01	0,045	52,879	0,000	0,220	0,000	0,000	44,025	0,000	2,713	0,278	0,003	0,000	100,163	0,002	1,998	0,000	0,009	0,000	0,000	1,850	0,000	0,115	0,021	0,000	0,000	3,995	1,05	5,81	93,14	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_02	0,078	52,339	0,000	0,293	0,001	0,000	45,443	0,000	1,334	0,067	0,001	0,025	99,580	0,004	1,993	0,000	0,012	0,000	0,000	1,924	0,000	0,057	0,005	0,000	0,001	3,996	0,26	2,88	96,86	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_03	0,141	52,514	0,000	0,187	0,000	0,000	45,609	0,009	0,509	0,141	0,005	0,051	99,167	0,007	2,002	0,000	0,008	0,000	0,000	1,934	0,000	0,022	0,011	0,000	0,001	3,985	0,54	1,11	98,35	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_04	0,042	52,953	0,000	0,214	0,019	0,000	44,677	0,000	1,338	0,235	0,009	0,020	99,507	0,002	2,010	0,000	0,009	0,001	0,000	1,885	0,000	0,057	0,018	0,000	0,000	3,983	0,90	2,92	96,18	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_05	0,095	52,399	0,000	0,216	0,032	0,000	44,251	0,002	1,432	0,200	0,017	0,005	98,648	0,005	2,007	0,000	0,009	0,001	0,000	1,884	0,000	0,062	0,015	0,001	0,000	3,983	0,77	3,15	96,08	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_06	0,105	52,407	0,000	0,242	0,000	0,000	45,063	0,019	1,396	0,099	0,018	0,049	99,399	0,005	1,997	0,000	0,010	0,000	0,000	1,909	0,001	0,060	0,007	0,001	0,001	3,991	0,38	3,03	96,59	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_07	0,100	52,435	0,000	0,257	0,000	0,000	45,044	0,000	1,294	0,058	0,018	0,012	99,217	0,005	2,001	0,000	0,010	0,000	0,000	1,911	0,000	0,056	0,004	0,001	0,000	3,989	0,22	2,82	96,96	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_08	0,130	52,042	0,000	0,255	0,006	0,049	45,206	0,005	1,537	0,121	0,016	0,036	99,402	0,007	1,986	0,000	0,010	0,000	0,002	1,918	0,000	0,066	0,009	0,001	0,001	4,000	0,46	3,31	96,14	0,09	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_09	0,102	53,785	0,000	0,282	0,000	0,000	42,795	0,000	0,880	0,281	0,007	0,032	98,163	0,005	2,049	0,000	0,011	0,000	0,000	1,813	0,000	0,038	0,021	0,000	0,001	3,939	1,13	2,02	96,85	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_10	0,106	53,172	0,000	0,287	0,028	0,000	44,080	0,001	0,645	0,271	0,013	0,066	98,667	0,005	2,025	0,000	0,012	0,001	0,000	1,867	0,000	0,028	0,020	0,001	0,002	3,961	1,07	1,44	97,49	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_11	0,103	51,826	0,000	0,224	0,016	0,000	43,717	0,000	2,530	0,146	0,032	0,027	98,620	0,005	1,992	0,000	0,009	0,001	0,000	1,868	0,000	0,109	0,011	0,002	0,001	3,997	0,56	5,51	93,93	0,00	0,00
Filitos da SMVS Rio das Mortes	FA09_12	0,087	52,536	0,000	0,229	0,000	0,000	44,658	0,016	2,292	0,109	0,005	0,000	99,932																		

Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_04	0,035	52,492	0,000	0,189	0,002	0,000	45,208	0,000	1,511	0,045	0,000	0,035	99,517	0,002	2,000	0,000	0,008	0,000	0,000	1,915	0,000	0,065	0,003	0,000	0,001	3,993	0,17	3,27	96,56	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_05	0,037	51,388	0,001	0,286	0,000	2,209	44,595	0,000	1,459	0,122	0,001	0,026	100,124	0,002	1,950	0,000	0,012	0,000	0,084	1,881	0,000	0,062	0,009	0,000	0,001	4,000	0,45	3,06	92,37	4,12	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_06	0,041	53,306	0,000	0,218	0,000	0,000	44,110	0,017	1,154	0,133	0,000	0,037	99,017	0,002	2,028	0,000	0,009	0,000	0,000	1,865	0,001	0,049	0,010	0,000	0,001	3,965	0,52	2,57	96,91	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA11_07	0,068	52,984	0,000	0,224	0,023	0,000	45,230	0,001	1,355	0,152	0,000	0,000	100,037	0,003	2,004	0,000	0,009	0,001	0,000	1,902	0,000	0,058	0,011	0,000	0,000	3,988	0,58	2,93	96,49	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_01	0,092	51,395	0,000	0,209	0,010	2,078	45,176	0,017	0,897	0,143	0,000	0,018	100,035	0,005	1,951	0,000	0,008	0,000	0,079	1,907	0,001	0,038	0,011	0,000	0,000	4,000	0,53	1,88	93,71	3,88	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_02	0,080	51,512	0,000	0,224	0,000	2,129	45,133	0,017	0,972	0,165	0,006	0,006	100,243	0,004	1,951	0,000	0,009	0,000	0,081	1,900	0,001	0,041	0,012	0,000	0,000	4,000	0,61	2,04	93,39	3,96	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_03	0,041	52,536	0,000	0,198	0,000	0,000	40,050	0,000	6,022	0,043	0,003	0,227	99,121	0,002	2,005	0,000	0,008	0,000	0,000	1,699	0,000	0,259	0,003	0,000	0,005	3,981	0,17	13,19	86,64	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_04	0,088	53,170	0,000	0,248	0,000	0,000	44,168	0,013	2,047	0,219	0,001	0,205	100,160	0,004	2,005	0,000	0,010	0,000	0,000	1,851	0,001	0,087	0,016	0,000	0,005	3,979	0,84	4,45	94,72	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_05	0,119	52,785	0,000	0,222	0,006	0,000	43,970	0,014	2,143	0,195	0,018	0,205	99,675	0,006	2,001	0,000	0,009	0,000	0,000	1,853	0,001	0,091	0,015	0,001	0,005	3,982	0,75	4,67	94,58	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_06	0,048	53,369	0,000	0,186	0,000	0,000	42,650	0,000	3,576	0,093	0,007	0,090	100,019	0,002	2,015	0,000	0,007	0,000	0,000	1,790	0,000	0,152	0,007	0,000	0,002	3,976	0,36	7,80	91,84	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_07	0,052	53,200	0,000	0,241	0,000	0,000	43,456	0,023	2,817	0,213	0,000	0,040	100,042	0,003	2,009	0,000	0,010	0,000	0,000	1,824	0,001	0,120	0,016	0,000	0,001	3,983	0,81	6,11	93,07	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_08	0,111	53,094	0,000	0,262	0,006	0,000	43,517	0,000	2,661	0,226	0,001	0,034	99,912	0,006	2,006	0,000	0,011	0,000	0,000	1,828	0,000	0,113	0,017	0,000	0,001	3,982	0,86	5,78	93,36	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_09	0,040	53,182	0,004	0,236	0,000	0,000	42,554	0,014	3,461	0,062	0,008	0,134	99,694	0,002	2,014	0,000	0,010	0,000	0,000	1,792	0,001	0,148	0,005	0,000	0,003	3,974	0,24	7,59	92,16	0,00	0,01
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_10	0,069	52,677	0,000	0,242	0,000	0,000	43,620	0,000	3,063	0,226	0,009	0,057	99,963	0,003	1,995	0,000	0,010	0,000	0,000	1,837	0,000	0,131	0,017	0,000	0,001	3,995	0,86	6,58	92,56	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_11	0,056	52,928	0,006	0,246	0,000	0,000	43,528	0,006	3,136	0,208	0,000	0,076	100,190	0,003	1,999	0,000	0,010	0,000	0,000	1,828	0,000	0,133	0,016	0,000	0,002	3,991	0,79	6,75	92,45	0,00	0,02
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_12	0,099	52,891	0,022	0,241	0,000	0,000	42,957	0,003	3,181	0,143	0,006	0,219	99,762	0,005	2,003	0,001	0,010	0,000	0,000	1,809	0,000	0,136	0,011	0,000	0,005	3,979	0,55	6,93	92,45	0,00	0,07
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_13	0,053	53,089	0,000	0,241	0,014	0,000	42,973	0,029	3,155	0,136	0,011	0,178	99,878	0,003	2,008	0,000	0,010	0,001	0,000	1,807	0,001	0,134	0,010	0,001	0,004	3,978	0,52	6,88	92,59	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_14	0,107	52,782	0,000	0,220	0,000	0,000	44,494	0,039	2,088	0,061	0,004	0,034	99,830	0,005	2,001	0,000	0,009	0,000	0,000	1,876	0,002	0,089	0,005	0,000	0,001	3,988	0,23	4,53	95,24	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_15	0,074	53,157	0,000	0,223	0,020	0,000	43,878	0,000	2,764	0,107	0,018	0,152	100,392	0,004	2,003	0,000	0,009	0,001	0,000	1,838	0,000	0,117	0,008	0,001	0,003	3,984	0,41	5,97	93,62	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_16	0,092	53,068	0,000	0,195	0,000	0,000	44,127	0,000	2,094	0,222	0,001	0,107	99,905	0,005	2,006	0,000	0,008	0,000	0,000	1,855	0,000	0,089	0,017	0,000	0,002	3,982	0,85	4,55	94,60	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_17	0,095	52,630	0,000	0,210	0,000	0,000	42,714	0,000	3,666	0,109	0,000	0,165	99,588	0,005	2,000	0,000	0,008	0,000	0,000	1,804	0,000	0,157	0,008	0,000	0,004	3,986	0,41	7,97	91,62	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_18	0,084	52,720	0,000	0,232	0,004	0,000	42,801	0,033	3,785	0,117	0,006	0,145	99,925	0,004	1,997	0,000	0,009	0,000	0,000	1,803	0,001	0,161	0,009	0,000	0,003	3,989	0,44	8,18	91,37	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_19	0,058	53,569	0,000	0,217	0,008	0,000	42,550	0,005	3,078	0,127	0,017	0,120	99,748	0,003	2,023	0,000	0,009	0,000	0,000	1,786	0,000	0,131	0,010	0,001	0,003	3,966	0,49	6,79	92,71	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_20	0,068	53,604	0,000	0,211	0,000	0,000	42,748	0,002	3,047	0,143	0,000	0,066	99,888	0,003	2,022	0,000	0,008	0,000	0,000	1,793	0,000	0,129	0,011	0,000	0,001	3,968	0,55	6,70	92,75	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_21	0,079	54,015	0,000	0,255	0,015	0,000	42,045	0,018	3,107	0,213	0,001	0,044	99,792	0,004	2,033	0,000	0,010	0,001	0,000	1,759	0,001	0,132	0,016	0,000	0,001	3,956	0,83	6,90	92,26	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_22	0,081	53,759	0,000	0,210	0,026	0,000	42,684	0,000	2,968	0,183	0,006	0,002	99,918	0,004	2,025	0,000	0,008	0,001	0,000	1,788	0,000	0,126	0,014	0,000	0,000	3,966	0,71	6,53	92,76	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_23	0,073	51,493	0,000	0,255	0,000	0,072	40,405	0,000	5,885	0,182	0,000	0,266	98,631	0,004	1,980	0,000	0,010	0,000	0,003	1,728	0,000	0,255	0,014	0,000	0,006	4,000	0,69	12,75	86,42	0,14	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_24	0,062	52,998	0,000	0,277	0,000	0,000	44,855	0,020	1,706	0,143	0,013	0,055	100,129	0,003	2,002	0,000	0,011	0,000	0,000	1,884	0,001	0,073	0,011	0,001	0,001	3,987	0,54	3,69	95,77	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_25	0,037	52,980	0,001	0,279	0,005	0,000	44,648	0,010	2,041	0,170	0,000	0,053	100,224	0,002	2,001	0,000	0,011	0,000	0,000	1,875	0,000	0,087	0,013	0,000	0,001	3,990	0,64	4,40	94,96	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_26	0,072	52,037	0,000	0,460	0,013	0,927	46,147	0,005	0,677	0,030	0,000	0,000	100,366	0,004	1,969	0,000	0,019	0,001	0,035	1,942	0,000	0,029	0,002	0,000	0,000	4,000	0,11	1,44	96,71	1,75	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_27	0,092	53,457	0,000	0,216	0,000	0,000	42,757	0,016	3,490	0,102	0,000	0,105	100,235	0,005	2,013	0,000	0,009	0,000	0,000	1,790	0,001	0,148	0,008	0,000	0,002	3,975	0,39	7,61	92,00	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_28	0,096	53,409	0,000	0,239	0,000	0,000	44,555	0,014	1,724	0,205	0,021	0,024	100,286	0,005	2,010	0,000	0,010	0,000	0,000	1,864	0,001	0,073	0,015	0,001	0,001	3,979	0,78	3,74	95,48	0,00	0,00
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_29	0,079	53,491	0,000	0,264	0,010	0,000	44,643	0,000	1,781	0,168	0,002	0,036	100,474	0,004	2,010	0,000	0,011	0,000	0,000	1,865	0,000	0,075	0,013	0,000	0,001	3,979	0,64	3,86	95,50	0,00	0,00
Ortognaisse Cassiterita	FA13_01	0,033	51,121	0,000	0,164	0,000	2,164	40,382	0,018	5,489	0,129	0,006	0,162	99,666	0,002	1,948	0,000	0,007	0,000	0,082	1,711	0,001	0,236	0,010	0,000	0,004	4,000	0,48	11,55	83,92	4,05	0,00
Ortognaisse Cassiterita	FA13_02	0,089	51,362	0,000	0,186	0,017	1,602	40,838	0,039	5,343	0,100	0,021	0,174	99,771	0,004	1,955	0,000	0,008	0,001	0,061	1,728	0,002	0,229	0,008	0,001	0,004	4,000	0,37	11,30	85,31	3,01	0,00
Ortognaisse Cassiterita	FA13_03	0,065	52,516	0,010	0,230	0,000	0,000	41,631	0,000	5,276	0,056	0,001	0,247	100,031	0,003	1,990	0,001	0,009	0,000	0,000	1,754	0,000	0,225	0,004	0,000	0,006	3,993	0,21	11,35	88,41	0,00	0,03
Ortognaisse Cassiterita	FA13_04	0,088	52,620	0,000	0,211	0,000	0,000	41,543																								

Rocha encaixante	Amostra_ análise	Oxidos (% em peso)				Proporção atômica (12 oxigênios)										Membros finais (% mol. normalizado)							
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO / FeO _{tot}	Fe ₂ O ₃ / calc	MnO	MgO	CaO	Total (calc)	Si	Ti	Al	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Mg	Ca	Spessartina	Piropo	Almandina	Grossulária	Andradita
Metadiorito Brumado	FA02_01	36,6	0,0	21,5	9,9	0,0	31,6	0,0	0,3	100,0	3,00	0,00	2,08	0,68	0,00	2,19	0,00	0,03	75,6	0,0	23,4	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_02	36,9	0,0	21,5	10,8	0,0	30,4	0,0	0,4	100,0	3,01	0,00	2,07	0,74	0,00	2,10	0,00	0,04	73,1	0,0	25,7	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_03	36,6	0,0	21,6	9,8	0,0	31,5	0,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,08	0,67	0,00	2,18	0,00	0,04	75,5	0,0	23,1	1,5	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_04	37,0	0,0	21,3	7,7	0,0	33,8	0,0	0,2	100,0	3,02	0,00	2,05	0,53	0,00	2,34	0,00	0,02	81,1	0,0	18,2	0,7	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_05	36,6	0,0	21,8	6,6	1,3	34,5	0,0	0,5	101,3	2,99	0,00	2,09	0,45	0,00	2,38	0,00	0,04	82,8	0,0	15,7	1,5	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_07	36,6	0,0	21,6	10,0	0,0	31,3	0,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,08	0,68	0,00	2,17	0,00	0,05	74,9	0,0	23,5	1,6	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_08	36,9	0,0	21,6	7,4	1,8	33,8	0,0	0,2	101,8	3,01	0,00	2,08	0,51	0,00	2,34	0,00	0,02	81,6	0,0	17,7	0,7	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_09	36,5	0,0	21,5	9,3	1,4	32,3	0,0	0,5	101,4	2,99	0,00	2,07	0,63	0,00	2,24	0,00	0,04	76,8	0,0	21,8	1,4	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_10	36,7	0,0	21,4	10,8	1,3	30,6	0,0	0,4	101,3	3,00	0,00	2,06	0,74	0,00	2,12	0,00	0,04	73,2	0,0	25,5	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_11	37,2	0,0	21,2	10,9	2,1	30,2	0,0	0,5	102,1	3,03	0,00	2,04	0,74	0,00	2,09	0,00	0,04	72,7	0,0	25,8	1,5	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_12	36,5	0,0	21,4	11,2	1,0	30,4	0,0	0,4	101,0	2,99	0,00	2,07	0,77	0,00	2,11	0,00	0,04	72,4	0,0	26,4	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_14	36,5	0,0	21,4	11,9	0,9	29,9	0,0	0,3	100,9	2,99	0,00	2,07	0,81	0,00	2,07	0,00	0,03	71,0	0,0	27,9	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_15	36,3	0,0	21,6	8,6	1,5	33,1	0,0	0,4	101,5	2,98	0,00	2,08	0,59	0,00	2,30	0,00	0,03	78,8	0,0	20,1	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_16	36,9	0,0	21,4	9,5	0,5	31,8	0,0	0,4	100,5	3,01	0,00	2,06	0,65	0,00	2,20	0,00	0,04	76,2	0,0	22,5	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_17	36,6	0,0	21,5	11,0	0,1	30,6	0,0	0,3	100,1	3,00	0,00	2,07	0,75	0,00	2,12	0,00	0,02	73,3	0,0	25,9	0,8	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_18	36,6	0,0	21,4	10,8	0,0	30,9	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,06	0,74	0,00	2,14	0,00	0,03	73,6	0,0	25,3	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_19	36,8	0,0	21,4	10,6	0,0	30,9	0,0	0,4	100,0	3,01	0,00	2,06	0,72	0,00	2,14	0,00	0,03	74,0	0,0	24,9	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_20	36,7	0,0	21,4	12,0	0,0	29,4	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,06	0,82	0,00	2,04	0,00	0,04	70,4	0,0	28,3	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_21	36,7	0,0	21,6	7,2	0,0	34,1	0,0	0,4	100,0	2,99	0,00	2,08	0,49	0,00	2,36	0,00	0,04	81,8	0,0	17,0	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_22	36,6	0,0	21,5	8,2	0,0	33,3	0,0	0,3	100,0	3,00	0,00	2,07	0,56	0,00	2,31	0,00	0,03	79,6	0,0	19,3	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_23	36,6	0,0	21,3	11,0	0,0	30,7	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,05	0,75	0,00	2,13	0,00	0,04	72,9	0,0	25,8	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA02_24	36,5	0,0	21,4	9,8	0,0	31,8	0,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,07	0,67	0,00	2,21	0,00	0,04	75,6	0,0	23,0	1,4	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_01	36,7	0,0	21,3	26,0	0,0	15,7	0,0	0,3	100,0	3,01	0,00	2,06	1,78	0,00	1,09	0,00	0,02	37,7	0,0	61,5	0,8	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_02	37,0	0,0	21,2	25,9	0,0	15,6	0,0	0,3	100,0	3,03	0,00	2,05	1,77	0,00	1,08	0,00	0,03	37,5	0,0	61,5	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_03	36,9	0,0	21,5	25,7	0,0	15,5	0,0	0,3	100,0	3,02	0,00	2,07	1,75	0,00	1,08	0,00	0,03	37,7	0,0	61,4	0,9	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_04	37,1	0,0	21,6	25,5	0,0	15,5	0,0	0,3	100,0	3,03	0,00	2,07	1,74	0,00	1,07	0,00	0,03	37,8	0,0	61,2	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_05	36,8	0,0	21,6	25,9	0,0	15,4	0,0	0,3	100,0	3,01	0,00	2,08	1,77	0,00	1,07	0,00	0,03	37,2	0,0	61,7	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_06	36,8	0,0	21,1	26,1	0,0	15,6	0,0	0,4	100,0	3,02	0,00	2,04	1,79	0,00	1,08	0,00	0,03	37,2	0,0	61,7	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_07	36,5	0,0	21,5	25,7	0,0	16,1	0,0	0,3	100,0	2,99	0,00	2,08	1,76	0,00	1,11	0,00	0,02	38,4	0,0	60,7	0,9	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_08	36,7	0,0	21,5	25,9	0,0	15,7	0,0	0,3	100,0	3,00	0,00	2,07	1,77	0,00	1,09	0,00	0,02	37,7	0,0	61,5	0,8	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_09	36,7	0,0	21,2	26,0	0,0	15,8	0,0	0,3	100,0	3,01	0,00	2,05	1,78	0,00	1,10	0,00	0,03	37,8	0,0	61,3	0,9	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_10	36,6	0,0	21,2	25,7	0,0	16,2	0,0	0,3	100,0	3,00	0,00	2,06	1,77	0,00	1,12	0,00	0,02	38,6	0,0	60,6	0,8	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_11	36,9	0,0	21,1	25,9	0,0	15,8	0,0	0,3	100,0	3,02	0,00	2,04	1,78	0,00	1,10	0,00	0,03	37,8	0,0	61,3	0,9	0,0
Metadiorito Brumado	FA03_12	36,4	0,0	21,4	25,8	0,0	16,0	0,0	0,3	100,0	2,98	0,00	2,07	1,77	0,00	1,12	0,00	0,03	38,2	0,0	60,7	1,0	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_01	35,5	0,0	21,4	18,3	0,0	22,9	0,0	0,7	98,8	2,93	0,00	2,08	1,27	0,08	1,60	0,00	0,06	54,6	0,0	43,2	2,2	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_02	36,8	0,0	20,7	18,0	0,0	24,2	0,0	0,3	100,0	3,02	0,00	2,00	1,24	0,00	1,69	0,00	0,02	57,2	0,0	42,0	0,8	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_03	35,3	0,0	21,4	13,2	0,0	28,1	0,0	0,4	98,4	2,92	0,00	2,09	0,91	0,11	1,97	0,00	0,04	67,5	0,0	31,2	1,3	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_04	35,6	0,0	21,2	20,7	0,0	20,7	0,0	0,7	98,8	2,94	0,00	2,06	1,43	0,08	1,45	0,00	0,06	49,3	0,0	48,6	2,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_05	35,7	0,0	20,9	21,2	0,0	20,3	0,0	0,7	98,8	2,95	0,00	2,04	1,47	0,08	1,42	0,00	0,06	48,2	0,0	49,6	2,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_06	35,4	0,0	20,8	11,7	0,0	29,8	0,0	0,4	98,1	2,94	0,00	2,04	0,81	0,13	2,09	0,00	0,03	71,3	0,0	27,6	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_07	35,8	0,0	20,9	19,1	0,0	23,0	0,0	0,4	99,1	2,96	0,00	2,04	1,32	0,06	1,61	0,00	0,03	54,3	0,0	44,6	1,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_08	35,9	0,0	20,6	24,7	0,0	17,7	0,0	0,3	99,2	2,97	0,00	2,01	1,71	0,06	1,24	0,00	0,02	41,7	0,0	57,5	0,7	0,1
Metadiorito Brumado	FA06_09	35,7	0,0	20,6	20,9	0,0	20,7	0,0	0,7	98,6	2,96	0,00	2,02	1,45	0,10	1,45	0,00	0,06	49,1	0,0	48,9	1,5	0,5
Metadiorito Brumado	FA06_10	36,0	0,0	21,1	16,1	0,0	25,7	0,0	0,7	99,6	2,97	0,00	2,05	1,11	0,03	1,80	0,00	0,06	60,5	0,0	37,4	2,1	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_11	36,2	0,0	20,9	22,1	0,0	20,5	0,0	0,3	99,9	2,98	0,00	2,03	1,53	0,00	1,43	0,00	0,03	48,0	0,0	51,1	0,9	0,0
Metadiorito Brumado	FA06_12	37,1	0,0	21,9	12,9	0,0	27,7	0,0	0,4	100,0	3,02	0,00	2,10	0,88	0,00	1,91	0,00	0,03	67,7	0,0	31,2	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_01	36,8	0,0	21,4	19,7	0,0	21,7	0,0	0,4	100,0	3,01	0,00	2,06	1,35	0,00	1,50	0,00	0,04	52,0	0,0	46,7	1,3	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_02	37,0	0,0	21,3	21,6	0,0	19,7	0,0	0,5	100,0	3,02	0,00	2,05	1,48	0,00	1,36	0,00	0,04	47,3	0,0	51,2	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_03	36,8	0,0	21,4	20,1	0,0	21,2	0,0	0,5	100,0	3,01	0,00	2,06	1,37	0,00	1,47	0,00	0,04	50,8	0,0	47,7	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_04	37,0	0,0	21,6	21,8	0,0	19,2	0,0	0,5	100,0	3,02	0,00	2,07	1,49	0,00	1,33	0,00	0,04	46,5	0,0	52,1	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_05	36,8	0,0	21,7	22,6	0,0	17,7	0,8	0,4	100,0	3,00	0,00	2,08	1,54	0,00	1,22	0,09	0,04	42,2	3,2	53,3	1,3	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_06	36,8	0,0	21,5	21,0	0,0	20,0	0,0	0,6	100,0	3,01	0,00	2,07	1,43	0,00	1,39	0,00	0,05	48,2	0,0	49,9	1,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_07	37,3	0,0	21,5	20,0	0,0	20,8	0,0	0,5	100,0	3,04	0,00	2,06	1,36	0,00	1,43	0,00	0,04	50,5	0,0	48,0	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_08	37,1	0,0	21,6	22,3	0,0	18,6	0,0	0,4	100,0	3,02	0,00	2,08	1,52	0,00	1,28	0,00	0,04	45,1	0,0	53,5	1,4	0,0

Anexo VIII - Granada EDS.xlsx

Metagranitoide Ritápolis	FA05A_09	37,1	0,0	20,8	22,7	0,0	18,9	0,0	0,5	100,0	3,04	0,00	2,01	1,56	0,00	1,31	0,00	0,04	45,0	0,0	53,5	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_10	36,7	0,0	21,2	22,8	0,0	18,8	0,0	0,5	100,0	3,01	0,00	2,05	1,56	0,00	1,30	0,00	0,04	44,8	0,0	53,8	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_11	36,8	0,0	21,4	22,4	0,0	18,8	0,0	0,5	100,0	3,01	0,00	2,07	1,53	0,00	1,30	0,00	0,04	45,3	0,0	53,2	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_12	36,8	0,0	21,3	19,8	0,0	21,5	0,0	0,5	100,0	3,01	0,00	2,06	1,36	0,00	1,49	0,00	0,05	51,5	0,0	46,9	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_13	36,5	0,0	21,4	21,0	0,0	20,7	0,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,07	1,44	0,00	1,44	0,00	0,05	49,2	0,0	49,2	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_14	36,5	0,0	21,1	20,2	0,0	21,6	0,0	0,6	100,0	3,00	0,00	2,04	1,39	0,00	1,50	0,00	0,05	51,1	0,0	47,2	1,7	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_15	36,9	0,0	21,1	21,9	0,0	19,4	0,0	0,7	100,0	3,02	0,00	2,04	1,50	0,00	1,35	0,00	0,06	46,3	0,0	51,5	2,1	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05A_16	36,4	0,0	21,0	22,7	0,0	18,6	0,0	1,3	100,0	2,99	0,00	2,04	1,56	0,00	1,30	0,00	0,11	43,7	0,0	52,5	3,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_01	36,6	0,0	21,6	19,1	0,0	22,2	0,0	0,6	100,0	2,99	0,00	2,08	1,30	0,00	1,54	0,00	0,05	53,1	0,0	45,1	1,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_02	36,8	0,0	21,5	18,5	0,0	23,0	0,0	0,3	100,0	3,01	0,00	2,07	1,27	0,00	1,59	0,00	0,03	55,2	0,0	44,0	0,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_03	36,7	0,0	21,6	13,8	0,0	27,5	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,08	0,94	0,00	1,90	0,00	0,04	66,0	0,0	32,7	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_04	37,3	0,0	21,3	20,7	0,0	20,0	0,0	0,7	100,0	3,04	0,00	2,05	1,41	0,00	1,38	0,00	0,06	48,5	0,0	49,3	2,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_05	36,6	0,0	21,6	12,5	0,0	29,0	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,08	0,85	0,00	2,01	0,00	0,03	69,4	0,0	29,5	1,1	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_06	36,7	0,0	21,4	13,2	0,0	28,4	0,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,06	0,90	0,00	1,97	0,00	0,03	67,9	0,0	31,0	1,1	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_07	36,6	0,0	21,5	21,4	0,0	20,2	0,0	0,3	100,0	3,00	0,00	2,08	1,46	0,00	1,40	0,00	0,03	48,5	0,0	50,6	1,0	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_08	36,7	0,0	21,2	15,9	0,0	25,5	0,0	0,7	100,0	3,00	0,00	2,05	1,09	0,00	1,77	0,00	0,06	60,6	0,0	37,2	2,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_09	36,5	0,0	21,4	21,0	0,0	20,3	0,0	0,7	100,0	2,99	0,00	2,07	1,44	0,00	1,41	0,00	0,06	48,5	0,0	49,5	2,0	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_10	36,5	0,0	21,4	24,5	0,0	17,3	0,0	0,3	100,0	2,99	0,00	2,07	1,68	0,00	1,20	0,00	0,03	41,3	0,0	57,8	0,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA05B_12	36,7	0,0	21,6	21,0	0,0	20,0	0,0	0,6	100,0	3,00	0,00	2,08	1,44	0,00	1,39	0,00	0,06	48,2	0,0	49,9	1,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_01	36,9	0,0	21,9	27,4	0,0	12,1	1,2	0,5	100,0	2,99	0,00	2,09	1,86	0,00	0,83	0,14	0,05	28,8	4,9	64,6	1,7	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_02	36,6	0,0	21,6	28,6	0,0	11,7	1,0	0,5	100,0	2,98	0,00	2,07	1,95	0,00	0,81	0,12	0,05	27,7	4,1	66,6	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_03	37,1	0,0	21,7	27,8	0,0	11,8	0,9	0,6	100,0	3,01	0,00	2,07	1,89	0,00	0,81	0,11	0,05	28,4	3,9	65,9	1,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_04	36,9	0,0	21,9	28,3	0,0	11,7	0,9	0,4	100,0	2,99	0,00	2,09	1,92	0,00	0,80	0,11	0,03	28,0	3,8	67,0	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_05	36,8	0,0	21,8	27,9	0,0	12,0	1,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,09	1,90	0,00	0,82	0,12	0,04	28,5	4,3	65,7	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_06	37,1	0,0	21,7	28,3	0,0	11,4	1,0	0,4	100,0	3,01	0,00	2,08	1,92	0,00	0,78	0,12	0,04	27,4	4,1	67,1	1,3	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_07	36,6	0,0	21,8	28,0	0,0	12,1	0,9	0,6	100,0	2,98	0,00	2,09	1,91	0,00	0,83	0,10	0,05	28,8	3,6	65,9	1,7	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_08	36,7	0,0	21,5	28,9	0,0	11,2	1,1	0,5	100,0	2,99	0,00	2,06	1,97	0,00	0,77	0,14	0,05	26,4	4,7	67,3	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_09	36,5	0,0	21,8	28,6	0,0	11,6	1,1	0,4	100,0	2,97	0,00	2,09	1,95	0,00	0,80	0,13	0,04	27,5	4,4	66,8	1,3	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_10	36,5	0,0	21,7	28,7	0,0	11,5	1,0	0,6	100,0	2,97	0,00	2,08	1,96	0,00	0,80	0,12	0,05	27,2	4,1	66,9	1,7	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_11	36,6	0,0	21,8	27,8	0,0	12,0	1,1	0,7	100,0	2,98	0,00	2,09	1,89	0,00	0,83	0,13	0,06	28,5	4,5	64,9	2,1	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_12	36,5	0,0	21,7	27,8	0,0	12,3	1,2	0,6	100,0	2,97	0,00	2,08	1,89	0,00	0,85	0,14	0,06	28,9	4,8	64,4	1,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_13	36,5	0,0	21,7	29,4	0,0	10,7	1,2	0,5	100,0	2,97	0,00	2,08	2,01	0,00	0,74	0,14	0,04	25,2	4,8	68,5	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_14	36,7	0,0	21,6	28,5	0,0	11,7	1,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,07	1,94	0,00	0,81	0,13	0,04	27,7	4,4	66,6	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_15	36,8	0,0	21,4	28,3	0,0	11,9	1,0	0,6	100,0	3,00	0,00	2,06	1,93	0,00	0,82	0,12	0,05	28,1	4,0	66,2	1,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_16	37,0	0,0	21,6	27,7	0,0	12,1	1,1	0,5	100,0	3,00	0,00	2,07	1,88	0,00	0,83	0,13	0,05	28,8	4,5	65,1	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_17	36,8	0,0	21,8	27,4	0,0	12,2	1,1	0,6	100,0	2,99	0,00	2,09	1,86	0,00	0,84	0,13	0,06	29,1	4,6	64,5	1,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_18	37,0	0,0	21,8	28,8	0,0	11,0	1,0	0,4	100,0	3,00	0,00	2,09	1,96	0,00	0,75	0,13	0,03	26,2	4,4	68,2	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA07_19	37,0	0,0	21,6	27,8	0,0	12,0	1,1	0,6	100,0	3,00	0,00	2,07	1,88	0,00	0,83	0,13	0,05	28,6	4,4	65,2	1,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_01	36,8	0,0	21,5	27,7	0,0	12,4	1,0	0,5	100,0	2,99	0,00	2,06	1,89	0,00	0,86	0,12	0,05	29,4	4,3	64,8	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_02	36,9	0,0	22,0	28,5	0,0	11,0	1,1	0,5	100,0	2,99	0,00	2,10	1,93	0,00	0,76	0,13	0,04	26,5	4,6	67,5	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_03	37,1	0,0	21,8	27,4	0,0	12,0	1,2	0,6	100,0	3,01	0,00	2,08	1,85	0,00	0,82	0,15	0,05	28,6	5,1	64,6	1,8	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_04	37,1	0,0	21,9	27,9	0,0	11,4	1,2	0,4	100,0	3,00	0,00	2,09	1,89	0,00	0,78	0,15	0,03	27,4	5,2	66,2	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_05	37,0	0,0	21,9	28,3	0,0	11,4	1,1	0,4	100,0	3,00	0,00	2,09	1,92	0,00	0,79	0,13	0,03	27,4	4,6	66,9	1,1	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_06	36,7	0,0	21,6	28,7	0,0	11,4	1,1	0,5	100,0	2,99	0,00	2,07	1,96	0,00	0,78	0,14	0,04	26,9	4,7	67,0	1,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_07	36,5	0,0	22,0	27,9	0,0	11,9	1,2	0,5	100,0	2,97	0,00	2,10	1,90	0,00	0,82	0,15	0,05	28,1	5,2	65,1	1,6	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_08	36,8	0,0	21,5	28,9	0,0	11,2	1,1	0,5	100,0	3,00	0,00	2,06	1,97	0,00	0,77	0,13	0,04	26,6	4,6	67,5	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_09	36,6	0,0	21,9	28,9	0,0	11,0	1,1	0,5	100,0	2,98	0,00	2,10	1,96	0,00	0,76	0,14	0,04	26,1	4,7	67,8	1,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_10	36,6	0,0	21,5	28,4	0,0	12,0	1,1	0,4	100,0	2,99	0,00	2,07	1,94	0,00	0,83	0,13	0,03	28,3	4,5	66,0	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_11	36,7	0,0	21,4	28,9	0,0	11,7	0,9	0,4	100,0	3,00	0,00	2,05	1,97	0,00	0,81	0,11	0,04	27,6	3,9	67,3	1,3	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_12	36,5	0,0	21,4	28,9	0,0	11,7	0,9	0,6	100,0	2,98	0,00	2,06	1,97	0,00	0,81	0,11	0,06	27,4	3,8	66,9	1,9	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_13	36,8	0,0	21,7	28,2	0,0	11,8	1,1	0,3	100,0	2,99	0,00	2,08	1,91	0,00	0,81	0,14	0,03	28,1	4,8	66,1	1,0	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08A_14	36,6	0,0	21,6	28,7	0,0	11,7	1,0	0,4	100,0	2,98	0,00	2,07	1,96	0,00	0,80	0,13	0,03	27,5	4,3	67,0	1,2	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08B_01	37,4	0,0	21,4	1,5	0,0	33,8	0,0	5,9	100,0	3,02	0,00	2,03	0,10	0,00	2,31	0,00	0,51	79,0	0,0	3,6	17,4	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08B_02	37,5	0,3	21,2	1,7	0,0	33,7	0,0	5,5	100,0	3,02	0,02	2,02	0,12	0,00	2,30	0,00	0,48	79,5	0,0	4,0	16,5	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08B_03	37,7	0,3	21,6	8,6	0,0	22,5	1,4	7,9	100,0	3,00	0,02	2,02	0,58	0,00	1,51	0,17	0,67	51,7	5,7	19,6	23,0	0,0
Metagranitoide Ritápolis	FA08B_04	37,7	0,0	21,8	7,3	0,0	24,4	2,4	6,3	100,0	2,99	0,00	2,04</										

Anexo VIII - Granada EDS.xlsx

Metagranitoide Ritápolis	FA08B_06	37,7	0,0	22,1	8,0	0,0	19,9	1,7	10,5	100,0	2,98	0,00	2,06	0,53	0,00	1,33	0,20	0,89	45,1	6,9	17,8	30,2	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_01	36,9	0,0	21,7	24,4	0,0	15,9	0,8	0,3	100,0	3,00	0,00	2,08	1,66	0,00	1,10	0,09	0,03	38,1	3,2	57,7	1,0	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_02	36,6	0,0	21,9	23,5	0,0	16,7	0,8	0,7	100,0	2,98	0,00	2,10	1,60	0,00	1,15	0,09	0,06	39,7	3,2	55,1	2,0	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_03	37,0	0,0	21,7	22,1	0,0	18,3	0,7	0,3	100,0	3,01	0,00	2,08	1,50	0,00	1,26	0,09	0,02	43,9	3,0	52,3	0,8	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_04	37,1	0,0	21,3	22,3	0,0	19,1	0,0	0,2	100,0	3,03	0,00	2,05	1,52	0,00	1,32	0,00	0,02	46,2	0,0	53,1	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_05	36,8	0,0	21,9	22,9	0,0	17,3	1,0	0,2	100,0	2,99	0,00	2,10	1,55	0,00	1,19	0,12	0,02	41,3	4,2	54,0	0,5	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_06	36,6	0,0	21,7	22,3	0,0	18,5	0,6	0,2	100,0	2,99	0,00	2,09	1,52	0,00	1,28	0,07	0,02	44,3	2,5	52,6	0,6	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_07	36,9	0,0	21,8	23,1	0,0	17,2	0,7	0,4	100,0	3,00	0,00	2,09	1,57	0,00	1,18	0,09	0,03	41,2	3,1	54,6	1,1	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_08	37,1	0,0	21,9	24,5	0,0	15,0	1,2	0,2	100,0	3,00	0,00	2,09	1,66	0,00	1,03	0,15	0,02	36,1	5,3	58,0	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_09	36,5	0,0	21,6	24,9	0,0	15,7	0,8	0,5	100,0	2,98	0,00	2,08	1,70	0,00	1,09	0,10	0,05	37,1	3,5	57,9	1,6	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_10	36,6	0,0	21,6	24,9	0,0	16,0	0,6	0,4	100,0	2,99	0,00	2,08	1,70	0,00	1,11	0,07	0,03	38,0	2,5	58,4	1,1	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_11	36,7	0,0	21,7	25,5	0,0	14,6	1,2	0,4	100,0	2,98	0,00	2,08	1,74	0,00	1,00	0,15	0,03	34,3	5,2	59,4	1,1	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_12	36,6	0,0	21,6	22,4	0,0	18,3	0,7	0,5	100,0	2,99	0,00	2,08	1,53	0,00	1,26	0,08	0,04	43,4	2,8	52,5	1,4	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA09_13	36,8	0,0	21,8	25,3	0,0	14,9	0,9	0,3	100,0	2,99	0,00	2,09	1,72	0,00	1,03	0,11	0,02	35,6	3,9	59,7	0,8	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_01	37,0	0,0	22,0	33,4	0,0	6,1	1,3	0,2	100,0	3,00	0,00	2,10	2,26	0,00	0,42	0,15	0,02	14,7	5,3	79,3	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_02	37,2	0,0	21,6	23,3	0,0	17,7	0,0	0,2	100,0	3,03	0,00	2,07	1,59	0,00	1,22	0,00	0,02	43,2	0,0	56,2	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_03	37,0	0,0	21,5	22,7	0,0	18,5	0,0	0,3	100,0	3,02	0,00	2,07	1,55	0,00	1,28	0,00	0,03	44,8	0,0	54,3	0,9	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_04	36,6	0,0	21,5	26,5	0,0	15,2	0,0	0,2	100,0	3,00	0,00	2,08	1,81	0,00	1,05	0,00	0,02	36,5	0,0	62,8	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_05	37,1	0,0	21,6	27,7	0,0	12,9	0,5	0,2	100,0	3,02	0,00	2,07	1,88	0,00	0,89	0,06	0,02	31,2	2,0	66,1	0,7	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_06	37,0	0,0	21,7	19,1	0,0	22,0	0,0	0,2	100,0	3,01	0,00	2,09	1,30	0,00	1,52	0,00	0,02	53,4	0,0	45,8	0,8	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_07	36,4	0,0	21,4	21,8	0,0	20,0	0,0	0,4	100,0	2,98	0,00	2,07	1,49	0,00	1,39	0,00	0,04	47,6	0,0	51,1	1,4	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_08	36,5	0,0	21,6	22,7	0,0	18,9	0,0	0,3	100,0	2,99	0,00	2,08	1,56	0,00	1,31	0,00	0,03	45,3	0,0	53,8	0,9	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_10	36,3	0,0	21,4	22,5	0,0	19,6	0,0	0,3	100,0	2,98	0,00	2,07	1,54	0,00	1,36	0,00	0,03	46,5	0,0	52,6	0,9	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_11	36,8	0,0	22,0	33,9	0,0	6,3	0,8	0,3	100,0	2,99	0,00	2,11	2,30	0,00	0,44	0,10	0,02	15,2	3,3	80,6	0,9	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10A_12	36,7	0,0	21,2	26,5	0,0	15,3	0,0	0,3	100,0	3,01	0,00	2,05	1,81	0,00	1,07	0,00	0,03	36,7	0,0	62,4	1,0	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_01	36,7	0,0	21,6	5,1	0,0	36,3	0,0	0,2	100,0	3,00	0,00	2,08	0,35	0,00	2,51	0,00	0,02	87,2	0,0	12,2	0,6	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_02	37,4	0,0	22,1	6,6	0,0	28,6	2,9	2,4	100,0	2,98	0,00	2,07	0,44	0,00	1,93	0,35	0,20	66,1	11,9	15,0	7,0	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_03	36,1	0,0	21,8	2,3	0,0	38,8	0,0	1,0	100,0	2,96	0,00	2,10	0,16	0,00	2,69	0,00	0,09	91,6	0,0	5,3	3,1	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_04	36,4	0,0	21,7	8,4	0,0	33,5	0,0	0,0	100,0	2,98	0,00	2,09	0,58	0,00	2,33	0,00	0,00	80,1	0,0	19,9	0,0	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_05	36,7	0,0	21,5	4,0	0,0	34,5	0,0	3,2	100,0	2,98	0,00	2,06	0,27	0,00	2,38	0,00	0,28	81,0	0,0	9,4	9,6	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_06	36,1	0,0	21,7	1,5	0,0	39,5	0,0	1,1	100,0	2,96	0,00	2,10	0,11	0,00	2,74	0,00	0,10	93,2	0,0	3,6	3,3	0,0
Filito da SMVS Rio das Mortes	FA10B_07	37,0	0,0	21,7	7,6	0,0	32,2	0,0	1,5	100,0	3,01	0,00	2,08	0,52	0,00	2,22	0,00	0,13	77,3	0,0	18,1	4,6	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_01	36,6	0,0	21,8	31,0	0,0	9,7	0,9	0,0	100,0	2,98	0,00	2,10	2,11	0,00	0,67	0,11	0,00	23,2	3,8	73,0	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_02	36,9	0,0	21,8	30,3	0,0	10,0	1,0	0,0	100,0	3,00	0,00	2,09	2,06	0,00	0,69	0,12	0,00	24,1	4,1	71,9	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_03	36,8	0,0	21,9	30,5	0,0	9,7	1,0	0,0	100,0	2,99	0,00	2,09	2,07	0,00	0,67	0,13	0,00	23,3	4,4	72,3	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_04	36,7	0,0	21,7	31,0	0,0	9,9	0,8	0,0	100,0	2,99	0,00	2,09	2,11	0,00	0,68	0,09	0,00	23,6	3,2	73,1	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_06	36,7	0,0	21,6	31,1	0,0	9,4	0,9	0,3	100,0	2,99	0,00	2,08	2,12	0,00	0,65	0,11	0,02	22,4	3,7	73,1	0,8	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_07	36,8	0,0	21,6	30,3	0,0	10,0	1,1	0,2	100,0	2,99	0,00	2,08	2,07	0,00	0,69	0,13	0,02	23,8	4,4	71,2	0,7	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_08	36,9	0,0	21,5	30,6	0,0	9,8	0,9	0,2	100,0	3,01	0,00	2,07	2,09	0,00	0,68	0,11	0,02	23,4	3,8	72,2	0,7	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_09	36,7	0,0	21,5	30,5	0,0	10,4	0,8	0,0	100,0	3,00	0,00	2,07	2,08	0,00	0,72	0,10	0,00	24,7	3,5	71,7	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_10	36,4	0,0	21,9	30,9	0,0	10,0	0,9	0,0	100,0	2,97	0,00	2,10	2,11	0,00	0,69	0,11	0,00	23,7	3,9	72,4	0,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_11	36,5	0,0	21,6	30,8	0,0	9,8	1,1	0,2	100,0	2,98	0,00	2,07	2,10	0,00	0,68	0,13	0,02	23,2	4,4	71,8	0,5	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA11_12	36,7	0,0	21,7	30,8	0,0	9,8	0,8	0,2	100,0	2,99	0,00	2,09	2,10	0,00	0,68	0,10	0,01	23,5	3,5	72,5	0,5	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_01	36,6	0,0	21,5	28,7	0,0	12,1	0,6	0,6	100,0	2,99	0,00	2,07	1,96	0,00	0,84	0,07	0,05	28,6	2,5	67,2	1,7	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_02	37,1	0,0	21,6	28,1	0,0	12,0	0,8	0,4	100,0	3,02	0,00	2,07	1,91	0,00	0,82	0,10	0,04	28,7	3,4	66,6	1,3	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_03	37,1	0,0	21,7	27,8	0,0	12,2	0,7	0,5	100,0	3,02	0,00	2,07	1,89	0,00	0,84	0,08	0,04	29,3	3,0	66,2	1,6	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_04	36,6	0,0	21,5	29,0	0,0	11,5	1,0	0,4	100,0	2,99	0,00	2,07	1,98	0,00	0,80	0,12	0,03	27,2	4,0	67,7	1,1	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_05	36,9	0,0	21,7	27,6	0,0	12,5	0,8	0,4	100,0	3,00	0,00	2,08	1,88	0,00	0,86	0,10	0,04	30,0	3,4	65,4	1,3	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_06	37,0	0,0	21,6	28,1	0,0	11,9	0,9	0,5	100,0	3,01	0,00	2,07	1,91	0,00	0,82	0,11	0,04	28,4	4,0	66,2	1,4	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_07	36,9	0,0	21,9	28,2	0,0	11,9	0,7	0,4	100,0	3,00	0,00	2,10	1,92	0,00	0,82	0,09	0,04	28,6	3,1	67,0	1,3	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_08	37,0	0,0	21,8	27,6	0,0	12,3	0,9	0,3	100,0	3,01	0,00	2,09	1,87	0,00	0,85	0,11	0,03	29,7	3,7	65,6	1,0	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_10	36,9	0,0	21,7	28,5	0,0	11,8	0,8	0,5	100,0	3,00	0,00	2,08	1,94	0,00	0,81	0,09	0,04	28,1	3,2	67,2	1,5	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_11	36,7	0,0	21,7	28,3	0,0	12,2	0,7	0,4	100,0	2,99	0,00	2,08	1,93	0,00	0,84	0,09	0,04	29,1	3,1	66,5	1,3	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_12	36,9	0,0	21,6	28,2	0,0	12,1	0,9	0,4	100,0	3,00	0,00	2,07	1,92	0,00	0,84	0,10	0,03	28,9	3,6	66,4	1,1	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_13	36,5	0,0	21,2	28,9	0,0	12,2	0,7	0,5	100,0	2,99	0,00	2,05	1,98	0,00	0,84	0,09	0,04	28,5	3,1	67,0	1,4	0,0
Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_14	36,8	0,0	21,3	28,3	0,0	12,3</																

Anexo VIII - Granada EDS.xlsx

Anfibolito da SMVS Rio das Mortes	FA12_16	36,7	0,0	21,6	29,0	0,0	11,6	0,7	0,4	100,0	2,99	0,00	2,07	1,98	0,00	0,80	0,09	0,03	27,7	3,0	68,2	1,2	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_01	37,3	0,0	21,3	17,6	0,0	21,6	1,1	1,1	100,0	3,02	0,00	2,04	1,19	0,00	1,48	0,13	0,10	51,1	4,6	41,0	3,3	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_02	37,3	0,0	21,0	17,3	0,0	22,0	0,9	1,4	100,0	3,03	0,00	2,01	1,18	0,00	1,51	0,11	0,12	51,8	3,7	40,3	4,2	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_03	37,0	0,0	21,3	18,0	0,0	21,5	1,0	1,2	100,0	3,01	0,00	2,04	1,22	0,00	1,48	0,12	0,10	50,5	4,2	41,7	3,6	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_04	36,8	0,0	21,0	17,9	0,0	22,0	1,1	1,2	100,0	3,00	0,00	2,02	1,22	0,00	1,52	0,13	0,11	51,1	4,3	41,0	3,6	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_05	36,9	0,0	20,9	19,5	0,0	20,4	1,3	1,0	100,0	3,01	0,00	2,01	1,33	0,00	1,40	0,16	0,09	47,2	5,2	44,6	3,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_06	36,8	0,0	21,3	19,1	0,0	19,7	1,4	1,7	100,0	2,99	0,00	2,03	1,30	0,00	1,36	0,17	0,15	45,7	5,7	43,7	5,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_07	37,3	0,0	21,2	18,8	0,0	20,2	1,3	1,2	100,0	3,02	0,00	2,02	1,28	0,00	1,39	0,16	0,11	47,4	5,3	43,6	3,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_08	37,3	0,0	21,2	19,1	0,0	19,9	1,2	1,2	100,0	3,02	0,00	2,03	1,30	0,00	1,36	0,15	0,10	46,9	5,0	44,5	3,5	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_09	36,9	0,0	21,3	18,6	0,0	20,4	1,3	1,6	100,0	3,00	0,00	2,04	1,26	0,00	1,40	0,15	0,14	47,5	5,2	42,7	4,6	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_10	37,2	0,0	20,6	16,4	0,0	23,9	0,8	1,1	100,0	3,03	0,00	1,98	1,12	0,00	1,65	0,10	0,09	55,7	3,4	37,7	3,2	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_11	37,0	0,0	21,1	17,8	0,0	21,7	1,1	1,4	100,0	3,01	0,00	2,02	1,21	0,00	1,50	0,13	0,12	50,7	4,3	40,9	4,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_12	37,0	0,0	21,1	17,7	0,0	21,9	1,1	1,2	100,0	3,01	0,00	2,03	1,20	0,00	1,50	0,13	0,11	51,1	4,5	40,8	3,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_13	36,7	0,0	21,3	18,8	0,0	20,6	1,2	1,4	100,0	2,98	0,00	2,04	1,28	0,00	1,42	0,15	0,12	47,9	5,0	43,0	4,1	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_14	36,8	0,0	20,9	19,2	0,0	20,0	1,3	1,7	100,0	3,00	0,00	2,00	1,31	0,00	1,38	0,16	0,15	45,9	5,3	43,6	5,1	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_15	36,7	0,0	21,1	19,0	0,0	20,3	1,3	1,5	100,0	2,99	0,00	2,02	1,30	0,00	1,40	0,16	0,13	46,9	5,4	43,4	4,3	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_16	37,0	0,0	20,8	17,5	0,0	22,4	1,1	1,3	100,0	3,02	0,00	2,00	1,19	0,00	1,55	0,13	0,11	51,9	4,3	40,0	3,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_17	36,8	0,0	21,4	18,5	0,0	19,9	1,3	2,1	100,0	2,98	0,00	2,05	1,26	0,00	1,37	0,16	0,18	46,2	5,2	42,4	6,2	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA13_18	36,8	0,0	20,7	16,7	0,0	23,9	0,8	1,0	100,0	3,01	0,00	2,00	1,14	0,00	1,65	0,10	0,09	55,5	3,4	38,2	3,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_01	36,9	0,0	21,0	18,7	0,0	19,8	1,2	2,4	100,0	3,00	0,00	2,01	1,27	0,00	1,36	0,14	0,21	45,6	4,8	42,6	7,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_02	36,8	0,0	21,2	18,9	0,0	19,6	1,2	2,4	100,0	2,99	0,00	2,02	1,28	0,00	1,35	0,15	0,20	45,3	4,9	42,9	6,9	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_03	37,0	0,0	21,4	18,6	0,0	19,4	1,3	2,3	100,0	3,00	0,00	2,04	1,26	0,00	1,33	0,15	0,20	45,2	5,2	42,9	6,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_04	37,2	0,0	21,5	18,8	0,0	19,1	1,0	2,4	100,0	3,01	0,00	2,05	1,27	0,00	1,31	0,12	0,21	44,9	4,2	43,6	7,3	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_05	37,2	0,0	21,1	19,0	0,0	20,3	1,3	1,2	100,0	3,02	0,00	2,01	1,29	0,00	1,39	0,15	0,11	47,4	5,3	43,8	3,6	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_06	36,9	0,0	21,5	18,6	0,0	19,9	1,2	1,8	100,0	2,99	0,00	2,05	1,26	0,00	1,37	0,15	0,16	46,6	5,0	43,0	5,3	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_07	37,2	0,0	21,1	18,4	0,0	19,7	1,2	2,4	100,0	3,01	0,00	2,01	1,25	0,00	1,35	0,15	0,21	45,7	5,0	42,3	7,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_08	36,9	0,0	21,6	18,3	0,0	20,0	1,4	1,8	100,0	2,99	0,00	2,06	1,24	0,00	1,37	0,17	0,16	46,7	5,8	42,1	5,4	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_09	37,4	0,0	21,0	17,7	0,0	21,5	1,1	1,4	100,0	3,03	0,00	2,01	1,20	0,00	1,48	0,13	0,12	50,5	4,4	41,0	4,1	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_10	37,0	0,0	21,1	18,8	0,0	19,4	1,2	2,4	100,0	3,00	0,00	2,02	1,28	0,00	1,33	0,15	0,21	44,8	5,0	43,0	7,2	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_11	37,2	0,0	21,1	19,1	0,0	20,1	1,1	1,4	100,0	3,02	0,00	2,02	1,30	0,00	1,38	0,14	0,12	47,0	4,7	44,3	4,0	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_12	37,1	0,0	21,0	18,7	0,0	19,7	1,2	2,3	100,0	3,01	0,00	2,01	1,26	0,00	1,35	0,15	0,20	45,7	5,0	42,6	6,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_13	37,0	0,0	20,9	19,5	0,0	20,1	1,1	1,4	100,0	3,01	0,00	2,01	1,33	0,00	1,38	0,14	0,12	46,6	4,6	44,6	4,1	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_14	36,6	0,0	21,7	18,8	0,0	19,9	1,1	1,9	100,0	2,97	0,00	2,07	1,28	0,00	1,37	0,14	0,16	46,5	4,7	43,3	5,6	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_15	36,8	0,0	21,5	18,4	0,0	20,3	1,2	1,9	100,0	2,99	0,00	2,05	1,25	0,00	1,39	0,14	0,17	47,2	4,8	42,3	5,7	0,0
Ortognaisse Cassiterita	FA14_16	36,8	0,0	21,7	18,6	0,0	19,7	1,3	1,8	100,0	2,98	0,00	2,07	1,26	0,00	1,35	0,16	0,16	46,1	5,5	43,0	5,4	0,0

Rocha hospedeira	Amostra_analise	Óxidos (% em peso)																Proporção atômica (4 oxigênios)																Membros finais (proporção molar)									
		SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Y ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	PbO	ThO ₂	UO ₂	Total	Si	P	Ca	Y	Nd	Sm	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Th	U	Soma	(Th,U,Pb)SiO ₄	Ca(Th,U,Pb)(PO ₄) ₂	(La-Gd)PO ₄	(Tb-Lu)PO ₄	YPO ₄	
Metadiorito Brumado	FA03_01	0,3	37,4	0,0	55,6	0,0	0,0	2,0	0,4	2,9	0,2	0,8	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	100,3	0,01	1,00	0,00	0,93	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,05	0,93	
Metadiorito Brumado	FA03_02	0,2	36,5	0,0	48,1	0,0	1,6	4,4	1,2	5,5	0,4	1,2	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	100,5	0,01	1,00	0,00	0,83	0,00	0,02	0,05	0,01	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,07	0,10	0,83	
Metadiorito Brumado	FA03_03	0,3	36,5	0,0	49,3	0,0	1,1	3,2	0,8	4,6	0,4	1,6	0,2	2,4	0,3	0,0	0,0	0,0	100,7	0,01	1,00	0,00	0,85	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,05	0,11	0,85	
Metadiorito Brumado	FA03_04	0,7	36,1	0,0	48,5	0,3	1,3	3,2	0,9	4,7	0,6	1,5	0,1	2,1	0,2	0,0	0,0	0,5	100,7	0,02	1,00	0,00	0,84	0,00	0,01	0,04	0,01	0,05	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,00	0,00	0,05	0,10	0,84	
Metadiorito Brumado	FA03_05	0,2	36,4	0,0	48,0	0,3	1,6	3,9	1,1	5,5	0,4	1,3	0,0	1,4	0,1	0,0	0,0	0,3	100,5	0,01	1,00	0,00	0,83	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,06	0,10	0,83
Metadiorito Brumado	FA03_06	0,9	36,2	0,0	47,5	0,0	1,2	3,1	1,1	5,1	0,7	1,7	0,2	2,4	0,2	0,0	0,5	0,0	100,8	0,03	1,00	0,00	0,83	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	0,00	0,00	0,05	0,12	0,83	
Metadiorito Brumado	FA03_07	0,4	36,2	0,0	48,4	0,2	1,2	3,1	0,9	4,7	0,5	1,5	0,2	2,8	0,3	0,0	0,0	0,2	100,8	0,01	1,00	0,00	0,84	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,05	0,11	0,84	
Metadiorito Brumado	FA03_08	0,4	36,4	0,0	48,9	0,2	1,2	3,6	1,1	5,3	0,5	1,3	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,3	100,5	0,01	1,00	0,00	0,84	0,00	0,01	0,04	0,01	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,05	0,10	0,85	
Metadiorito Brumado	FA03_09	0,7	36,2	0,0	48,1	0,2	1,4	3,8	1,2	5,4	0,5	1,2	0,0	1,4	0,0	0,0	0,1	0,3	100,5	0,02	1,00	0,00	0,83	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,00	0,00	0,06	0,10	0,84	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_01	0,7	35,7	0,0	45,0	0,3	1,4	3,5	1,0	5,4	0,5	1,6	0,2	2,6	0,3	0,6	0,6	1,6	100,8	0,02	1,00	0,00	0,79	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	2,02	0,02	0,00	0,06	0,12	0,80	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_02	0,8	36,4	0,0	46,5	0,3	1,3	3,9	1,3	5,8	0,6	1,3	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,9	100,6	0,03	1,01	0,00	0,81	0,00	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	2,02	0,01	0,00	0,06	0,11	0,82	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_03	0,9	35,7	0,0	45,2	0,3	1,2	3,4	1,2	5,5	0,5	1,4	0,0	2,1	0,0	1,1	0,8	1,1	100,7	0,03	1,00	0,00	0,80	0,00	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	2,03	0,02	0,00	0,06	0,11	0,80	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_04	0,8	36,4	0,0	46,9	0,3	1,0	3,3	1,1	5,6	0,7	1,5	0,0	2,1	0,0	0,0	0,5	0,6	100,7	0,03	1,01	0,00	0,82	0,00	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,05	0,11	0,83	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_05	0,8	35,6	0,0	46,5	0,0	1,1	3,1	0,8	5,5	0,6	1,7	0,0	1,7	0,0	0,1	1,2	1,9	100,6	0,03	1,00	0,00	0,82	0,00	0,01	0,03	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	2,02	0,02	0,00	0,05	0,11	0,82	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_06	1,0	35,6	0,1	45,6	0,4	1,1	3,2	1,1	5,5	0,6	1,6	0,0	1,9	0,0	0,8	0,9	1,3	100,7	0,03	1,00	0,00	0,81	0,00	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	2,03	0,02	0,00	0,05	0,11	0,81	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_07	0,8	36,1	0,0	46,3	0,3	1,4	3,7	1,2	5,9	0,7	1,6	0,0	2,0	0,0	0,0	0,3	0,5	100,7	0,03	1,00	0,00	0,81	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,06	0,12	0,81	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_08	0,3	36,5	0,0	46,1	0,3	1,3	3,1	1,1	5,5	0,9	1,7	0,2	2,8	0,4	0,0	0,0	0,6	100,9	0,01	1,01	0,00	0,80	0,00	0,01	0,03	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,05	0,13	0,81	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_09	1,0	35,9	0,1	44,7	0,4	1,4	3,7	1,2	5,4	0,6	1,5	0,0	2,4	0,0	0,3	0,5	1,5	100,7	0,03	1,00	0,01	0,79	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	2,03	0,02	0,00	0,06	0,12	0,80	
Metagranitoide Ritapolis	FA05_10	0,4	36,5	0,0	46,2	0,4	1,5	3,4	1,1	5,8	0,7	1,7	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,6	100,8	0,01	1,01	0,00	0,80	0,00	0,02	0,04	0,01	0,06	0,01														

Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_11	0,7	35,7	0,0	47,1	0,3	1,0	2,6	0,7	4,5	0,8	2,7	0,3	2,3	0,3	0,0	1,4	0,5	100,9	0,02	1,00	0,00	0,82	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	2,02	0,01	0,00	0,04	0,12	0,82	
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_12	0,4	36,3	0,0	46,4	0,3	1,1	2,8	0,8	5,0	1,0	2,9	0,4	2,7	0,2	0,0	0,5	0,2	101,0	0,01	1,00	0,00	0,81	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,05	0,14	0,81
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_13	0,9	36,0	0,0	47,8	0,4	0,9	2,5	0,7	4,6	1,0	2,8	0,2	2,3	0,0	0,0	0,6	0,2	100,9	0,03	1,00	0,00	0,83	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	0,01	0,00	0,04	0,12	0,83
Anfibolitos da SMVS Rio das Mortes	FA12_14	0,4	36,4	0,0	47,0	0,4	1,0	2,8	0,8	4,9	1,1	3,0	0,3	2,3	0,0	0,0	0,5	0,2	100,9	0,01	1,00	0,00	0,81	0,00	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,05	0,13	0,82
Ortoganisse Cassiterita	FA13_01	1,4	36,1	0,0	48,0	0,0	0,0	1,4	0,6	3,9	1,2	3,5	0,2	3,1	0,3	0,0	0,7	0,6	101,1	0,05	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	2,04	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_02	0,4	36,9	0,0	49,6	0,0	0,5	1,5	0,5	3,6	0,9	3,0	0,4	3,3	0,4	0,0	0,0	0,2	101,1	0,01	1,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,12	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_03	0,9	36,1	0,0	48,3	0,0	0,4	1,4	0,5	3,7	1,0	3,4	0,3	3,2	0,4	0,0	1,0	0,6	101,1	0,03	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	2,03	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_04	1,1	35,4	0,0	47,7	0,0	0,5	1,6	0,4	3,4	0,9	2,9	0,3	2,7	0,3	0,8	1,8	1,2	101,0	0,04	0,99	0,00	0,84	0,00	0,01	0,02	0,00	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	2,04	0,03	0,00	0,02	0,11	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_05	1,0	35,7	0,0	48,3	0,0	0,4	1,4	0,5	3,3	0,9	3,1	0,4	3,0	0,4	0,3	1,4	0,9	101,1	0,03	0,99	0,00	0,85	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	2,03	0,02	0,00	0,02	0,12	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_06	0,6	36,8	0,0	48,8	0,0	0,4	1,3	0,4	3,5	0,9	3,5	0,5	3,3	0,3	0,0	0,5	0,3	101,1	0,02	1,01	0,00	0,84	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,01	0,00	0,02	0,13	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_07	0,7	36,3	0,0	48,5	0,0	0,0	1,4	0,6	4,0	1,0	3,5	0,4	3,2	0,4	0,0	0,8	0,3	101,1	0,02	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	2,02	0,01	0,00	0,02	0,14	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_08	0,8	36,5	0,0	48,3	0,0	0,3	1,6	0,4	3,8	1,0	3,4	0,3	3,1	0,3	0,0	0,6	0,6	101,1	0,03	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_09	0,4	37,1	0,0	49,2	0,0	0,4	1,6	0,6	3,9	1,1	3,4	0,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	101,1	0,01	1,01	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,13	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_10	1,0	36,2	0,0	48,3	0,0	0,4	1,7	0,5	3,9	0,9	3,4	0,3	3,0	0,3	0,0	0,6	0,6	101,0	0,03	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA13_11	0,6	36,6	0,0	48,8	0,2	0,5	1,7	0,5	3,5	0,9	3,0	0,3	3,2	0,3	0,0	0,4	0,5	101,0	0,02	1,00	0,00	0,84	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,01	0,00	0,03	0,12	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_01	0,8	36,4	0,0	48,1	0,0	0,3	1,5	0,6	4,3	1,2	3,6	0,3	2,9	0,2	0,0	0,4	0,5	101,1	0,03	1,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,02	0,01	0,05	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_02	1,5	35,2	0,3	46,3	0,0	0,0	1,5	0,7	4,4	1,1	3,4	0,2	2,7	0,2	0,0	2,2	1,2	101,0	0,05	0,99	0,01	0,82	0,00	0,00	0,02	0,01	0,05	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	2,05	0,03	0,00	0,02	0,13	0,81	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_03	1,2	36,2	0,0	48,4	0,0	0,5	1,6	0,5	3,7	1,0	3,0	0,3	3,1	0,2	0,0	1,0	0,4	101,0	0,04	1,00	0,00	0,84	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	2,03	0,01	0,00	0,02	0,12	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_04	0,8	36,3	0,0	48,2	0,0	0,4	1,5	0,5	4,0	0,9	3,6	0,3	3,2	0,3	0,0	0,5	0,5	101,1	0,02	1,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_05	0,8	36,3	0,0	48,2	0,0	0,4	1,6	0,7	4,1	1,1	3,5	0,4	2,9	0,3	0,0	0,5	0,3	101,1	0,03	1,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_06	0,4	37,1	0,0	48,5	0,0	0,9	2,2	0,6	4,1	0,9	2,6	0,3	3,2	0,3	0,0	0,0	0,0	101,0	0,01	1,01	0,00	0,83	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,03	0,12	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_07	0,4	37,0	0,0	48,9	0,3	0,7	1,9	0,6	3,8	0,8	2,7	0,3	3,1	0,3	0,0	0,0	0,0	101,0	0,01	1,01	0,00	0,84	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,03	0,12	0,85	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_08	0,6	36,4	0,0	48,2	0,0	0,4	1,6	0,5	4,1	1,0	3,5	0,4	3,0	0,3	0,0	0,9	0,2	101,1	0,02	1,00	0,00	0,83	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	2,01	0,01	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_09	0,7	36,8	0,0	48,6	0,0	0,4	1,6	0,6	4,1	1,0	3,6	0,4	3,0	0,3	0,0	0,0	0,0	101,1	0,02	1,01	0,00	0,84	0,00	0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,00	0,00	0,02	0,13	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_10	0,8	36,0	0,0	47,0	0,3	0,5	1,7	0,5	3,9	1,0	3,2	0,4	3,5	0,6	0,3	0,8	0,7	101,2	0,03	1,00	0,00	0,82	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	2,02	0,01	0,00	0,03	0,14	0,82	
Ortoganisse Cassiterita	FA14_11	0,5	36,6	0,0	48,1	0,0	0,5	1,7	0,5	4,2	1,1	3,9	0,4	3,0	0,2	0,0	0,5	0,0	101,1	0,02	1,00	0,00	0,83	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,14	0,84	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_01	0,3	37,1	0,0	50,2	0,2	0,4	1,5	0,5	3,3	0,8	2,6	0,3	3,2	0,4	0,0	0,0	0,0	101,0	0,01	1,01	0,00	0,86	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,11	0,86	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_02	0,6	37,2	0,0	51,4	0,0	0,4	1,4	0,5	3,2	0,7	2,1	0,2	2,9	0,4	0,0	0,0	0,0	100,8	0,02	1,01	0,00	0,87	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,10	0,88	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_03	0,6	37,1	0,1	49,6	0,0	0,5	1,9	0,7	3,7	0,7	2,5	0,2	2,9	0,3	0,0	0,0	0,0	100,9	0,02	1,01	0,01	0,85	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	0,00	0,00	0,03	0,11	0,86	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_04	0,4	36,8	0,0	50,1	0,0	0,6	1,6	0,5	3,5	0,9	2,7	0,2	3,2	0,4	0,0	0,0	0,0	101,0	0,01	1,00	0,00	0,86	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	0,02	0,12	0,86	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_05	1,0	36,7	0,0	51,8	0,0	0,0	0,4	0,3	2,3	0,8	3,2	0,5	3,2	0,5	0,0	0,0	0,3	101,1	0,03	1,00	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	2,03	0,00	0,00	0,00	0,11	0,88	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_06	1,0	36,6	0,0	49,9	0,0	0,0	0,8	0,4	2,9	1,0	3,4	0,5	3,8	0,6	0,0	0,0	0,4	101,2	0,03	1,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,01	0,03	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	2,03	0,00	0,00	0,01	0,13	0,86	
Ortoganisse Cassiterita	FA14T_07	0,6	36,6																																								

View Letter

[Close](#)

Date: Jul 06, 2016
To: "Fabiano Richard Leite Faulstich" ffaulstich@yahoo.com, ffaulstich@gmail.com
From: "Lee Andrew Groat" groat@mail.ubc.ca
Subject: Your revision has been received

Ref.: Ms. No. CANMIN-D-15-00091R1
GAHNITE FROM THE SÃO JOÃO DEL REI PEGMATITIC PROVINCE, MINAS GERAIS, BRAZIL: CHEMICAL
COMPOSITION AND GENETIC IMPLICATIONS
The Canadian Mineralogist

Dear Mr. Faulstich,

Your revision has been received, reviewed, and determined to meet (or satisfactorily rebut) all of the referees' comments. Thank you very much for your work in polishing your submission.

Your paper will be published in the next available issue of The Canadian Mineralogist.

Yours sincerely,

Lee Groat
Editor

[Close](#)

The Canadian Mineralogist

GAHNITE FROM THE SÃO JOÃO DEL REI PEGMATITIC PROVINCE, MINAS GERAIS, BRAZIL: CHEMICAL COMPOSITION AND GENETIC IMPLICATIONS

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	CANMIN-D-15-00091R1
Full Title:	GAHNITE FROM THE SÃO JOÃO DEL REI PEGMATITIC PROVINCE, MINAS GERAIS, BRAZIL: CHEMICAL COMPOSITION AND GENETIC IMPLICATIONS
Corresponding Author:	Fabiano Richard Leite Faulstich, MSc Geological Survey of Brazil Brasilia, DF BRAZIL
Corresponding Author E-Mail:	ffaulstich@yahoo.com;ffaulstich@gmail.com
Corresponding Author's Institution:	Geological Survey of Brazil
Order of Authors:	Fabiano Richard Leite Faulstich, MSc Ciro Alexandre Ávila, DSc Reiner Neumann, DSc Viktor S. L. Silveira, Graduate Levi S. Callegario, Graduate
Article Type:	Regular
Abstract:	A swarm of pegmatitic bodies occurs in the central portion of the Mineiro Belt at the meridional border of the São Francisco craton (Brazil), forming the São João del Rei Pegmatitic Province. These bodies are genetically related to one common source, the granitic magmatism precursor to the Ritápolis granitoid, whose age of 2121 ± 7 Ma marks the last pulse of paleoproterozoic plutonism in the Mineiro Belt. A selected group of gahnite crystals from several pegmatite bodies hosted in the Brumado metadiorite, Ritápolis metagranitoid and Rio das Mortes amphibolites and phyllites has been analysed by optical stereomicroscopy, Raman spectroscopy, SEM/EDS and EMPA/WDS. The gahnite have a composition defined by the ranges Ghn65.52-85.38Spl0-2.16Hc13.71-31.92Jac0-0.92Mfr0-1.22Glx0-1.11 (in mol.%), plot almost exclusively on the gahnite-hercynite axis and fall into the granitic pegmatites field in the gahnite-spinel-hercynite ternary diagram. The composition of gahnite varies depending on the country rock the pegmatite cuts, and the interaction between the pegmatite and host rocks is more evident in grains found in pegmatite bodies associated with amphibolites due to higher Fe and Mg in these rocks. These compositions also indicate a higher fractionation of the pegmatites hosted by the Brumado metadiorite in comparison to those hosted by the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence (amphibolites and phyllites) and the Ritápolis metagranitoid, reflecting different crustal levels of emplacement of these pegmatitic bodies.
Keywords:	Gahnite São João del Rei Pegmatitic Province Pegmatite Mineralogy EMPA-WDS SEM-EDS Mineral chemistry Raman spectroscopy
Author Comments:	This work represents the first result of a doctoral research in the area of São João del Rei Pegmatitic Province. Studies are still underway and our intention is to continue to generate data for a better understanding of the area as well as trying to correlate these mineralized bodies with other mineral occurrences around the world. The manuscript has been reviewed based on the suggestions and comments made by the editor, associated editor and by two reviewers. The major changes in the manuscript are related to the addition of EMPA/WDS data which improved the interpretation and conclusions obtained.

	We believe the suggestions presented by the reviewers helped to improve our text as well as the overall presentation of our data (figures and tables) and we hope our manuscript, after a new review, could be accepted by publication in The Canadian Mineralogist.
--	---

Dear Mr. Groat and Mr. Vignola,

The manuscript D-15-0091, "Gahnite from the Sao Joao del Rei pegmatitic province, Minas Gerais, Brazil: chemical composition and genetic implications" has been reviewed based on the suggestions and comments made by you and by the reviewers Adriana Heimann and Alexander Folster.

The major changes in the manuscript are related to the addition of EPMA/WDS data which improved the interpretation and conclusions obtained.

We believe the suggestions presented by the reviewers helped to improve our text as well as the overall presentation of our data (figures and tables) and it can be accepted for publication in The Canadian Mineralogist.

Below are two sections explaining how we have accommodated the referees' comments.

Yours sincerely,

Fabiano Faulstich, Rio de Janeiro, June 08, 2016

Letter for the reviewer Adriana Heimann

We sincerely thank the comments and suggestions presented by the reviewer and made the changes related to the presented data. Below are the answers for the main issues raised by the reviewer.

1. Data and data interpretation/comparison

We added new EMPA/WDS data. These new data were used to verify the previous interpretations obtained in this work, and allowed further interpretations. The SEM/EDS data are compared to the new EPMA/WDS data in a specific section of the manuscript. In table 2 (as referred in the manuscript) only the most representative EMPA/WDS data obtained in the different pegmatites studied are presented, and all the analyses (WDS and EDS) are presented as supplementary data (appendix 1 and 2). The methodology of the analytical techniques utilized were better explained in the text, and references added.

2. Introduction

Accepted suggestions. We have shortened the introduction excluding the detailed information about the mineral structure and we added a better, and expanded, explanation about the province and its relative importance for the region's geology.

3. Discussion

Accepted suggestions. We have rewritten the discussion and added a comparison with published data.

4. Conclusions

Conclusion rewritten based on the new EPMA/WDS data obtained. Data reinterpreted and some of the previous observations were removed. We were able to add an interpretation of the geotectonic evolution of the studied area, not presented in the first version of the manuscript.

5. Figures

Accepted suggestions. Figures 1 and 6 deleted. Figures 4 e 5 combined. Other figures were improved based on the suggestions presented by the reviewer. Some of them are also modified with the inclusion of published data. A new figure with the geotectonic evolution and pegmatites emplacement has been included.

6. Tables

Accepted suggestions. Tables have been modified and we kept only three of them. The data previously presented in the tables were added to the text. New tables are presented as supplementary data: Appendix 1 with the EPMA-WDS data and Appendix 2 with the SEM-EDS data.

7. References

Formatted as seen in the latest publications from The Canadian Mineralogist.

8. Acknowledgements

Information added. Our fault.

Letter for the reviewer Alexander Folster

Accepted suggestions.

All editorial corrections were made, unless where the original text has been changed.

Table 1 – information added to the text (table deleted)

Table 5 – complete data presented in the Appendix 1 and 2.

All Figs. – The figures have been modified following the suggestions presented by the two reviewers.

Fig. 8 – EMPA/WDS data showed the Bi inclusion is an oxide phase.

Overall comments:

EPMA/WDS data was added, new interpretation, discussion and conclusions were made. SEM/EDS data is showed in comparison with the EPMA/WDS data.

GAHNITE FROM THE SÃO JOÃO DEL REI PEGMATITIC PROVINCE, MINAS
GERAIS, BRAZIL: CHEMICAL COMPOSITION AND GENETIC IMPLICATIONS

Fabiano Richard Leite Faulstich

Geological Survey of Brazil - CPRM; Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade
Federal do Rio de Janeiro

Ciro Alexandre Ávila

Departamento de Geologia e Paleontologia, Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de
Janeiro

Reiner Neumann

Centre for Mineral Technology - CETEM

Viktor S. L. Silveira

Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Levi S. Callegario

Geological Survey of Brazil - CPRM

Abstract

A swarm of pegmatitic bodies occurs in the central portion of the Mineiro Belt at the meridional border of the São Francisco craton (Brazil), forming the São João del Rei Pegmatitic Province. These bodies are genetically related to one common source, the granitic magmatism precursor to the Ritápolis granitoid, whose age of 2121 ± 7 Ma marks the last pulse of paleoproterozoic plutonism in the Mineiro Belt. A selected group of gahnite crystals from several pegmatite bodies hosted in the Brumado metadiorite, Ritápolis metagranitoid and Rio das Mortes amphibolites and phyllites has been analysed by optical stereomicroscopy, Raman spectroscopy, SEM/EDS and EMPA/WDS. The gahnite have a composition defined by the ranges $\text{Ghn}_{65.52-85.38}\text{Spl}_{0-2.16}\text{Hc}_{13.71-31.92}\text{Jac}_{0-0.92}\text{Mfr}_{0-1.22}\text{Glx}_{0-1.11}$ (in mol.%), plot almost exclusively on the gahnite-hercynite axis and fall into the granitic pegmatites field in the gahnite-spinel-hercynite ternary diagram. The composition of gahnite varies depending on the country rock the pegmatite cuts, and the interaction between the pegmatite and host rocks is more evident in grains found in pegmatite bodies associated with amphibolites due to higher Fe and Mg in these rocks. These compositions also indicate a higher fractionation of the pegmatites hosted by the Brumado metadiorite in comparison to those hosted by the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence (amphibolites and phyllites) and the Ritápolis metagranitoid, reflecting different crustal levels of emplacement of these pegmatitic bodies.

Introduction

The spinel group encompasses minerals with a chemical formula represented by $A^{2+}B_2^{3+}O_4$ (or $A_8B_{16}O_{32}$ per unit cell) with a normal structure characterized by oxygen atoms with cubic closest packing combined with divalent and trivalent cations in tetrahedral (T) and octahedral (M) sites. Minerals of the spinel group may also have inverse spinel structure, in which the tetrahedral sites are occupied by trivalent cations whereas the octahedral sites are occupied by an equal proportion of divalent and trivalent ions. Natural crystals frequently present several degrees of disorder, and may present intermediate structures between the normal and inverse structure.

Gahnite (ideally $ZnAl_2O_4$), one the rarest members of the spinel series, normally has Zn occupying its tetrahedral site and Al in the octahedral site. The Zn^{2+} may be substituted by Fe^{2+} , Mg^{2+} and Mn^{2+} forming, respectively, solid solution with hercynite ($FeAl_2O_4$), spinel ($MgAl_2O_4$) and galaxite ($MnAl_2O_4$). According to Lucchesi *et al.* (1998), only limited substitution of Al by Fe^{3+} occurs in natural samples (<0.31 apfu), although an inversion is common, with Al^{3+} and Mn^{2+} in the octahedral site while Mg^{2+} , Fe^{2+} and Fe^{3+} are distributed among the tetrahedral and octahedral sites. Nonetheless, near endmember-Zn gahnite has not been found in nature (D'Ippolito *et al.* 2013), and the most enriched members reach 95% of the molecule $ZnAl_2O_4$ (Hicks *et al.* 1985, D'Ippolito *et al.* 2013). Minor elements detected in gahnite are Ti, Si, Cr in the octahedral site and Ca in the tetrahedral site (Batchelor & Kinnaird 1984, Spry 1987, Lucchesi *et al.* 1998, Bowles *et al.* 2011).

Gahnite has been described as accessory mineral in metamorphic rocks associated with massive sulphide deposits (Heimann *et al.* 2005), in metapelitic (Dietvorst 1980) and other aluminium-rich metasedimentary rocks (Spry & Scott 1986), in limestone and skarns (Ulrych 1971, Frondel & Baum 1974), in metabauxite (Yalçin *et al.* 1993), in granites (Tulloch 1981), pegmatites (Batchelor & Kinnaird 1984, Szuszkiewicz & Łobos 2004, Soares *et al.* 2007) and quartz veins (Vokes 1962). Several processes for the formation of gahnite have been proposed as: i) desulphurisation of sphalerite associated with the breakdown of other minerals in sulphide deposits (Wall & England 1979, Spry & Scott 1986, Appel 2000, Dias & Gomes 2013); ii) metamorphic destabilization of staurolite (Stoddard 1979, Spry & Scott 1986, Gagne *et al.* 2010), biotite (Dietvorst 1980, Heimann *et al.* 2005), zinc oxides (Sandhaus & Craig 1986) and zinc-rich silicates (Appel 1986) in schists associated with massive sulphide deposits at or near amphibolite conditions; iii) fractional crystallization in granites depleted in mafic phases (Merino *et al.* 2013); iv) crystallisation in pegmatites within metasedimentary sequences (Batchelor & Kinnaird 1984).

74 Either an igneous or a metamorphic environment is thus possible for gahnite crystallisation,
75 and Batchelor & Kinnaid (1984) proposed its distinction based on its Fe and Mg content, and the
76 igneous field was reviewed and extended by Merino *et al.* (2013). Appel (2000) demonstrated
77 that gahnite grains with low content of Fe and Mg could also have a metamorphic origin, related
78 to the desulphurisation of sphalerite in the absence of other Fe sulphides.

79 The present work aims at describe a selected group of gahnite crystals hosted by several
80 granitic pegmatite bodies from the São João del Rei Pegmatitic Province, southeastern Brazil.
81 This province is historically known for its production of cassiterite, columbite and tantalite in
82 open-pit mines (Guimarães & Guedes 1944, Guimarães & Belezkij 1956), most of them depleted.
83 Today only one mine is in activity producing cassiterite, columbite, tantalite, microlite, K-
84 feldspar and spodumene. The mine is located in the Volta Grande Pegmatite, which is composed
85 by seven different bodies (Quéméneur 1987, Pires & Pires 1992, Assumpção 2015), shows
86 tabular geometry and is mostly hosted by amphibolites from the Rio das Mortes metavolcano-
87 sedimentary sequence. Assumpção (2015) classified these pegmatites as belonging to the LCT
88 (lithium-cesium-tantalum) family, rare-element class, rare-element Li subclass, albite-spodumene
89 type of Černý & Ercit (2005) and Černý *et al.* (2012). Besides the Volta Grande pegmatite bodies,
90 almost all the outcropping pegmatites in the province are weathered and the result is
91 feldspar/kaolinite, quartz and minor resistate minerals.

92 The objective of this study is to use gahnite data from different pegmatites of the São João del
93 Rei Pegmatitic Province to establish the relationship of these bodies with its host rocks, as well as
94 to infer their relative fractionation degree.

96 Geological Context of the São João Del Rei Pegmatitic Province

98 The southeast border of the São Francisco craton (Fig. 1) is represented by a mosaic of
99 Archean and Paleoproterozoic terrains of medium to high metamorphic grade that are separated
100 by the Jaceaba - Bom Sucesso and Congonhas lineaments (Campos & Carneiro 2008, Teixeira *et al.*
101 *et al.* 2015). Isotopic studies showed predominance of Archean rocks north of the Jaceaba - Bom
102 Sucesso lineament and Paleoproterozoic rocks to the south of it. The Archean terrains are typified
103 by schists, komatiites, metaultramafic bodies, TTG gneisses, granites, migmatites, granulites and
104 charnockites (Teixeira *et al.* 1996, 1998, Lana *et al.* 2013), whereas the Paleoproterozoic terrains
105 are characterized by three metavolcano-sedimentary sequences (Rio das Mortes, Nazareno and
106 Dores de Campos), plutonic bodies of different compositions (metagabbros, metadiorites,
107 metatonalites, metagranodiorites, metagranites) and volcanic-subvolcanic rocks (Ávila *et al.*

2010, 2014). The Paleoproterozoic rocks are related to the evolution of the Mineiro Belt that correspond to the junction of three magmatic arcs named Resende Costa, Serrinha and Ritápolis (Ávila *et al.* 2010, 2014, Teixeira *et al.* 2015, Barbosa *et al.* 2015).

Ritápolis arc is of Rhyacian age and is composed by the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence (2231 ± 5 Ma to 2202 ± 11 Ma – Ávila *et al.* 2012) and plutonic bodies that crystallized between 2191 ± 9 Ma (Teixeira *et al.* 2008) and 2111 ± 4 Ma (Barbosa *et al.* 2015), including the Brumado metadiorite and the Ritápolis metagranitoid. The Rio das Mortes sequence comprises abundant amphibolites of tholeiitic affinity, metasedimentary rocks (phyllites, gondites and quartzites), and minor metaultramafic rocks. The Brumado metadiorite is composed of metadiorites, metaquartz-diorites and metatonalites, originally formed by fractional crystallization and intruded into amphibolites of the Rio das Mortes sequence. This body is calc-alkaline, metaluminous, arc-related and has a crystallization age of 2131 ± 4 Ma (Ávila 2000). The Ritápolis metagranitoid corresponds to a batholith (Fig. 2) whose age (2121 ± 7 Ma) marks the last pulse of felsic paleoproterozoic magmatism in the São João del Rei area (Ávila 2000, Souza 2009). Field relationships indicate that this metagranitoid is intrusive into amphibolites and phyllites of the Rio das Mortes sequence (Fig. 3A) and into several plutonic bodies, including the Brumado metadiorite (Fig. 3B).

A swarm of pegmatitic bodies occur at the central portion of the Mineiro Belt (Fig. 1), which were grouped by Pereira *et al.* (2004) into the São João del Rei Pegmatitic Province, covering 2700 km² (90 x 30 km²). These pegmatites crosscut rocks of the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence, several batholiths and smaller bodies, and are genetically related to the Ritápolis Pluton (Guimarães & Guedes 1944, Rolff 1952, Francesconi 1972, Quéméneur & Baraud 1983, Pires & Porto Júnior 1986, Rodrigues 1998, Pereira *et al.* 2003). Several pegmatitic bodies that may vary widely in thickness and dimension intrude the Brumado metadiorite and the Ritápolis metagranitoid (Figs. 3C and 3D). The pegmatites are usually tabular, discordant to the main foliation of the rocks of the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence, with sub-vertical plunging and hosting Sn (cassiterite) and Nb-Ta (columbite, tantalite and minerals of microlite group) mineralisations.

The Rio das Mortes sequence records two metamorphic Paleoproterozoic pulses (Ávila *et al.* 2010, 2014). The first episode took place between 2250 and 2190 Ma and achieved low- to medium-grade amphibolite facies. The second episode (2131–2100 Ma) reached greenschist to low-amphibolite facies and was overprinted onto the metavolcano-sedimentary sequences and orthogneisses, as well as some intrusive plutons, as the Brumado metadiorite and the Ritápolis metagranitoid.

Materials and methods

Twelve weathered pegmatitic bodies were sampled to concentrate heavy minerals aiming at the selection of gahnite crystals for mineralogical study. Only seven pegmatites among them (Fig. 2) beared gahnite. Samples FA02, FA03 and FA06 correspond to pegmatites intrusive into the Brumado metadiorite. Samples FA05 and FA07 correspond to pegmatites cutting the Ritápolis metagranitoid. The samples FA09 and FA11 are from pegmatites cross-cutting phyllites and amphibolites (respectively) from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence. About 20 kg of saprolitic material were collected from each outcrop, and the heavy minerals concentrated on site by panning. Initially, the sampled material was washed with water to remove silt and clay fractions, and then sieved at 2 mm (10 mesh) to separate the coarse fraction. The material was then concentrated using a pan to eliminate quartz, feldspar, biotite and muscovite that in some cases might represent up to 99% of the sampled material.

In the laboratory, heavy mineral concentrates were ultrasonicated to release the finest particles that might be encrusted by Fe and Al oxides or hydroxides. Subsequently, the material was oven-dried and separated using a dense liquid (bromoform S.D. = 2.89 kg/L) and a ferrite hand magnet. The concentration process proceeded with a Frantz magnetic separator with magnetic coil currents ranging from 0.3 to 0.8 A. Gahnite was identified under a stereomicroscope, described and photographed, and crystals for further analyses were handpicked.

Analytical techniques

Optical description of gahnite grains and identification of inclusions was performed on an Olympus SZX7 stereomicroscope with image capture system, using reflected and transmitted light. Gahnite grains were mounted with Struers Epofix epoxy resin, ground and polished with diamond metal-bond discs (40 to 6 μm) and suspensions (3 and 1 μm) on synthetic cloth.

The chemical composition of the previously sorted gahnite grains was determined on polished sections using two different analytical techniques. A first approach and classification was done using a FEI Quanta 400 scanning electron microscope (SEM) coupled to a Bruker Nano Quantax 800 energy dispersive spectrometer (EDS) and a silicon drift XFlash 4030 detector after spectral calibration using a copper standard. The equipment, located at the Centre for Mineral Technology, Rio de Janeiro, Brazil, was operated at 20 kV, counting time of 120 seconds and

standardless deconvolution with Bruker Nano's PhiRhoZ procedure (Pouchou & Pichoir 1991, Bastin *et al.* 1998). The excitation volume as calculated by the software averaged 2 μm diameter and 3 μm depth. EDS point chemical data were previously checked for data consistency, and only results with elemental content higher than the detection limit, equivalent to three standard deviations (Reed 1995), were accepted. Since a semiquantitative technique was used the data was normalized to 100% before the post processing phase.

The second approach, a more detailed chemical study and gahnite classification were carried out on a JEOL microprobe, model JXA-8230, in spot mode (focused electron beam), an accelerating voltage of 15 kV and a sample current of 20 nA. Used standards were anorthite (Al $K\alpha$), olivine (Mg $K\alpha$), ZnO (Zn $K\alpha$), Mn-orthoclase (Mn $K\alpha$), Fe_3O_4 (Fe $K\alpha$). The microprobe analyses were performed at the Regional Centre for Innovation and Technological Development (CRTI), Federal University of Goias, Goiania, Brazil.

The structural formula (*apfu*) was obtained based on 32 oxygen atoms in accordance with Bowles *et al.* (2011). The Fe^{2+} and Fe^{3+} content was re-calculated following the procedure described by Droop (1987). In order to calculate the endmembers the following crystallization order was assumed: hercynite (FeAl_2O_4), jacobsite (MnFe_2O_4), magnesioferrite (MgFe_2O_4), spinel (MgAl_2O_4), gahnite (ZnAl_2O_4), franklinite (ZnFe_2O_4) and galaxite (MnAl_2O_4). This order is based on data presented by Bowles *et al.* (2011) and is conditioned to the trivalent and divalent cations available to the formation of end members. The excess of divalent cations (> 8 *apfu*) was proportionally distributed to the B site assuming that a small inversion on the structure of natural gahnite is common (Lucchesi *et al.* 1998).

The mineral name abbreviations (gahnite - Ghn, spinel - Spl, hercynite - Hc, jacobsite - Jac, magnesioferrite - Mfr, franklinite - Frk, galaxite - Glx) are in compliance with Whitney & Evans (2010) and Beard & Tracy (2002).

Raman spectroscopy data was obtained using a LabRAM 800HR Raman dispersive microspectrometer manufactured by Horiba Jobin Yvon, equipped with a cooled CCD detector and a 1800 grooves/mm diffraction grid, with spectral resolution of approximately 0.5 cm^{-1} , coupled to an Olympus BX41 petrographic microscope. The experimental parameters were: excitation source with Ar^+ laser at $\lambda = 514.5\text{ nm}$, confocal aperture of $300\text{ }\mu\text{m}$, 100x objective, 10 seconds exposure time with 10 repetitions, spectral region from 100 to 1700 cm^{-1} and spectral calibration with silicon wafer performed before analysis. The obtained data were post-processed using Horiba JobinYvon's LabSpec5 software to subtract the fluorescent background as well as to adjust the observed bands. This process used a Gaussian-Lorentzian mathematic function making

1,000,000 interactions automatically in order to adjust some of the bands chosen from the original spectra.

Results

Petrography

The gahnite grains were usually homogeneous and its colour varied subtly among shades of dark green, with one sample (FA09) displaying grains with a bluish tint. Eventually it was possible to observe the presence of an iron oxide/hydroxide stain causing a yellowish colour to the grain. Gahnite displays anhedral fragments with conchoidal to irregular fracture, although euhedral to sub-euhedral crystals were found with predominantly octahedral habit (Fig. 4). The crystals have vitreous lustre, varying from transparent to translucent, and no solid or fluid inclusions were observed on this scale.

On backscattered electron images, gahnite grains present homogeneous grey levels, indicating the absence of compositional zoning, as expected for pegmatitic systems. The most abundant solid inclusions correspond to sphalerite (Figs. 5A, B and E) and albite (Fig. 5D). Biotite (Fig. 5C), quartz and muscovite are rather common and kaolinite is commonly found on edges or filling grain fractures. Only one sample (FA09) exhibited microinclusion trails of bismite (confirmed through microprobe analysis), a bismuth oxide (Fig. 5E). No mineral inclusions were found in sample FA06, but trails of empty cavities suggest that some sort of dissolution process occurred, because the samples were collected from saprolite material.

Raman Spectroscopy

The Raman spectra for gahnite, as predicted by the group theory, has five active modes: $A_{1g} + E_g + 3T_{2g}$. These Raman active bands positions can vary theoretically and experimentally (Cynn *et al.* 1992, Fang *et al.* 2002, López-Moreno *et al.* 2011, D'Ippolito *et al.* 2013) and are presented in Table 1. According to Fang *et al.* (2002) and López-Moreno *et al.* (2011), for the phonon density of states of $ZnAl_2O_4$ the low-frequency motions ($< 250\text{ cm}^{-1}$) are associated with Zn ions, while the vibrations at higher wavenumbers ($240\text{--}840\text{ cm}^{-1}$) are due to O and Al. According to Chopelas & Hofmeister (1991), it is possible to observe two other broader and less intense bands at about 620 and 708 cm^{-1} that would probably correspond to the result of combined pre-existent vibrations or forbidden modes. Through the study of natural and synthetic

spinel (*sensu strictu*) crystals, Cynn *et al.* (1992) showed that the increase of structural disorder enlarges the E_g band at 410 cm⁻¹ (at 420 cm⁻¹ for gahnite), and a shoulder indicating asymmetry of the band appears.

From the selected crystals, 37 high-quality Raman spectra of gahnite were collected. The spectra converged to a homogeneous sample set, with clear identification of four of the five predicted bands, as well as three additional well-defined bands. The wavenumbers of the bands coincide (Table 1), while bands intensities vary according to the crystallographic direction of the analysed crystal. It is therefore not possible to use intensity rates as a parameter for distinguishing different samples.

The position of the vibrations from the acquired Raman spectra match those previously published (Table 1), and are closest to those presented by Chopelas & Hofmeister (1991). The bands at 620 cm⁻¹ and 708 cm⁻¹ cited by the authors were observed at 624 cm⁻¹ and 704 cm⁻¹, respectively. The E_g band at 410 cm⁻¹ described by Cynn *et al.* (1992), with a shoulder and asymmetry towards lower wavenumbers, was located at 414 cm⁻¹ in the present work, with a shoulder at 403 cm⁻¹ (Fig. 6), pointing to some structural disorder for those crystals. Other observed bands, usually broad and of lower intensities, are probably due to interactions of the laser and the mounting resin, as the crystals are quite clear and transparent to the laser.

Mineral chemistry

A total of 86 EDS point chemical analysis and 61 WDS point analysis from different spinel grains show variable chemical composition, principally regarding the Fe²⁺ and Zn content, with predominance of the gahnite and hercynite components and minor amounts of spinel, jacobsite, magnesioferrite and galaxite (Table 2, Appendix 1 and 2). EDS data shows that the A-site occupancy is dominated by Zn²⁺ and Fe²⁺, and the direct inverse relation between these concentrations points to a substitution of Zn²⁺ by Fe²⁺, whereas that relation is not clearly observed for Mg and Mn, even when they are above detection limits. The more accurate data presented by the WDS analysis allowed us to observe that substitutions between the divalent cations occurs paired with (Zn + Mn) being replaced by (Fe²⁺ + Mg). At site B, Fe³⁺ replaces Al³⁺ as the trivalent cation.

In terms of molecular proportion of the endmembers (Fig. 7, Table 2 and Appendix 1), the studied spinel crystals have a composition defined by the ranges Ghn_{65.52-85.38}Spl_{0-2.16}Hc_{13.71-31.92}Jac_{0-0.92}Mfr_{0-1.22}Glx_{0-1.11} (in mol.%). Plotting the gahnite's composition into the gahnite – spinel – hercynite ternary diagram, a clustering of points towards the gahnite vertex

(characterizing Zn enrichment) indicate a higher fractionation of the pegmatites hosted by the Brumado metadiorite. The samples plot almost parallel to the hercynite-gahnite line, with a small enrichment in spinel of the less differentiated samples (depleted in Zn and associated to the amphibolites from the Rio das Mortes sequence), characterising a Zn-Fe substitution with a small Mg increase as the Fe exceeds 25 mol.%.

The gahnite derived from the pegmatites intrusive into the Brumado metadiorite (gahnite composition $\text{Ghn}_{74.91-84.47}\text{Spl}_{0-0.63}\text{Hc}_{14.41-23.05}\text{Jac}_{0.1-0.9}\text{Mfr}_{0-1.22}\text{GlX}_{0-0.45}$) have, in average, the highest gahnite contribution (up to 84.5 mol.%), whereas their hercynite component is the lowest (as low as 14.4 mol.%). The molecular proportion of the Mn endmembers (jacobsite and galaxite) and Mg endmembers (spinel and magnesioferrite) are the lowest between the pegmatites studied. Spinel-group minerals from the pegmatitic bodies intrusive into amphibolitic rocks of the Rio das Mortes sequence (gahnite composition $\text{Ghn}_{65.84-69.98}\text{Spl}_{1.18-1.7}\text{Hc}_{27.66-31.46}\text{Jac}_{0.63-0.84}\text{Mfr}_{0.09-0.74}$) have the lowest proportion of gahnite endmember (65.8 - 70.0 mol.%) and the highest proportions of the Fe^{2+} and Mg endmembers. Hercynite (27.7 - 31.5 mol.%), spinel (1.2 - 1.7 mol.%) and magnesioferrite endmember (0.1 - 0.7 mol.%) are important components of this spinel. Another characteristic of the gahnite associated to these amphibolites is the absence of galaxite as an endmember. The spinel grains associated with the pegmatites intrusive into phyllites of the Rio das Mortes sequence (gahnite composition $\text{Ghn}_{70.08-77.51}\text{Spl}_{0.4-2.05}\text{Hc}_{21.06-28}\text{Jac}_{0.16-0.92}\text{Mfr}_{0-0.12}\text{GlX}_{0-0.82}$) can be separated into two groups depending on their endmember contents. The first has higher gahnite and lower hercynite endmember proportions (77.5 and 21.1 mol.%, respectively) and they are more similar with the gahnite from the pegmatites found cutting the Brumado metadiorite. The second group has lower gahnite (70.1 mol.%) and higher hercynite (28.0 mol.%) endmember contents. The proportions of the endmembers spinel, jacobsite and galaxite are low (< 1.5 mol.%) and showed the same variations in the two groups. Different spinel crystals associated with the pegmatites intrusive into the Ritópolis metagranitoid (gahnite composition $\text{Ghn}_{65.52-85.38}\text{Spl}_{0-2.16}\text{Hc}_{13.71-31.92}\text{Jac}_{0-0.86}\text{Mfr}_{0-0.58}\text{GlX}_{0-1.11}$) show the highest values for gahnite, hercynite, spinel and galaxite endmembers (85.4 mol.%, 31.9 mol.%, 2.16 mol.% and 1.1 mol.%, respectively). The contents of the other endmembers are within the average encountered in the other pegmatites studied.

Binary diagrams with *apfu* plot from WDS data of the main divalent cations (Zn , Fe^{2+} , Mg and Mn) are used to distinguish gahnite in the different pegmatites studied (Fig. 8 A to D). The gahnite associated with the Brumado metadiorite and the phyllites from the Rio das Mortes sequence are readily separated from those associated with the Rio das Mortes amphibolites, which show higher Mg and Fe^{2+} contents. This mineral in the sample FA-09 (phyllites from Rio

das Mortes sequence) is separate in two groups in relation to the content of Fe^{2+} and Zn, while gahnite in the Brumado metadiorite is richer in Zn and depleted in Fe^{2+} in relation to phyllites from the Rio das Mortes sequence. The content of Mn in gahnite (versus Zn and Fe^{2+}) of the São João del Rei Pegmatitic Province is very low and not useful to distinguish different groups. Gahnite in pegmatites associated with the Ritópolis metagranitoid are scattered in all four diagrams.

Results and discussion

According to Taylor (1965) the Zn/Fe^{2+} ratio increases during the fractionation of silica-rich liquids. Tulloch (1981) described primary zoning in gahnite from the Desolation Row granite in New Zealand, starting from a Zn/Fe^{2+} ratio of 3.9 (mol) in the centre of the gahnite crystals, and reaching up to 6.9 at the edges, representing the final phases of crystallization. However, gahnite crystals from the different pegmatites of the São João del Rei Pegmatitic Province are homogeneous, and no compositional zoning was detected.

The Zn/Fe^{2+} ratio of the analysed crystals varied from 2.1 to 6.2. Gahnite grains from the pegmatites associated with the Brumado metadiorite showed the highest values (3.3 to 5.7) characterizing them as the most evolved bodies, whereas those associated with the pegmatites intrusive into the amphibolites from the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence showed the lowest values (2.1 to 2.5). Gahnite grains derived from the pegmatites intrusive into the Ritópolis metagranitoid and into the phyllites from the Rio das Mortes sequence showed intermediate Zn/Fe^{2+} ratio values (average 3.0 and 3.3 respectively), although two samples associated to the metagranitoid presented anomalous values of 4.4 and 6.2.

Batchelor & Kinnaird (1984) defined a Zn/Fe^{2+} ratio of 3.8 to separate gahnite grains of magmatic origin (values >3.8) from those associated with metamorphic rocks (values <3.8). If only the Zn/Fe^{2+} ratio limit of 3.8 proposed by the authors is considered, part of the gahnite grains in the studied area would be genetically related to a metamorphic origin. Nevertheless, the highest metamorphic grade in the region reached amphibolite facies conditions (magnesio-hornblende + tschermakite + bytownite + cummingtonite + ilmenite) (Ávila *et al.* 2008; Vasconcelos 2015). No melting enough to generate pegmatites as large as those found in this province can occur under these conditions. The limit proposed by Batchelor & Kinnaird (1984) to separate gahnite grains of igneous and metamorphic origin (Zn/Fe^{2+} ratio of 3.8) does therefore not apply to the pegmatites of the São João del Rei Pegmatitic Province, and a new value of 2.1 is proposed.

Bivariate diagrams are used to highlight substitutions within the gahnite crystal structure (Pearce 1968). Batchelor & Kinnaird (1984) compiled the available data from the literature and suggested the bivariate diagram $(\text{Zn}+\text{Mn}^{2+})/\text{Al}$ vs. $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$, as a tool to investigate the behaviour of the main cations (Zn, Fe, Mg and Mn) when compared to Al. The pegmatite-derived gahnite crystals from the São João del Rei Pegmatitic Province plot into a contiguous area in the Batchelor & Kinnaird (1984) diagram, and the majority are positioned in the field of igneous origin. Gahnite related to pegmatites intrusive into the Brumado metadiorite and into phyllites from the Rio das Mortes sequence lies entirely within the igneous origin field, which have higher $(\text{Zn}+\text{Mn}^{2+})/\text{Al}$ and lower $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ ratios. The compositions of gahnite from pegmatites intrusive into the Ritópolis metagranitoid and into the amphibolites of the Rio das Mortes sequence are more dispersed, and plot to a great extent onto the superposition of the igneous and metamorphic fields (Fig. 9A).

The gahnite composition obtained in this work plot in a linear trend, in agreement with data from other granitic pegmatites worldwide (Fig. 9B), showing an overall compositional similarity with the gahnite from the pegmatites at Separation Rapids, Canada (Morris *et al.* 1997, Tindle & Breaks 1998) and those from the Pampean Pegmatitic Province, Argentina (Heimann *et al.* 2015). Gahnite composition from the pegmatites associated with the phyllites from the Rio das Mortes sequence showed a partial compositional overlap with those studied by Szuszkiewicz & Łobos (2004) from rare-element pegmatites associated to two-mica granites from Poland. An expansion of the atomic ratio $(\text{Zn}+\text{Mn}^{2+})/\text{Al}$ and $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ intervals defined by Batchelor & Kinnaird (1984) and Tindle & Breaks (1998) for gahnite of igneous origin is proposed (Fig. 9B).

Batchelor & Kinnaird (1984) suggested a ternary diagram for spinel group classification based on the molecular proportions of Zn, Mg and Fe, also defining igneous and metamorphic origin fields for gahnite. Spry & Scott (1986) refined a similar diagram, but based on the spinel group endmembers gahnite, spinel and hercynite. The authors defined three large regions in the diagram as aid to locate metamorphosed sulphide deposits, afterwards extended by Heimann *et al.* (2005) to seven regions. Merino *et al.* (2013) and Heimann *et al.* (2015) modified the granitic pegmatites field using new data available from granitic pegmatites worldwide.

Gahnite composition data has been plotted into the gahnite – spinel – hercynite ternary diagram (Figure 10), together with those from gahnite in granitic pegmatites worldwide. The gahnite compositions from the São João del Rei Pegmatitic Province fall into the granitic pegmatites field (field 5) and show compositional similarity with gahnite associated to pegmatite dikes intruding metasedimentary sequences (Merino *et al.* 2013), rare-element granitic pegmatites cutting mafic metavolcanic rocks (Morris *et al.* 1997, Tindle & Breaks 1998), pegmatite veins

associated to two-mica granite (Szuszkiewicz & Łobos 2004) and muscovite-rare element pegmatite intrusive in augen-gneiss (Heimann *et al.* 2015). Although the granitic pegmatites field overlaps with that of gahnite from metamorphosed massive sulphide deposits in Fe-Al-rich metasedimentary and metavolcanic rocks (field 3), metabauxites (4) and unaltered and hydrothermally altered Fe-Al-rich metasedimentary and metavolcanic rocks (6), the data obtained here is almost exclusively concentrated on the gahnite-hercynite axis, just touching the borders of the aforementioned fields. The composition of the gahnite from São João del Rei Pegmatitic Province does not present the extreme Zn enrichment found in crystals associated with metabauxites (field 4) nor the wide range and higher Fe and Mg contents which occur in gahnite associated with fields 3 and 6.

Batchelor & Kinnaird (1984) ascribe the Mg fractionation as a good tracer for the evolution of a magma, as Mg is incorporated into the early mafic phases, lowering its content in the magma. The same behaviour is admitted for Fe. According to these authors, however, metamorphism and hydrothermalism might remobilize Mg and Fe from the breakdown of host rock minerals (as biotite or amphibole), to be incorporated into minerals of the spinel group during their crystallization. The analysed gahnite grains from the São João del Rei Pegmatitic Province have a low iron (1.1 - 2.55 Fe²⁺ *apfu*) and very low (0.01 - 0.21 *apfu*) Mg content. The lowest level, particularly for Mg, was found in the grains of gahnite from pegmatites associated with the Brumado metadiorite.

The host rocks have different chemical signatures, regarding the elements relevant for this study (Table 3). The highest grades of Zn, FeO and MgO are encountered in the amphibolites of the Rio das Mortes sequence. Brumado metadiorite has intermediate FeO values but the same MgO grade of the amphibolites, while the Ritópolis metagranitoid has the lowest values of all these elements. Disagreeing with the host rock geochemistry, higher Zn/Fe²⁺ and (Zn+Mn²⁺)/Al ratios and the lowest (Fe²⁺+Mg)/Al ratio, as well as the almost absence of the spinel endmember, indicate that contamination by the host rock cannot account for most of the gahnite composition for the pegmatites intrusive into the Brumado metadiorite. These are actually more differentiated than those intrusive into the Ritópolis metagranitoid and into the metavolcanic-sedimentary sequence of Rio das Mortes (phyllites and amphibolites).

WDS versus EDS analysis

Comparing the datasets obtained by EMPA-WDS (Appendix 1) and SEM-EDS (Appendix 2) analysis, we can see that the results are very similar for the major cations. The

binary $(\text{Zn}+\text{Mn})/\text{Al} \times (\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ diagram, as well as the ternary gahnite-spinel-hercynite diagram based on EDS data can be used to classify granitic pegmatites without restrictions (Fig.12A e B). EDS analysis, however, has a lower sensitivity for minor and trace elements (below 1 wt. %), affecting Mg and Mn determinations in our samples, and thus its endmembers estimate. In figure 12B we can see that some of the EDS data are closer to the endmember gahnite (Mg, Mn and Fe^{2+} underestimated) as well as some are more enriched in spinel (Mg overestimated). Despite minor limitations, EDS data is much easier, faster and cheaper to be acquired than microprobe data, and it suits perfectly as a first tool to classify gahnite from granitic pegmatites. The use of EDS data is feasible since precautions are taken regarding endmember calculation.

Conclusions

A swarm of ortho-derived pegmatites was studied and these bodies are associated with one common source, the granitic magmatism precursor to the Ritápolis metagranitoid. Gahnite compositions from the São João del Rei Pegmatitic Province is almost exclusively concentrated in the gahnite-hercynite axis and fall into the new granitic pegmatites field of Merino *et al.* (2013) and Heimann *et al.* (2015) in the gahnite – spinel – hercynite ternary diagram. The composition of gahnite varies after to the country rock of the pegmatite and the interaction between the pegmatite and host rocks is more evident in grains found in pegmatite bodies associated with amphibolites due to excess Fe and Mg present in these rocks.

An expansion of the atomic ratio $(\text{Zn}+\text{Mn}^{2+})/\text{Al}$ and $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ intervals defined by Batchelor & Kinnaird (1984) and Tindle & Breakes (1998) for gahnite of igneous origin is proposed, as well as a new value of 2.1 for the Zn/Fe^{2+} ratio.

The geologic evolution of the São João del Rei Pegmatitic Province is linked to the formation of oceanic crust between 2231 ± 5 Ma and 2202 ± 11 (Fig. 11A), whose subduction forms the Ritápolis arc (Fig. 11B) and triggers the mafic plutonic intrusions related to the Brumado diorite (2131 ± 4 Ma) into the Rio das Mortes sequence (Fig. 11C). Both, Rio das Mortes sequence and Brumado metadiorite, are intruded by the Ritápolis metagranitoid at 2121 ± 7 Ma (Fig. 11D) and by the associated pegmatitic bodies (Fig. 11E). The whole sequence has been eroded, and pegmatites of different crustal levels are exposed.

Gahnite mineral chemistry attributes the highest fractionation to the pegmatites hosted by the Brumado metadiorite, despite the composition of the host rock. This contrast can only be a reflex of different crustal levels of emplacement of these pegmatitic bodies.

Acknowledgements

Microprobe WDS analysis by CRTI are acknowledged. The authors appreciate the detailed and constructive reviews by Adriana Heimann and Alexander Falster that contributed to significantly improve the original manuscript. FRLF acknowledges CAPES for Doctoral bursary. CNPq is thanked for financial support to CAA (grants 478805/2010-1 and 303377/2014-3) and RN (grants 310728/2012-6 and 302828/2015-0), as well as for research project grant 406853/2013-4.

References

- Appel, P.W.U. (1986) Gahnite in an Archaean iron formation, West Greenland. *Mineralogical Magazine* **50**, 175-177.
- Appel, P.W.U. (2000) Gahnite in the ~3.75 Ga Isua Greenstone Belt, West Greenland. *Mineralogical Magazine* **64**, 121-124.
- Assumpção, C.S. (2015) *Caracterização Mineralógica e Geoquímica do Pegmatito da Mina de Volta Grande, Provincia Pegmatítica de São João Del Rei, Nazareno, Minas Gerais*. MSc Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Brazil, 86 p.
- Ávila, C.A. (2000) *Geologia, petrografia e geocronologia de corpos plutônicos Paleoproterozóicos da borda meridional do Cráton São Francisco, região de São João del Rei, Minas Gerais*. DSc Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil, 401 p.
- Ávila, C.A., Cherman A.F. & Valença J.G. (2008) Metamorfismo Paleoproterozóico no Cinturão Mineiro: considerações petrográficas a partir dos dioritos Brumado e Rio Grande. *Arquivos do Museu Nacional* **66(3-4)**, 631-660.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Bongiolo, E.M., Dussin, I.A. & Vieira, T.A.T. (2014) Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research* **243**, 221–251
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Cordani, U.G., Moura, C.A.V. & Pereira, R.M. (2010) Rhyacian (2.23-2.20 Ga) juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: Geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt. *Journal of South American Earth Sciences* **29**, 464-482.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Vasques, F.S.G., Dussin, I.A. & Mendes, J.C. (2012) Geoquímica e idade U-Pb (LA-ICPMS) da crosta oceânica riaciana do Cinturão Mineiro, borda meridional

- do Cráton São Francisco. *46 Congresso Brasileiro de Geologia, Santos, Brazil*. Abstracts, CD-ROM.
- Barbosa, N.S., Teixeira, W., Ávila, C.A., Montecinos P.M. & Bongiolo, E.M. (2015) 2.17-2.10 Ga plutonic episodes in the Mineiro belt, São Francisco craton, Brazil: U-Pb ages, geochemical constraints and tectonics. *Precambrian Research* **270**, 204-225.
- Bastin, G.F., Dijkstra, J.M., & Heijligers, H.J.M. (1998) PROZA96: an improved matrix correction program for electron probe microanalysis, based on a double Gaussian $\phi(\rho z)$ approach. *X-Ray Spectrometry* **27**(1), 3-10.
- Batchelor, R.A. & Kinnaird, J.A. (1984) Gahnite compositions compared. *Mineralogical Magazine* **48**, 425-429.
- Beard, J.S., & Tracy, R.J. (2002) Spinel and other oxides in Mn-rich rocks from the Hutter Mine, Pittsylvania County, Virginia, U.S.A.: Implications for miscibility and solvus relations among jacobsonite, galaxite, and magnetite. *American Mineralogist* **87**, 690–698.
- Bowles, J.F.W., Howie, R.A., Vaughan, D.J. & Zussman J. (2011) *Rock-forming minerals/Volume 5A, Non-silicates: oxides, hydroxides and sulphides*. Geological Society of London, 920p.
- Campos, J.C.S. & Carneiro, M.A. (2008) Genetic and tectonic implications of the Neoproterozoic and Paleoproterozoic granitoids marginal to the Jeceaba-Bom Sucesso Lineament, crustal segment of the Southern São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences* **26**, 463-484.
- Černý, P. & Ercit, T.S. (2005) The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist* **43**, 2005-2026.
- Černý, P., London, D. & Novák, M. (2012) Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements* **8**, 289-294.
- Chopelas, A. & Hofmeister, A.M. (1991) Vibrational Spectroscopy of Aluminate Spinel at 1 atm and of MgAl_2O_4 to Over 200 kbar. *Physical and Chemistry of Minerals* **18**, 279-293.
- Cynn, H., Sharma, S.K., Cooney, T.F. & Nicol, M. (1992) High-temperature Raman investigation of order-disorder behaviour in the MgAl_2O_4 spinel. *Physical Review B* **45**(1), 500-502.
- D'Ippolito, V., Andreozzi, G.B., Bosi, F., Lenius, U.H., Mantovani, L., Bersani, D. & Fregola, R.A. (2013) Crystallographic and spectroscopic characterization of a natural Zn-rich spinel approaching the endmember gahnite (ZnAl_2O_4) composition. *Mineralogical Magazine* **77**, 2941–2953.

- Dias, P. & Gomes, C.L. (2013) Be and Zn behavior during anatetic formation of early pegmatoid melts in Variscan Terrains – an example from the Arga Pegmatite Field, northern Portugal. *PEG 2013: The 6th International Symposium on Granitic Pegmatites*, Abstracts, 37-38.
- Dietvorst, E.J.L. (1980) Biotite breakdown and the formation of gahnite in metapelitic rocks from Kemio, southwest Finland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **75**, 327-337.
- Droop, G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* **51**, 431-435.
- Fang, C., Loong, C.-K., de Wijs, G., & de With, G. (2002) Phonon spectrum of ZnAl_2O_4 spinel from inelastic neutron scattering and first-principles calculations. *Physical Review B* **66**(14), 1–7.
- Francesconi, R. (1972) *Pegmatitos da Região de São João Del Rei, MG*. DSc Thesis, Universidade de São Paulo, Brazil, 101 p.
- Fron del, C. & Baum, J.L. (1974) Structure and mineralogy of the Franklin zinc-iron-manganese deposit, New Jersey. *Economic Geology* **69**, 157-180.
- Gagne, S., Williams-Jones, A. & Hynes A. (2010) Controls on Gahnite Formation: Insights From the Lalor Metamorphosed Volcanogenic Massive Sulphide Deposit, Snow Lake (Manitoba). *Abstract GeoConvention 2010*, Calgary, Alberta, Canada.
- Guimarães, D. & Belezkij, W. (1956) The Stano-Tantalo-Uraniferous deposits and occurrences in the region of São João del Rei, Minas Gerais, Brazil. *International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy (Geneva)*, **6**, 143-146.
- Guimarães, D. & Guedes, S.V. (1944) Pesquisa de Cassiterita no Município de São João del Rei. *Avulso DNPM* **58**, 13–25.
- Heimann, A., Spry, P.G., Teale, G.S. (2005) Zincian spinel associated with metamorphosed Proterozoic base-metal sulphide occurrences, Colorado: A revaluation of gahnite composition as a guide in exploration. *Canadian Mineralogist* **43**, 601-622.
- Heimann, A., Yonts, J.A. & Galliski, M.A. (2015) The compositions of gahnite in granitic pegmatites from Pampean Pegmatite Province, Argentina: implications for pegmatite fractionation. *Canadian Mineralogist* **53**, 1-26.
- Hicks, J.A., Moore, J.M. & Reid, A.M. (1985) The co-occurrence of green and blue gahnite in the Namaqualand Metamorphic Complex, South Africa. *Canadian Mineralogist* **23**, 535-542.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R. & Nalini, H.A. (2013) The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research* **230**, 1-30.

- López-Moreno, S., Rodríguez-Hernández, P., Muñoz, A., Romero, A. H., Manjón, F.J., Errandonea, D., Rusu, E. & Ursaki, V.V. (2011) Lattice dynamics of ZnAl_2O_4 and ZnGa_2O_4 under high pressure. *Annalen Der Physik (Leipzig)* **523**(1-2), 157–167.
- Lucchesi, S., Della Giusta, A. & Russo, U. (1998) Cation distribution in natural Zn-aluminate spinels. *Mineralogical Magazine* **62**(1), 41–54.
- Merino, E.; Villaseca, C.; Orejana, D. & Jeffries, T. (2013) Gahnite, chrysoberyl and beryl co-occurrence as accessory minerals in a highly evolved peraluminous pluton: The Belvís de Monroy leucogranite (Cáceres, Spain). *Lithos* **179**, 137–156.
- Morris, T.F., Breaks, F.W., Averill, S.A. & McDonald A. (1997) Gahnite composition: Implications for base metal and rare-element exploration. *Exploration and Mining Geology* **6**(3), 253-260.
- Pearce, T.H. (1968) A contribution to the theory of variation diagrams. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **19**(2), 142–157.
- Pereira, R.M., Ávila, C.A. & Neumann, R. (2004) Estudo mineralógico e químico da cassiterita e de suas inclusões sólidas: implicação com a paragênese das mineralizações da província pegmatítica de São João Del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Arquivos do Museu Nacional* **62**(3), 321–336.
- Pereira, R.M., Ávila, C.A., Neumann, R., Netto, A.M. & Atencio, D. (2003) Borda de hafnã zirconífero em zircão hafnífero da mina do Volta Grande, Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Boletim do Museu Nacional, Série Geologia* **69**, 1-14.
- Pires, F.R.M. & Pires, H.L. (1992) *Regional zoning in the São João del Rei Pegmatite District and its relation with the Collisional Santa Rita Granite, Minas Gerais, Brazil*. 37 Congresso Brasileiro Geologia, São Paulo, Brazil. Abstracts **1**, 269-272.
- Pires, F.R.M. & Porto Júnior, R. (1986) *A mineralização de Sn-Ta-Nb-Li e o Granito Santa Rita, São João Del Rey, Minas Gerais*. 34 Congresso Brasileiro Geologia, Goiânia. Anais, Goiânia: SBG, **5**, 2023-2034.
- Pouchou, J.L. & Pichoir, F. (1991) Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model “PAP”. In *Electron Probe Quantitation* (K.F.J. Heinrich & D.E. Newbury, eds.). New York, Plenum Press, (31-75).
- Quéméneur, J.J.G. (1987) Petrography of the pegmatites from Rio das Mortes Valley, southeast Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* **17**(4), 595-600.
- Quéméneur, J.J.G. & Baraud, E.R. (1983) *Estrutura do embasamento Arqueano e geologia econômica da área pegmatítica de São João Del Rei - MG*. 2 Simpósio Geologia Minas Gerais, Belo Horizonte. Anais, Belo Horizonte, SBG – Núcleo Minas Gerais, **1**: 449-460.

- Reed, S.J.B. (1995). Electron probe microanalysis. In *Microprobe Techniques in the Earth Sciences* (P.J. Potts, F.W. Bowles, S.J.B. Reed & M.R. Cave, eds.). London, Chapman & Hall, (49-89).
- Rodrigues, I.J. (1998) *Efeitos metassomáticos nos pegmatitos litiníferos de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais – Brasil*. MSc Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil, 147 p.
- Rolff, P.A.M.A. (1952) Geologia da Província Estano-litinífera do Rio das Mortes, Minas Gerais. *Revista Da Escola de Minas* **17**(6), 3–12; 39–40.
- Sandhaus, D.J. & Craig, J.R. (1986). Gahnite in the metamorphosed stratiform massive sulfide deposits of the mineral district, Virginia, U.S.A. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* **35**, 77-98.
- Soares, D.R.; Beurlen, H.; Ferreira, A.C.M. & Silva, M.R.R. (2007) Chemical composition of gahnite and degree of pegmatitic fractionation in the Borborema Pegmatitic Province, northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **79**, 395-404.
- Souza, A.N. (2009) *Evolução petrográfica e geoquímica do granitóide Ritápolis, borda meridional do cráton São Francisco*. MSc Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 119 p.
- Spry, P.G. (1987) Compositional zoning in zincian spinel. *Canadian Mineralogist* **25**, 97-104.
- Spry, P.G. & Scott, S.D. (1986) The stability of zincian spinels in sulphide systems and their potential as exploration guides for metamorphosed massive sulphide deposits. *Economic Geology* **81**, 1446-1463.
- Stoddard, E.F. (1979) Zinc-rich hercynite in high-grade metamorphic rocks: A product of the dehydration of staurolite. *American Mineralogist* **64**, 736-741.
- Szuskiewicz, A. & Łobos, K. (2004) Gahnite from Siedlimowice, Strzegom-Sobótka Granitic Massif, SW Poland. *Mineralogia Polonica* **35**, 15-21.
- Taylor, S.R. (1965) The application of trace element data to problems in petrology. *Physics and Chemistry of the Earth* **6**, 133–213.
- Teixeira, W., Ávila, C.A. & Nunes, L.C. (2008) Nd-Sr Isotopic Geochemistry and U-Pb Geochronology of the Fé Granitic Gneiss and Lajedo Granodiorite: Implications for Paleoproterozoic Evolution of the Mineiro Belt, Southern São Francisco Craton, Brazil. *Revista do Instituto de Geociências - USP* **8**(1), 53-74.
- Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa Neto, A.V., Bongioiolo, E.M., Santos, J.O. & Barbosa, N.S. (2015) A juvenile accretion episode (2.35 – 2.32 Ga) in the Minero belt and its

- role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research* **256**, 148-169.
- Teixeira, W., Carneiro, M.A., Noce, C.M., Machado, N., Sato, K. & Taylor, P.N. (1996) Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archaean evolution of gneissic-granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research* **78**(1/3), 151-164.
- Teixeira, W., Cordani, U. G., Nutman, A. P. & Sato, K. (1998) Poliphase Archean evolution in the Campo Belo Metamorphic Complex, southern São Francisco Cráton, Brazil: SHRIMP and U-Pb zircon evidence. *Journal of South American Earth Science* **11**, 279-289.
- Tindle, A.G. & Breaks, F. W. (1998) Oxide minerals of the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. *Canadian Mineralogist* **36**, 609-635.
- Tulloch, A.J. (1981) Gahnite and columbite in an alkali-feldspar granite from New Zealand. *Mineralogical Magazine* **44**, 275-278.
- Ulrych, J. (1971) Zinc spinel from Lukovska Hora Hill near Moravské Budejovice. *Casopis pro Mineralogii a Geologii* **16**, 419-422.
- Vasconcelos, F.F. (2015) *Evolução geológica, metamorfismo e metassomatismo da região ao redor da mina de Volta Grande, Nazareno, Estado de Minas Gerais*. MSc Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil, 220 p.
- Vokes, F.M. (1962) Contributions to the Geology of Norway N° 15. Gahnite in the Bleikvassli Ore. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **42**(4), 317-329.
- Wall, V.J. & England, R.N. (1979) Zn-Fe spinel-silicate-sulphide reactions as sensors of metamorphic intensive variables and processes. *Geological Society of American Abstract* **11**(7), 534.
- Whitney, D.L., & Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* **95**, 185-187.
- Yalçın, U., Schreyer, W. & Medenbach, O. (1993) Zn-rich hogbomite formed from gahnite in the metabauxites of the Menderes Massif, SW Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **113**, 314-324.

Figure captions

Figure 1 - Geological sketch of the southeast border of the São Francisco craton showing the localization of the Mineiro Belt and the São João del Rei Pegmatitic Province (modified from Ávila *et al.* 2014). Ln.: lineament.

Figure 2 – Geological map of the Ritápolis metagranitoid and adjacent area, including location of pegmatite samples. Modified from Ávila (2000), Toledo (2002) and Souza (2009).

Figure 3 – Field relations of the Brumado metadiorite, Ritápolis metagranitoid and pegmatites with host rocks: (A) Injections of Ritápolis metagranitoid (r) into amphibolitic rocks (a) from Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence. Arrows point to amphibolite xenoliths in the Ritápolis metagranitoid. (B) Outcrop of Brumado metadiorite (b) with xenoliths of amphibolite (arrows) from Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence with an injection of Ritápolis metagranitoid (r). Both rocks are intruded by a pegmatite dike (p). (C) Pegmatite body (p) intruding metaquartz-diorite rocks (b) from Brumado metadiorite. (D) Pegmatitic dike (p) cross-cutting metagranitic rocks of Ritápolis metagranitoid (r).

Figure 4 – Examples of gahnite grains from the studied pegmatites showing the shades of green and blue-green encountered. Most crystals are anhedral, but octahedral grains can occur (two first grains on the bottom line).

Figure 5 – Backscattered electron images exemplifying the homogeneity of the gahnite grains and examples of its mineral inclusions: sphalerite (Sp), muscovite (Ms), biotite (Bt), albite (Ab) and bismite (Bi). Red dot indicate the SEM/EDS analysis spot.

Figure 6 – Raman spectra of thirty seven gahnite grains from different pegmatites of the São João del Rei Pegmatitic Province, with indication of the observed bands. The numbers in parenthesis refer to the average wavenumber (cm^{-1}) of the bands. Non-marked bands are probably due to the mounting media.

Figure 7 – Ternary diagram showing the composition of gahnite from the São João del Rei Pegmatitic Province in terms of gahnite (Ghn), spinel (Spl) and hercynite (Hc) endmembers (in mol.%). RM MVSS: Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence.

Figure 8 – Binary diagrams in *apfu* (32 oxygen basis) of gahnite compositions in pegmatites from the São João del Rei Pegmatitic Province. MVSS: metavolcano-sedimentary sequence.

Figure 9 – (A) Covariance of $(\text{Zn}+\text{Mn})/\text{Al}$ and $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ (atomic ratio) for gahnite of the pegmatitic bodies from the São João del Rei Pegmatitic Province intruded into different host rocks. On (B), comparison of the data obtained in this study (black diamond) and published data from granitic pegmatites worldwide and the new suggested field for igneous origin. Original areas of igneous and metamorphic affinity as defined by Batchelor & Kinnaird (1984) and Tindle & Breakes (1998). MVSS: metavolcano-sedimentary sequence.

Figure 10 – Gahnite (Ghn), spinel (Spl) and hercynite (Hc) ternary diagram showing the composition of gahnite from the São João del Rei Pegmatitic Province and published data from granitic pegmatites worldwide. The delimited fields correspond to those defined by Heimann *et al.* (2005), Merino *et al.* (2013) and Heimann *et al.* (2015). (1) marbles, (2) metamorphosed massive sulphide deposits and S-poor rocks in Mg-Ca-Al alteration zones, (3) metamorphosed massive sulphide deposits in Fe-Al metasedimentary and metavolcanic rocks, (4) metabauxites, (5) granitic pegmatites, (6) unaltered and hydrothermally altered Fe-Al-rich metasedimentary and metavolcanic rocks, and (7) Al-rich granulites.

Figure 11 – Schematic sketch of the geological evolution of the Ritápolis volcanic arc with emphasis in the emplacement of pegmatites of the São João del Rei Pegmatitic Province. (A) Formation of the oceanic crust and associated rocks (Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence) in the Ryacian between 2231 ± 5 Ma and 2202 ± 11 Ma. (B) Subduction of the Rio das Mortes metavolcano-sedimentary sequence and emplacement of the plutonism (2190 to 2100 Ma) correlated to the Ritápolis arc. (C) Detail of the figure B showing the intrusion of Brumado metadiorite (2131 ± 4 Ma) in amphibolites and phyllites of the Rio das Mortes sequence. (D) Intrusion of the Ritápolis metagranitoid (2121 ± 7 Ma) in the Rio das Mortes sequence and in the Brumado metadiorite. (E) Injection of pegmatitic dikes (2113 ± 4 Ma) in the host rocks. (F) Arc erosion and current exposure of pegmatites intrusive in different rocks (amphibolites, phyllites, diorites, granites) of distinct crustal levels.

Figure 12 – In (A) Bivariate diagram $(\text{Zn}+\text{Mn})/\text{Al}$ and $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})/\text{Al}$ (atomic ratio) and (B) ternary endmember gahnite (ghn), spinel (spl) and hercynite (hc) diagram with EDS and WDS data compared. Igneous and metamorphic fields in A as defined by Batchelor and Kinnaird (1984) and granitic pegmatites field in B as defined by Heimann *et al.* (2015).

714	Table captions
715	
716	Table 1 – Summary of published experimental and theoretical Raman spectroscopy data for
717	gahnite and experimental data obtained in this work. nd = not detected.
718	
719	Table 2 – Representative compositions of gahnite from the São João del Rei Pegmatitic Province.
720	
721	Table 3 – Chemical composition of host lithotypes of the studied pegmatites (unpublished).

Table 1 – Summary of published experimental and theoretical Raman spectroscopy data for gahnite and experimental data obtained in this work. nd = not detected.

Modes	Chopelas & Hofmeister (1991)	Fang <i>et al.</i> (2002)	López-Moreno <i>et al.</i> (2011)		D'Ippolito <i>et al.</i> (2013)	This work		
	Experimental	Theoretical	Theoretical	Experimental	Experimental	Avg of 37	Range	Std dev.
T2g	196	197	194	195	nd	195.5	193.7-200.1	1.40
-	nd	-	-	nd	nd	403.5	391.1-411.6	5.21
Eg	417	442	427	418	420	414.7	412.7-416.0	0.80
T2g	509	520	513	488	510	nd	-	-
-	620	-	-	nd	nd	623.9	618.7-631.6	2.79
T2g	658	665	655	659	661	656.8	655.9-657.7	0.42
-	708	-	-	708	nd	704.2	701.7-706.9	1.23
A1g	758	784	775	nd	nd	757.2	755.1-761.7	1.40

Table 2 - Representative compositions of gahnite from the São Joao del Rei Pegmatitic Province.

Host Rock	Brumado Metadiorite			Ritapolis Metagranitoid			Rio das Mortes MVSS*			
							Phyllite	Amphibolite		
Sample Name (analysis)	FA02(4)	FA03(9)	FA06(1)	FA05(5)	FA05(7)	FA07(1)	FA09(9)	FA09b(6)	FA11(4)	FA11(9)
Wt. % oxide										
Al ₂ O ₃	55.61	55.45	55.74	55.81	55.35	55.82	56.08	56.41	56.13	55.91
FeO	7.15	8.33	9.76	10.74	5.87	11.28	9.11	11.15	12.86	12.77
MgO	0.09	0.06	0.29	0.09	0.08	0.60	0.11	0.12	0.40	0.43
MnO	0.23	0.25	0.24	0.40	0.21	0.27	0.37	0.39	0.32	0.25
ZnO	36.64	36.03	34.31	31.78	37.96	31.90	34.64	31.96	30.28	30.87
Total	99.73	100.12	100.34	98.81	99.47	99.87	100.31	100.02	99.99	100.23
Atomic proportions (32 oxygen basis)										
Al	15.91	15.81	15.79	16.00	15.90	15.81	15.90	15.97	15.86	15.78
Fe ³⁺	0.09	0.19	0.21	0.00	0.10	0.19	0.10	0.03	0.14	0.22
Fe ²⁺	1.36	1.49	1.76	2.18	1.10	2.07	1.73	2.21	2.43	2.34
Mg	0.03	0.02	0.10	0.03	0.03	0.21	0.04	0.04	0.14	0.15
Mn	0.05	0.05	0.05	0.08	0.04	0.05	0.08	0.08	0.06	0.05
Zn	6.56	6.43	6.09	5.71	6.83	5.66	6.15	5.67	5.36	5.46
Endmembers (mol %)**										
Ghn	82.05	80.66	76.12	71.32	85.38	70.72	76.90	70.84	66.97	68.22
Spl	0.40	0.00	0.63	0.41	0.28	2.16	0.49	0.54	1.70	1.18
Hc	16.95	18.43	21.97	27.25	13.71	25.90	21.66	27.63	30.43	29.23
Jac	0.59	0.64	0.61	0.03	0.54	0.69	0.62	0.19	0.81	0.63
Mfr	0.00	0.27	0.67	0.00	0.08	0.53	0.00	0.00	0.09	0.74
Glx	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.32	0.81	0.00	0.00

* MVSS refers to Metavolcano-sedimentary Sequence

** Mineral abreviations after Whitney & Evans (2010) and Beard &Tracy (2002)

Data obtained by EPMA

Table 3 - Chemical composition of host lithotypes of the studied pegmatites (unpublished).

<i>Host Rock</i>	<i>Brumado metadiorite</i>			<i>Ritapolis metagranitoid</i>			<i>Rio das Mortes amphibolite</i>		
	<i>Avg of 9</i>	<i>Range</i>	<i>Std deviation</i>	<i>Avg of 18</i>	<i>Range</i>	<i>Std deviation</i>	<i>Avg of 7</i>	<i>Range</i>	<i>Std deviation</i>
Al ₂ O ₃ (wt.%)	15.1	14.2-17.0	0.92	14.3	13.1-15.3	0.56	14.0	11.8-16.1	1.34
FeO (wt.%)	6.9	5.1-8.4	1.03	1.3	0.7-2.4	0.40	13.9	10.1-16.4	2.16
MnO (wt.%)	0.1	0.1-0.2	0.03	0.0	0.0-0.2	0.05	0.2	0.2-0.3	0.03
MgO (wt.%)	4.4	3.2-5.9	1.07	0.1	0.0-0.6	0.14	4.6	2.4-7.1	1.76
Zn (ppm)	85.6	65.0-125.0	20.53	53.6	18.0-77.8	15.14	316.9	260.0-452.0	72.24

[illegible]

FA06(4)	FA05(1)	FA05(3)	FA05(4)	Ritapolis Metagranitoid										Phyllites from the Rio de									
				FA05(5)	FA05(6)	FA05(7)	FA05(8)	FA07(1)	FA07(2)	FA07(3)	FA09(1)	FA09(2)	FA09(3)	FA09(4)	FA09(5)	FA09(6)	FA09(7)	FA09(8)	FA09(9)	FA09(10)			
55.04	55.71	54.60	54.12	55.81	55.53	55.35	55.92	55.82	56.22	56.45	55.54	55.98	56.03	56.08	56.19	56.37	56.17	56.26	56.08	55.93			
36.63	32.23	35.44	34.61	31.78	31.54	37.96	31.67	31.90	29.63	33.73	34.44	32.67	32.14	32.36	34.64	32.22	34.94	34.41	34.64	34.88			
8.12	10.20	8.12	9.19	10.74	11.12	5.87	10.65	11.28	13.36	10.26	9.07	10.72	11.33	11.29	8.97	10.90	8.85	9.09	9.11	9.12			
0.10	0.21	0.20	0.05	0.09	0.10	0.08	0.09	0.60	0.42	0.40	0.10	0.13	0.15	0.09	0.13	0.12	0.09	0.11	0.14				
0.15	0.34	0.30	0.20	0.40	0.40	0.21	0.43	0.27	0.27	0.34	0.37	0.29	0.38	0.42	0.37	0.33	0.31	0.36	0.37	0.36			
100.04	98.68	98.66	98.17	98.81	98.69	99.47	98.77	99.87	99.90	101.18	99.51	99.79	100.03	100.24	100.30	99.94	100.39	100.21	100.31	100.43			
15.73	15.98	15.78	15.74	16.00	15.94	15.90	16.03	15.81	15.88	15.83	15.88	15.91	15.88	15.88	15.92	15.97	15.91	15.95	15.90	15.85			
6.56	5.79	6.42	6.30	5.71	5.67	6.83	5.69	5.66	5.24	5.92	6.17	5.82	5.71	5.74	6.15	5.72	6.20	6.11	6.15	6.19			
0.27	0.02	0.22	0.26	0.00	0.06	0.10	0.00	0.19	0.12	0.17	0.12	0.09	0.12	0.12	0.08	0.03	0.09	0.05	0.10	0.15			
1.38	2.06	1.45	1.64	2.18	2.21	1.10	2.17	2.07	2.55	1.87	1.72	2.08	2.16	2.14	1.73	2.17	1.69	1.78	1.73	1.68			
0.04	0.08	0.07	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.21	0.15	0.14	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05			
0.03	0.07	0.06	0.04	0.08	0.08	0.04	0.09	0.05	0.05	0.07	0.08	0.06	0.08	0.09	0.08	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07			
82.67	72.41	80.21	79.51	71.32	70.90	85.38	71.31	70.72	65.52	74.04	77.10	72.72	71.34	71.73	76.87	71.49	77.51	76.40	76.90	77.40			
0.00	0.95	0.33	0.00	0.41	0.45	0.28	0.41	2.16	1.79	1.54	0.45	0.58	0.67	0.40	0.58	0.58	0.54	0.40	0.49	0.61			
16.49	25.76	18.10	19.73	27.25	27.61	13.71	27.17	25.90	31.92	23.33	21.50	25.96	27.02	26.80	21.61	27.08	21.17	22.28	21.66	21.06			
0.39	0.10	0.78	0.53	0.03	0.35	0.54	0.00	0.69	0.68	0.86	0.75	0.54	0.73	0.77	0.47	0.16	0.54	0.29	0.62	0.92			
0.46	0.00	0.58	0.23	0.00	0.00	0.08	0.00	0.53	0.09	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02			
0.00	0.78	0.00	0.00	1.00	0.68	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.24	0.29	0.47	0.68	0.25	0.63	0.32	0.00			

as Mortes Metavolcano-sedimentary Sequence

FA09(13)	FA09(16)	FA09(37)	FA09b(1)	FA09b(2)	FA09b(3)	FA09b(4)	FA09b(5)	FA09b(6)	FA09b(7)	FA09b(8)	FA09b(9)	FA11(1)	FA11(2)	FA11(3)	FA11(4)	FA11(5)	FA11(6)	FA11(7)	FA11(8)	FA11(9)
55.85	55.85	56.18	56.22	56.00	56.02	56.62	56.93	56.41	55.81	56.78	56.59	55.62	56.13	55.79	56.13	55.86	55.78	56.52	55.79	55.91
34.76	34.76	34.39	32.01	31.65	31.99	32.63	32.80	31.96	31.87	31.82	32.69	31.34	29.83	31.13	30.28	30.04	30.70	31.58	30.70	30.87
9.10	9.25	9.26	11.07	11.39	11.19	11.17	10.77	11.15	11.12	11.03	11.05	11.61	13.47	12.37	12.86	13.22	12.60	12.16	12.42	12.77
0.10	0.12	0.12	0.13	0.12	0.14	0.11	0.12	0.12	0.10	0.46	0.12	0.37	0.42	0.42	0.40	0.42	0.35	0.34	0.35	0.43
0.39	0.32	0.43	0.38	0.36	0.42	0.38	0.40	0.39	0.39	0.29	0.38	0.27	0.33	0.28	0.32	0.26	0.32	0.29	0.28	0.25
100.20	100.30	100.37	99.80	99.51	99.75	100.90	101.01	100.02	99.29	100.37	100.83	99.20	100.18	99.99	99.99	99.80	99.75	100.90	99.55	100.23
15.87	15.85	15.91	15.96	15.94	15.92	15.91	15.97	15.97	15.93	15.97	15.92	15.86	15.82	15.79	15.86	15.81	15.82	15.85	15.85	15.78
6.19	6.18	6.10	5.69	5.64	5.69	5.74	5.76	5.67	5.70	5.61	5.76	5.60	5.27	5.52	5.36	5.33	5.45	5.55	5.46	5.46
0.13	0.15	0.09	0.04	0.06	0.08	0.09	0.03	0.03	0.07	0.03	0.08	0.14	0.18	0.21	0.14	0.19	0.18	0.15	0.15	0.22
1.70	1.71	1.77	2.19	2.24	2.17	2.14	2.11	2.21	2.18	2.17	2.12	2.21	2.52	2.27	2.43	2.47	2.36	2.27	2.35	2.34
0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.16	0.04	0.13	0.15	0.15	0.14	0.15	0.13	0.12	0.13	0.15
0.08	0.07	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.08	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06	0.05
77.31	77.24	76.25	71.13	70.54	71.16	71.80	72.04	70.84	71.24	70.08	71.99	69.98	65.84	68.98	66.97	66.59	68.17	69.35	68.29	68.22
0.45	0.42	0.54	0.58	0.54	0.63	0.49	0.53	0.54	0.45	2.05	0.53	1.50	1.60	1.28	1.70	1.38	1.26	1.32	1.35	1.18
21.24	21.41	22.12	27.32	28.00	27.14	26.75	26.42	27.63	27.31	27.15	26.52	27.66	31.46	28.42	30.43	30.87	29.44	28.41	29.42	29.23
0.84	0.82	0.57	0.28	0.38	0.53	0.55	0.19	0.19	0.42	0.19	0.52	0.69	0.84	0.71	0.81	0.66	0.82	0.73	0.71	0.63
0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.28	0.60	0.09	0.50	0.31	0.19	0.22	0.74
0.15	0.00	0.52	0.69	0.54	0.54	0.41	0.82	0.81	0.58	0.55	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Amphibolites from the Rio das Mortes Metavolcano-sedimentary Sequence

Appendix 2 - SEM/EDS data from gahnite of the São João del Rei Pegmatitic Province

Host Rock																	
Brumado Metadiorite																	
Sample Name (analysis)																	
Wt. % oxide	FA02 EDS (1)	FA02 EDS (2)	FA02 EDS (3)	FA02 EDS (4)	FA02 EDS (6)	FA02 EDS (7)	FA02 EDS (9)	FA02 EDS (10)	FA02 EDS (11)	FA02 EDS (12)	FA03 EDS (1)	FA03 EDS (2)	FA03 EDS (3)	FA03 EDS (4)	FA03 EDS (8)	FA03 EDS (9)	FA03 EDS (10)
Al ₂ O ₃	52.6	54.3	53.9	53.4	53.4	54.9	54.9	53.0	56.4	52.7	54.3	54.3	51.9	56.4	55.7	53.6	54.1
ZnO	40.6	38.8	38.8	39.5	39.5	38.6	38.6	39.2	36.7	39.7	37.0	37.3	39.1	34.2	36.1	37.0	37.1
FeO	6.8	7.0	7.2	7.1	7.1	6.5	6.5	7.7	6.9	7.5	7.9	7.7	8.3	8.6	8.2	8.6	8.2
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.5	0.3	0.0	0.3	0.3
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.4	0.0	0.5	0.2
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Atomic proportions (oxygen basis 32)																	
Al	15.2	15.6	15.5	15.4	15.4	15.7	15.7	15.3	16.1	15.3	15.5	15.5	15.0	16.0	15.9	15.4	15.5
Zn	7.4	7.0	7.0	7.1	7.1	6.9	6.9	7.1	6.5	7.2	6.6	6.7	7.1	6.1	6.5	6.7	6.6
Fe ³⁺	0.8	0.4	0.5	0.6	0.6	0.3	0.3	0.7	0.0	0.7	0.5	0.5	1.0	0.0	0.1	0.6	0.5
Fe ²⁺	0.6	1.0	1.0	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	1.4	0.8	1.1	1.1	0.7	1.7	1.5	1.1	1.2
Mg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
Endmembers (mol %)																	
Ghn	96.6	89.5	90.2	92.6	92.6	88.1	88.1	92.7	82.4	94.4	82.9	83.7	91.6	75.9	81.3	84.1	83.9
Spl	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
Hc	3.4	10.5	9.8	7.4	7.4	11.9	11.9	7.3	17.6	5.6	14.2	13.7	5.5	21.7	18.7	13.1	13.9
Jac	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.7	0.8	0.0	0.0	1.2	0.6
Mfr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.8	2.2	0.0	0.0	1.6	1.6
Glx	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Ritapolis Metagranitoid

FA03 EDS (11)	FA03 EDS (12)	FA03 EDS (13)	FA03 EDS (14)	FA03 EDS (15)	FA03 EDS (16)	FA06 EDS (1)	FA06 EDS (2)	FA06 EDS (3)	FA06 EDS (4)	FA05 EDS (1)	FA05 EDS (2)	FA05 EDS (3)	FA05 EDS (4)	FA05 EDS (5)	FA05 EDS (6)	FA05 EDS (7)	FA05 EDS (8)
53.2	54.3	54.5	52.7	54.1	52.7	57.2	56.3	56.4	55.8	56.6	55.9	54.6	56.9	55.5	54.0	53.5	52.7
38.2	37.6	37.5	39.1	37.5	38.5	32.1	32.8	35.8	35.8	32.8	33.0	39.6	32.6	34.1	35.1	38.8	38.7
8.6	8.1	8.1	8.2	8.1	8.8	10.7	10.9	7.8	8.4	10.1	10.7	5.8	10.1	9.7	10.2	7.3	8.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.6	0.4	0.6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
15.3	15.6	15.6	15.2	15.5	15.2	16.2	16.0	16.0	15.9	16.0	15.9	15.7	16.1	15.7	15.4	15.4	15.2
6.9	6.8	6.7	7.1	6.7	7.0	5.7	5.8	6.4	6.4	5.8	5.9	7.1	5.8	6.0	6.3	7.0	7.0
0.7	0.4	0.4	0.8	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3	0.0	0.3	0.6	0.6	0.8
1.1	1.2	1.3	0.9	1.2	1.0	2.2	2.2	1.6	1.6	2.0	2.0	0.9	2.0	1.7	1.5	0.9	0.8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.1	0.2
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
89.8	86.7	86.2	93.1	85.8	91.4	72.5	73.0	80.3	80.3	73.1	73.5	90.8	73.1	75.6	79.1	89.3	89.6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0
10.2	13.3	13.8	6.9	12.9	8.6	27.5	27.0	19.7	19.7	25.6	25.6	9.2	25.8	21.3	18.1	9.0	7.7
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.9	1.8	2.7
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.2	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0

[illegible]

Phyllites from the Rio das Mortes Metavolcano-sedimentary Sequence

[illegible]

Amphibolites from the Rio das Mortes Metavolcano-sedimentary Sequence

FA09b EDS (31)	FA09b EDS (32)	FA09b EDS (33)	FA09b EDS (34)	FA09b EDS (35)	FA09b EDS (37)	FA09b EDS (39)	FA11 EDS (X)	FA11 EDS (1)	FA11 EDS (2)	FA11 EDS (3)	FA11 EDS (4)	FA11 EDS (5)	FA11 EDS (6)	FA11 EDS (7)	FA11 EDS (8)	FA11 EDS (9)
54.7	54.2	54.3	53.7	54.9	54.5	55.4	56.5	55.9	56.7	56.0	56.2	56.1	56.8	55.9	56.4	56.8
33.2	34.2	36.4	36.8	35.7	36.2	35.2	34.5	32.4	29.8	31.0	30.5	30.9	30.4	31.6	31.1	30.5
11.2	10.9	8.7	8.8	8.8	8.7	8.8	9.0	10.9	12.3	11.9	12.4	12.2	12.0	11.7	11.7	11.8
0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9
0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
15.6	15.5	15.6	15.4	15.7	15.6	15.8	16.0	15.8	15.9	15.8	15.8	15.8	16.0	15.8	15.9	16.0
5.9	6.1	6.5	6.6	6.4	6.5	6.3	6.1	5.7	5.3	5.5	5.4	5.4	5.4	5.6	5.5	5.4
0.4	0.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.1	0.0
1.8	1.7	1.3	1.2	1.4	1.3	1.6	1.8	2.0	2.4	2.2	2.3	2.2	2.4	2.1	2.2	2.3
0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73.9	77.1	82.2	84.3	79.8	81.3	78.4	77.3	71.6	65.7	68.4	67.4	68.1	67.0	69.9	68.5	67.1
0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.0	2.3	3.3	3.2	2.5	2.6	3.2	2.2	2.9	3.7
22.9	20.4	15.8	13.8	18.1	16.4	19.4	22.7	24.9	30.0	27.2	29.1	28.1	29.6	26.6	27.9	28.9
1.1	1.3	1.0	1.2	1.1	0.9	1.1	0.0	0.0	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.6	1.1	1.0	0.7	1.0	1.3	0.3	0.0	1.2	0.0	0.3	1.0	1.2	0.2	1.3	0.7	0.3
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figure 1

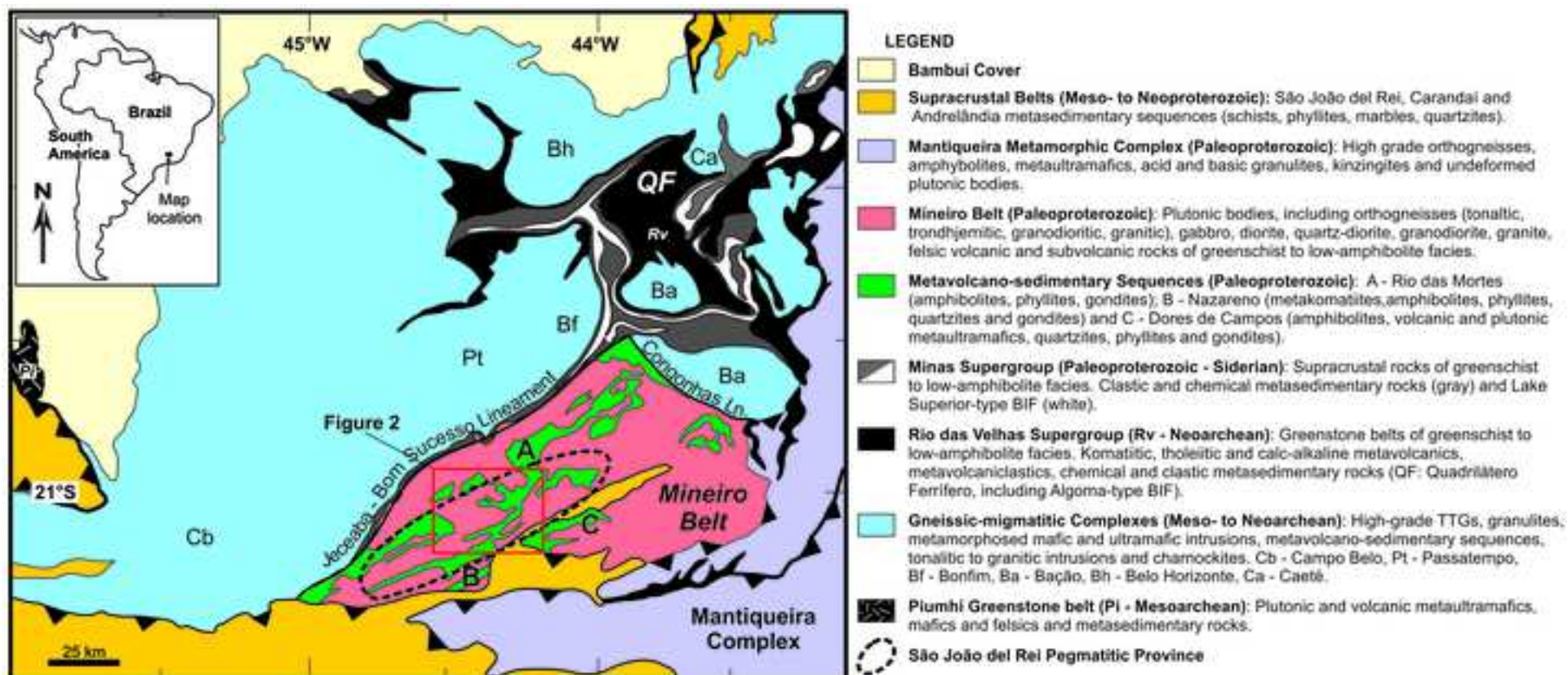
[Click here to download Figure Figure1_new.jpg](#)


Figure 2

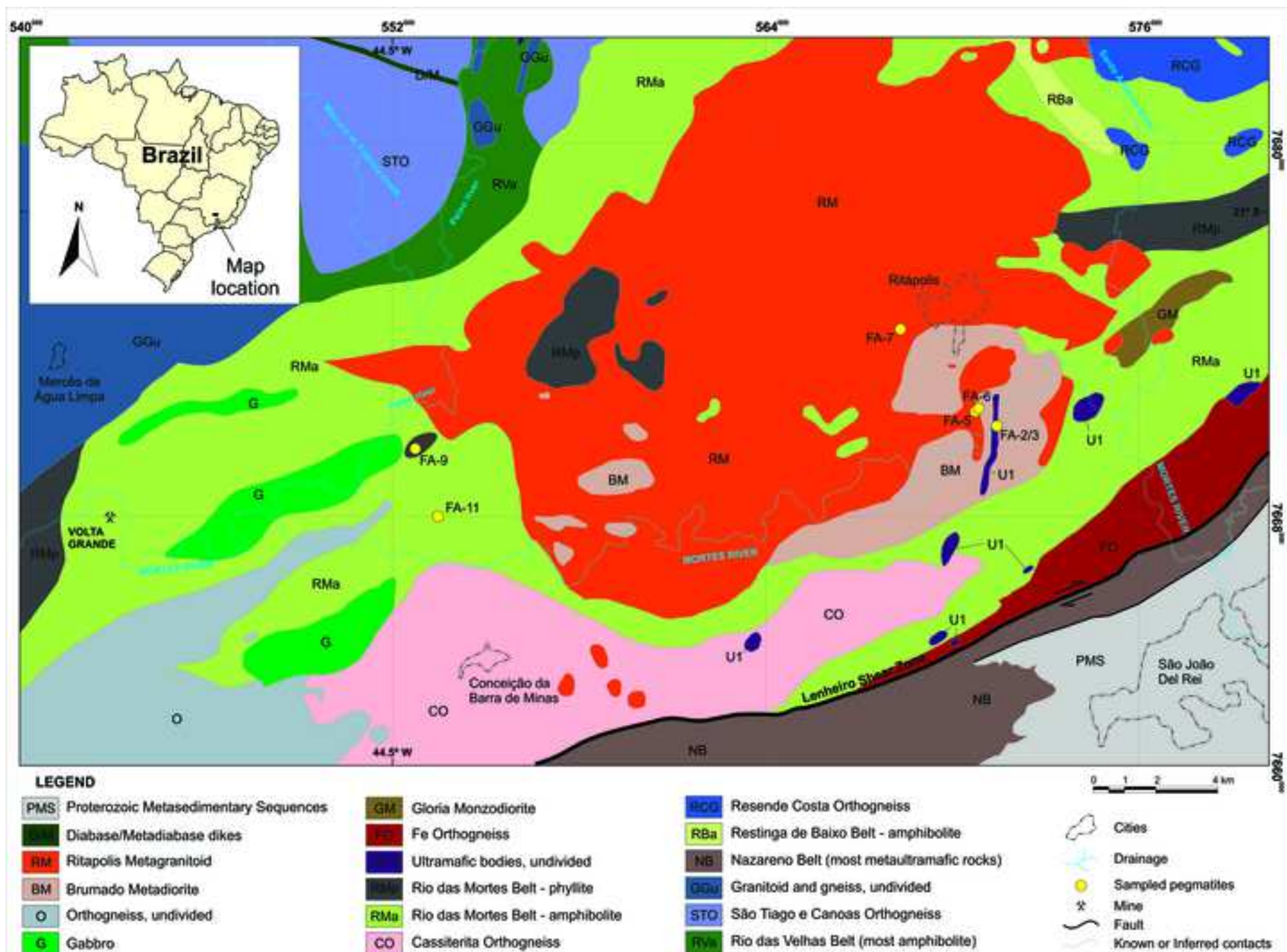
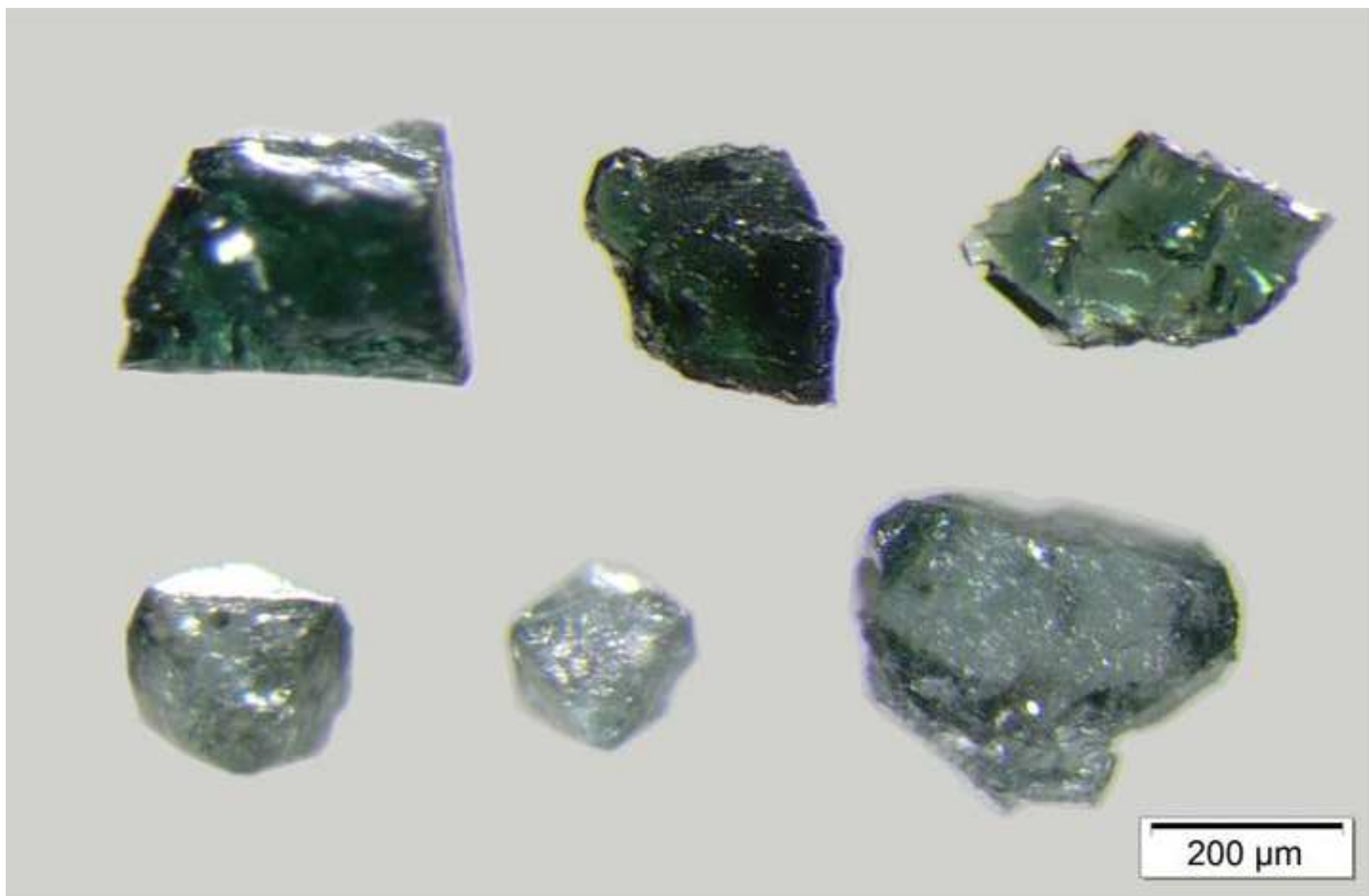
[Click here to download Figure Figure2_new.jpg](#)


Figure 3



Figure 4



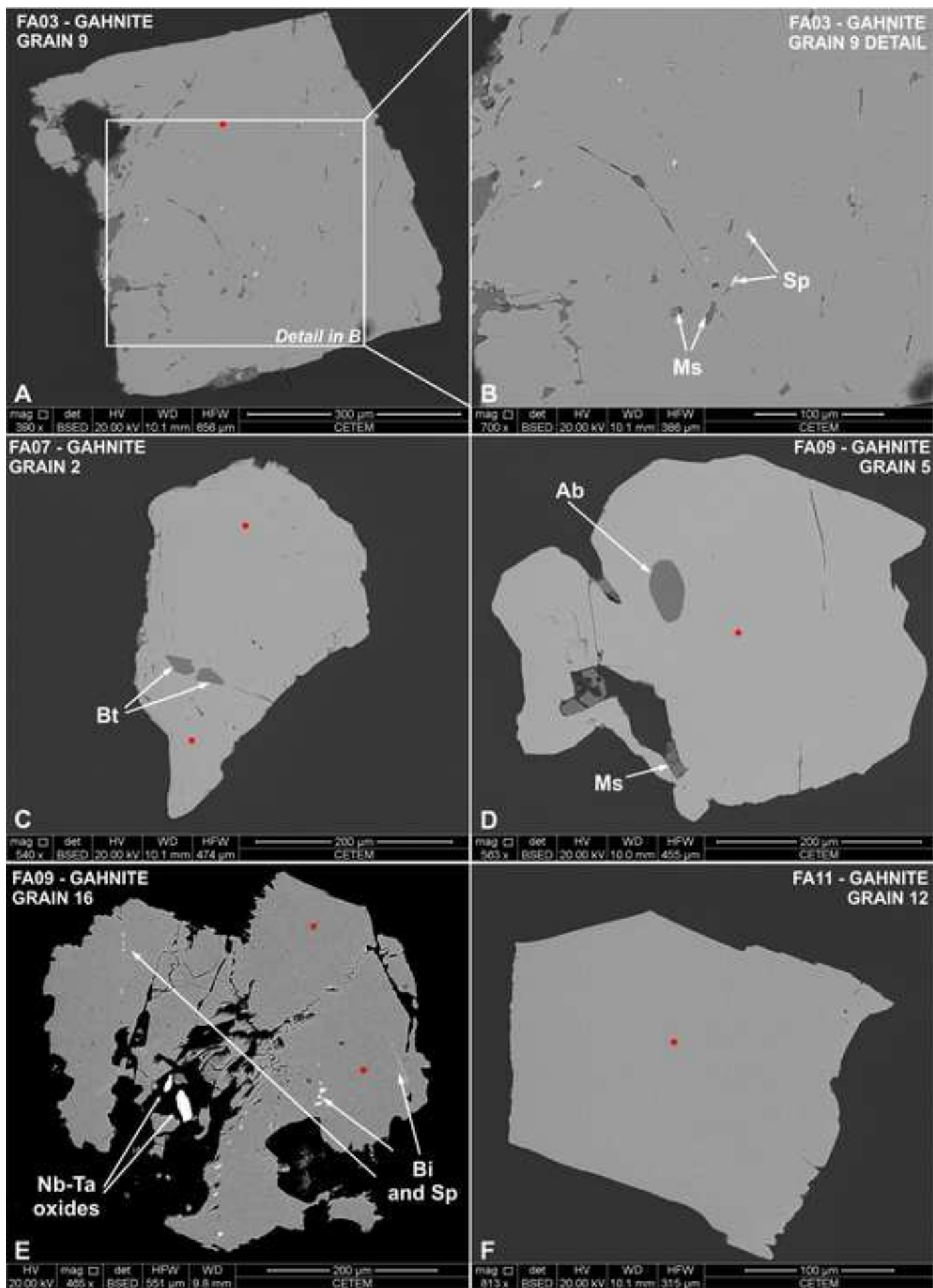


Figure 6

[Click here to download Figure6_new.jpg](#)

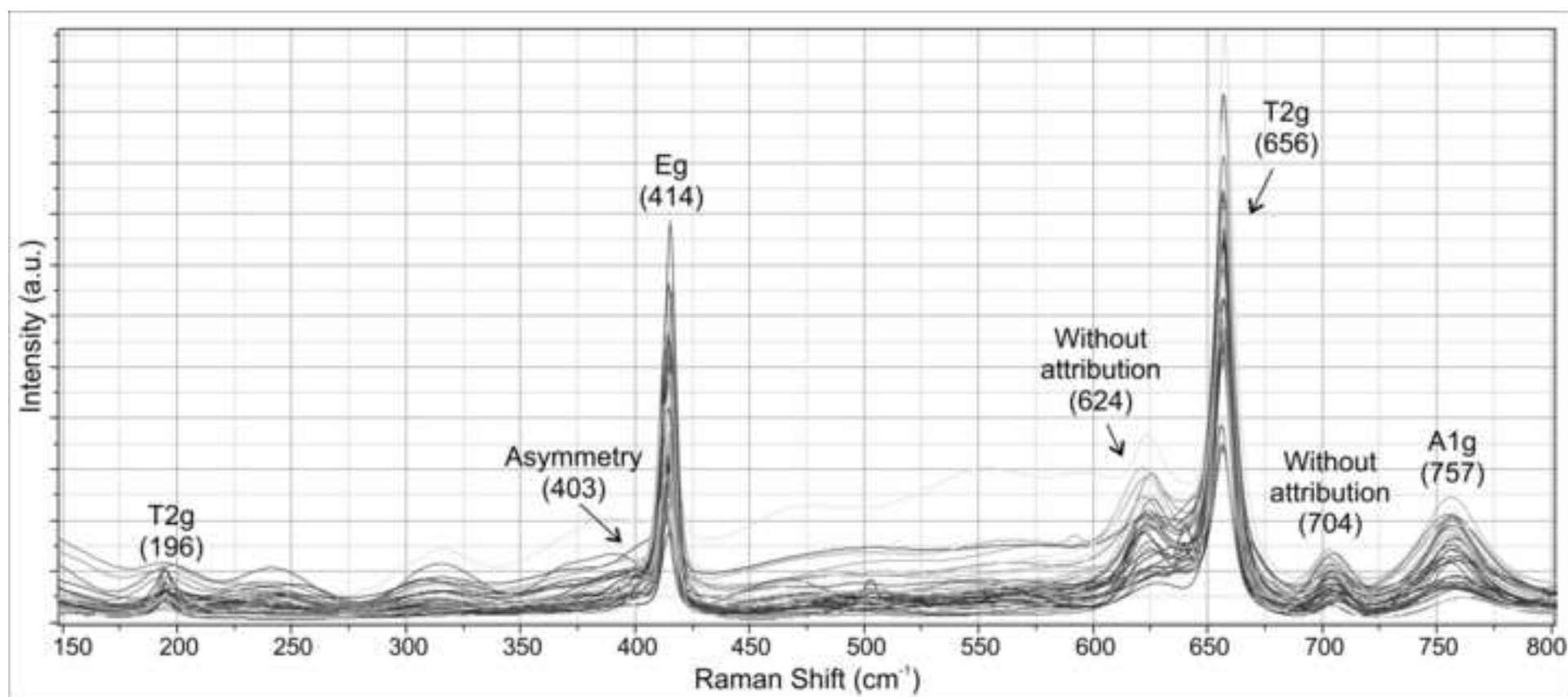


Figure 7

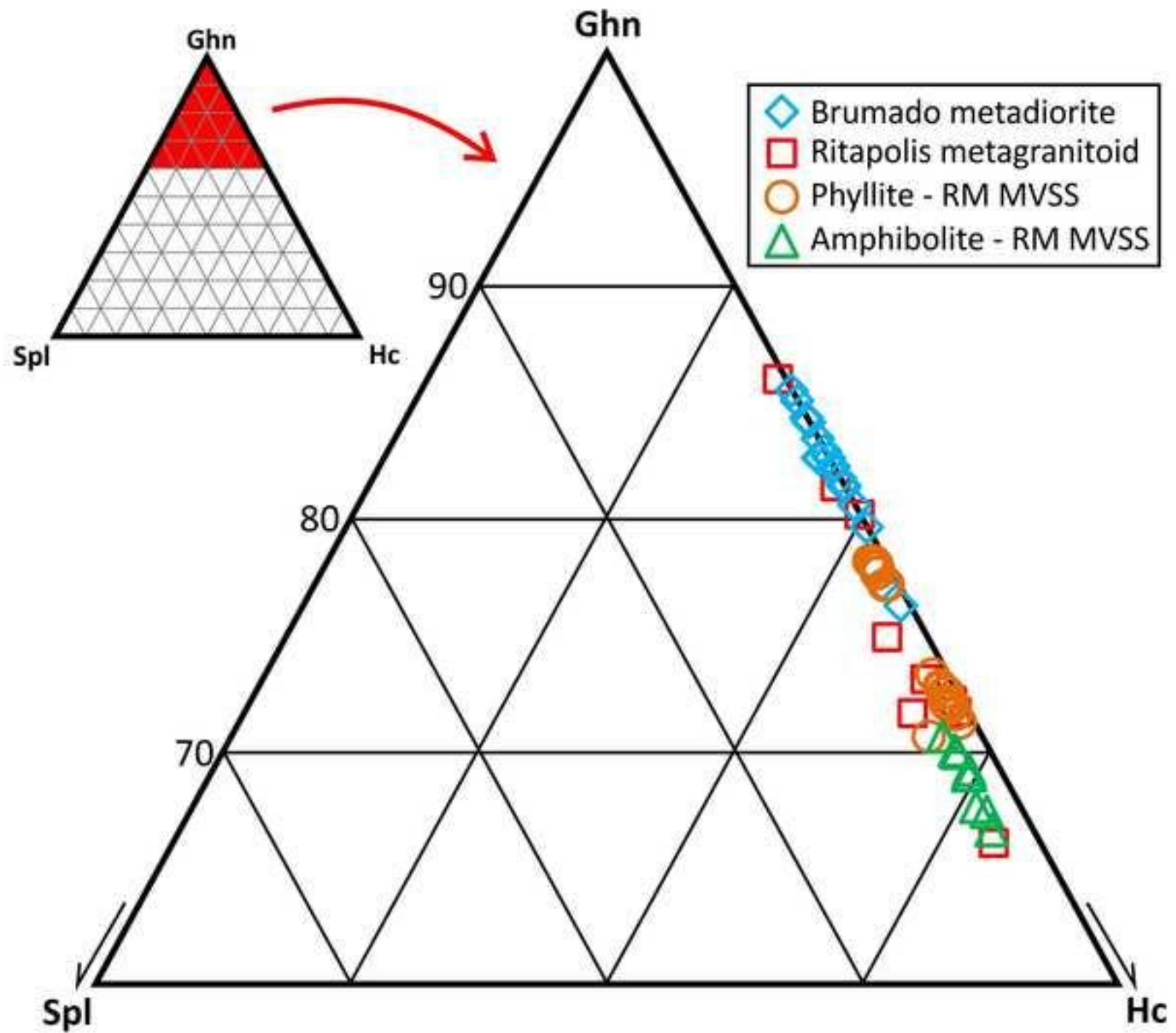


Figure 8

[Click here to download Figure8_new.jpg](#)

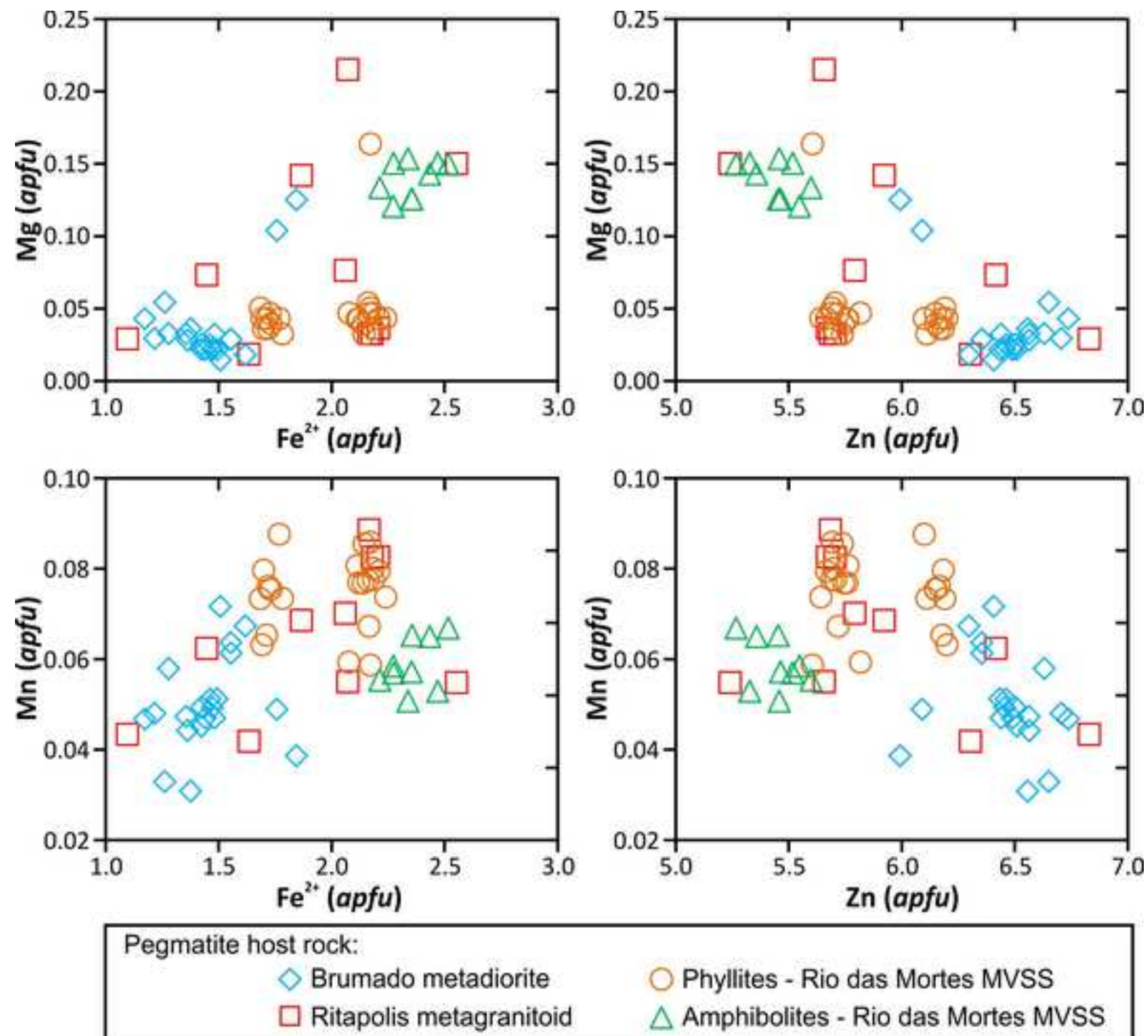


Figure 9

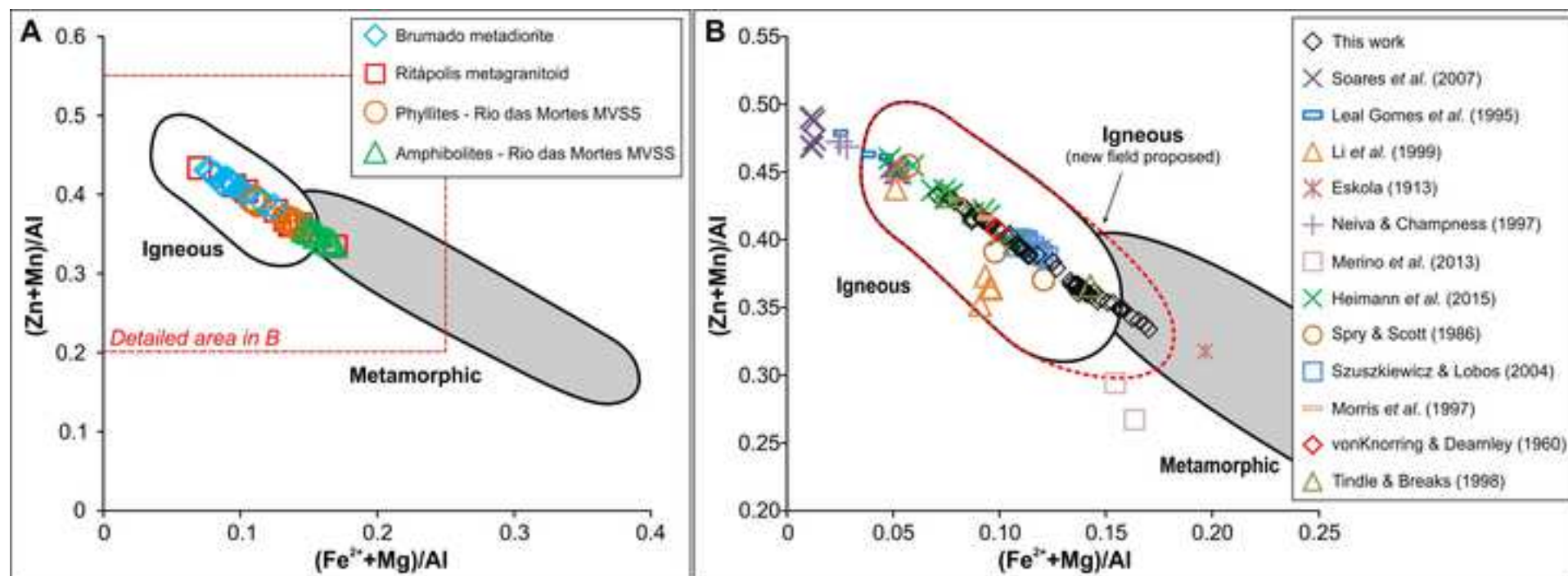


Figure 10

