



Faculdade de Geologia



Universidade Federal do Pará



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMILA SANTOS DA FONSECA

APATITA COMO INDICADOR DE GRANITOS ESTANÍFEROS DO SUDESTE DO PARÁ

BELÉM, PARÁ
2016

CAMILA SANTOS DA FONSECA

APATITA COMO INDICADOR DE GRANITOS ESTANÍFEROS DO SUDESTE DO
PARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Geologia da Universidade Federal
do Pará – UFPA, em cumprimento
às exigências para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Nery
Lamarão.

BELÉM
2016

CAMILA SANTOS DA FONSECA

APATITA COMO INDICADOR DE GRANITOS ESTANÍFEROS DO SUDESTE DO
PARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geologia
da Universidade Federal do Pará –
UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia.

Data de Aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Claudio Nery Lamarão - Orientador
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Paulo Sergio de Souza Gorayeb - Membro
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Hilton Tulio Costi - Membro
Doutor em Geologia e Geoquímica
Museu Paraense Emílio Goeldi

Aos meus pais e irmãos, meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

- À Deus, que gerou este mundo me proporcionando a possibilidade de estudá-lo e por estar sempre presente em minha vida.
- À Universidade Federal do Pará pelo apoio e infraestrutura.
- Ao Laboratório de Microanálise, do Instituto de Geociências da UFPA.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão, por sua dedicação ao magistério, sendo uma referência para mim como pesquisador pela sua dedicação, competência e conhecimento. Obrigada pela confiança, orientação e dedicação, sem as quais esse trabalho jamais seria feito.
- À Msc. Gisele Tavares Marques, bolsista DTI Geociam-operadora da microssonda;
- À Química Industrial Ana Paula Picanço Corrêa e a Msc. Vivian Mariana Miranda Cardoso de Araújo, técnicas e operadoras do MEV do Laboratório Microanálises;
- Aos meus pais, Ana Maria Santos da Fonseca e Carlos Alberto R. da Fonseca por todo apoio e dedicação aos meus estudos, incentivadores invictos nos momentos de dificuldade. Aos meus irmãos, Gaius F. S. da Fonseca e Livio S. da Fonseca pela paciência, orientação, apoio, momentos de leitura e parceria, formadores da minha base junto aos meus pais.
- Aos amigos, Helder Tadeu (Rod), Rafael Guimarães, Arthur Aragão, Camilla Brito, Taynan Abnassiff e Junior Moura, assim como todos os amigos não citados, mas que sabem do apreço que tenho pela amizade conquistada durante o curso de graduação e que me ajudaram na realização desse projeto, com orientação, incentivo e apoio, em especial ao meu melhor amigo Rômulo Amaral.
- Aos meus melhores amigos, pela amizade conquistada para vida toda: Luís Carlos (Cebola), Fábio Reis, Luiz Verissimo, João Acioli, Márcio Pantoja, Hiroshi No, Ricciardo Cei, Victor Correia, Laércio Souza, Halime Akel, Tuani Ladeira e Marina Nascimento.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”

Albert Einstein

RESUMO

A apatita é um mineral acessório comum em todos os tipos de rochas e inclui na sua estrutura uma grande variedade de elementos traço, tornando esse mineral um importante indicador para a compreensão geoquímica do ambiente em que se formaram, assim como, permite buscar informações importantes a respeito da rocha fonte e das condições reinantes durante o processo de cristalização, como a fugacidade de oxigênio e aluminosidade do magma. Devido a sua capacidade de incorporar em sua estrutura importantes elementos traço como Na, K, Mn, F, Cl, Sr, Pb, Th, U, V, As, S, Y, além de elementos do grupo dos terras raras, a apatita é descrita como um importante mineral resistato indicador (RIM- *Resistate Mineral Indicator*) com potencial para exploração de depósitos minerais. O Granito Antônio Vicente (1,88 Ga) integra juntamente com outros corpos mineralizados, a Província Estanífera do Sul do Pará. Nesse contexto, a apatita da porção mineralizada foi analisada através do método de MEV-EDS, apresentando enriquecimento em Rb, Sr, Y, F e ETRP e empobrecimento em Ca, exibindo relação direta com as condições do ambiente de cristalização e a percolação dos fluidos tardi a pós-magmáticos que geraram a mineralização. Cristais de apatita foram imageados em ERE, sendo possível identificar feições internas importantes como zoneamentos, inclusões e feições indicativas de alteração. Em comparação, foram utilizadas apatitas dos granitos Redenção e Jamon (1,88 Ga), São Jorge Jovem (1,89 Ga) e das rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria (2,87 Ga) que apresentaram morfologia e composições distintas das apatitas do Granito Antônio Vicente. As apatitas estudadas são geralmente euédricas ou subédricas, com inclusões de outros minerais e zonadas, tendo em sua composição enriquecimento em Ca e empobrecidas em elementos terras raras (ETR) em relação às fácies mais evoluídas.

Palavras-chaves: Apatita. Granitos estaníferos. MEV-EDS. Mineral resistato indicador (RIM- *Resistate Indicator Mineral*). Elétrons retroespalhados (ERE).

ABSTRACT

Apatite is one of the most common accessory minerals. It takes part in the structure of all types of rocks, mainly on their trace elements. Because of that, apatite is an important indicative in geochemistry comprehensiveness of the earth it occurs. In addition, it provides significant information regarding the source rock and its remaining conditions during the crystallization process – such as oxygen fugacity and magma luminosity. Due to its capacity of incorporating important elements such as Na, K, Mn, F, Cl, Sr, Pb, Th, U, V, As, S, Y in its structure as well as rare earth elements, apatite is described as a mineral with potential for exploitation of mineral deposits. Geochemical signature of tin granites was prepared using the apatite chemical and morphologic characteristics to compose a set of Resistate Indicator Mineral (RIM). Among other mineralized plutons, the Antônio Vicente Granite (1,88 Ga) integrates the South Tin Province of Pará. In this regard, apatites from mineralized facies were analyzed through the MEV-EDS method. The results showed richness of Rb, Sr, Y, F and ETRP and lower content of Ca. This expresses direct relation with conditions of crystallization and late fluid percolation of post-magmatic that generated the mineralization. Back cattered images of apatite were done in MEV, which made possible to identify important internal features of the mineral such as zoning, inclusions and alteration indicative features. To compare the results, this study used: Redenção Granite and Jamon Granite (1,88 Ga), São Jorge Jovem Granite (1,88 Ga) and finally Suíte Sanukitoide Rio Maria (2,87 Ga). Each one of the granites presented a different morphology than the Antônio Vicente's apatite. Usually they are euhedral to subhedral, with other mineral inclusions as well as zoned. Also presenting in its composition Ca enrichment and low traces of rare earth elements in relation to the most developed facies.

Key words: Apatite. Tin granites. MEV-EDS. Resistate Indicator Mineral (RIM). Mirrored retro-electrons.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- A) Imagens de ERE mostrando cristais euédricos de apatita. B) Análises pontuais de EDS (números em vermelho). C) Difratograma da análise de EDS do ponto 1. 20
- Figura 2- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico delimitadas segundo Tassinari e Macambira, (2004), com indicação das áreas utilizadas neste trabalho. 24
- Figura 3- Mapa geológico simplificado da Província Carajás, mostrando os limites aproximados entre os Domínios Rio Maria e Carajás e entre o Subdomínio de Transição e a Bacia Carajás. Notar extensa distribuição de rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria (compilado de FEIO, 2011). GSJ= Granito São João; GS= Granito Seringa; GB= Granito Bannach; GJ= Granito Jamon. 27
- Figura 4- (a) Esboço do Cráton Amazônico com a localização aproximada da Província Carajás. (b) Mapa geológico simplificado das suítes graníticas paleoproterozóicas do Cráton Amazônico (modificado de DALL'AGNOL *et al.*, 2005) mostrando a localização dos granitos Antônio Vicente, Jamon e Redenção. RX= região do Xingu; DRM=Domínio Rio Maria; BC=Bloco Carajás. 30
- Figura 5- Mapa geológico da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, mostrando as áreas de ocorrência dos granitos São Jorge Antigo e São Jorge Jovem com suas respectivas idades de cristalização, e do depósito de ouro São Jorge. Modificado de Lamarão *et al.*, (2002). 32
- Figura 6- Fotomicrografias dos BASMG. A) Cristal de plagioclásio alterado por sericita e argilominerais. B) Cristal subédrico de anfibólio alterado para biotita e inclusão de apatita. C) Seção basal de anfibólio sendo alterada para biotita ao longo dos planos de clivagem, contendo inclusões de apatita e minerais opacos. D) Cristais de fluorita em porções mais alteradas da rocha; anfibólio alterado e plagioclásio intensamente saussuritizado ocorrem associados. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 36
- Figura 7- Fotomicrografias dos BMG. A) Cristal subédrico de feldspato-alcálico com intercrescimento micropertítico; cristal de plagioclásio pouco alterado; cristal anédrico de quartzo. B) Cristal subédrico de biotita cloritizado. C) Cristal subédrico de biotita intersticial aos demais minerais. D) Aspectos texturais da rocha, composta pelos cristais de feldspato-alcálico, plagioclásio, quartzo e biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 37
- Figura 8- Fotomicrografias dos BSG e BSGA. A) Cristal subédrico de feldspato-alcálico pertítico alterado para argilominerais; cristal subédricos de plagioclásio zonado, alterado para sericita e argilominerais; cristal anédrico de quartzo. B) Cristais subédricos de anfibólio intensamente transformados para biotita e clorita; inclusões de opacos aparecem dispersas. C) Cristal subédrico de biotita alterada para clorita e intersticial ao plagioclásio e quartzo. D) Pseudomorfos de anfibólio com inclusões de fluorita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 39
- Figura 9- Aspectos petrográficos dos BMG. A) Textura granular hipidiomórfica característica, com a presença de cristais de plagioclásio, quartzo e microclina. B) Cristais subédricos e subarredondados de apatita inclusos na biotita; minerais opacos aparecem associados. C)

Cristais de biotita e anfibólio associados, conjunto comum de minerais máficos. D) Cristais de anfibólio alterados para biotita com inclusões de apatita e titanita. E) Presença de titanita anédrica associada à clorita. F) Cristais anédricos de titanita como mineral acessório. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 41

Figura 10- Fotomicrografia dos LMG. A) Rocha de textura hipidiomórfica, composta por biotita, plagioclásio, quartzo e feldspato potássico. B) Cristais de biotita cloritizado em associação aos minerais opacos. C) Associação de minerais máficos na rocha, representado por clorita, titanita e opacos. D) Cristais de titanita e muscovita como minerais acessórios. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 43

Figura 11- Aspectos petrográficos dos ABMG. A) Cristal subédrico de feldspato-alcálico com intercrescimento mimerquítico; cristal subédrico de plagioclásio zonado e com alteração de sericita. B) Minerais ferromagnesianos de biotita e anfibólio, com inclusões de titanita. C) Cristal subédrico de anfibólio intensamente alterado. D) Associação de minerais máficos. ... 45

Figura 12- Fotomicrografias dos BMG. A) Aspectos texturais dos cristais de microclina, plagioclásio e quartzo. B) Cristais finos de quartzo bordejando o plagioclásio, sericitizado e bem desenvolvido C) Cristal subédrico de biotita com inclusão de apatita. D) Inclusões de apatita bem formadas em cristal de biotita. D) Inclusões de opacos em cristal anédrico de biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 46

Figura 13- Feições petrográficas da Suíte Sanukitoides Rio Maria. A) Cristais subédricos de plagioclásio alterado e zonado; cristais anédricos de quartzo, fraturado e com feições de recristalização. B) inclusões de apatita prismática em cristal de anfibólio, principal fase máfica dos sanukitoides C) Cristal euédrico de epidoto, zonado e em associação a cristais de anfibólio e biotita. D) Cristal de epidoto magmático. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 48

Figura 14- Fotomicrografias dos ABMG. A) Cristal subédrico de plagioclásio zonado e saussuritizado. B) Textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterado, microclina, quartzo, biotita e titanita. C) Cristal subédrico de biotita cloritizado. D) Cristais de anfibólio alterados para biotita, clorita e mostrando inclusões de apatita. E) Cristal euédrico de titanita ainda com feição magmática. F) Cristal subédrico e subarredondado de zircão incluído em biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 50

Figura 15- Fotomicrografias dos BMG. A) Cristais subédricos de biotita e plagioclásio, este alterado para argilominerais. B) Cristal subédrico de plagioclásio zonado. C) Textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterado, feldspato-alcálico, quartzo. D) Cristal de biotita cloritizado e com inclusões de apatita e opacos. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). 52

Figura 16- Imagens de cristais de apatita em luz transmitida. A) Cristais euédricos de apatita incluídos em minerais opacos (BASM). B) Cristais euédricos a subédricos de apatita incluídos em anfibólio. C) Cristais de apatita incluídos em biotita (BMG). D) Cristal anédrico de apatita incluído em biotita cloritizada, na fácies BSGA. 53

Figura 17- Imagens de ERE de cristais de apatita. A) Apatita pertencente à fácies BASMG, na forma de prismas hexagonais, bem desenvolvidos e pouco fraturados. B) Cristais de apatita da fácies BASMG inclusa em cristais de ilmenita. C) Apatita dos BMG, com forma subédrica, porém com tamanhos inferiores ao das rochas anteriores. D) Cristal subédrico de apatita com inclusões de mineral mais luminescente (não identificado). E) Cristal subarredondado de apatita com borda mais clara, sugerindo zoneamento composicional nos BSG. F) Cristal subarredondado de apatita inclusa em biotita nos BSG; finas inclusões luminescentes (não identificadas) são comuns..... 55

Figura 18- Imagens em luz transmitida de cristais de apatita. A) Apatita com formas subédricas inclusas em cristais grossos de biotita bem preservada (fácies ABMG, Granito Jamon). B) Cristais subédricos de apatita inclusos em plagioclásio (BMG, Gr. Jamon). C) Cristais prismáticos e aciculares de apatita inclusos em anfibólio, biotita e minerais opacos (BMG, Gr. Redenção). D) Cristais anédricos fraturados de apatita inclusos em biotita cloritizada (LMG, Granito Redenção)..... 57

Figura 19- Imagens de ERE de cristais de apatita dos granitos Jamon e Redenção. A) Cristais euédrico a subédricos de apatita inclusos em biotita (ABMG, Granito Jamon). B) Cristal subédrico de apatita zonado (ABMG, Granito Jamon). C) Cristais subédricos de apatita com inclusos em biotita e plagioclásio (BMG, Granito Redenção). D) Cristais de apatita subédricos e anédricos, inclusos em biotita cloritizada (LMG, Granito Redenção). 58

Figura 20- Imagens de cristais de apatita em luz transmitida inclusos em anfibólio (A) e biotita cloritizada (B)..... 59

Figura 21- Imagens de ERE de cristais de apatita do sanukitoide Rio Maria. A) Cristais subédricos bem desenvolvidos. B) Cristais anédricos de apatita inclusos em anfibólio. C) Cristais subarredondados com bordas irregulares. D) Cristais anédricos de apatita no contato entre plagioclásio saussuritizado e anfibólio alterado. 59

Figura 22- Cristais de apatita em petrografia pertencentes ao GSJJ. A) Cristais subédricos de apatita inclusos em plagioclásio (ABMG). B) Apatita subédrica e subarredondada inclusa em cristais clorita. C) Cristais euédricos e subédricos inclusos em cristais de anfibólio. D) Apatita subédrica localizada no contato com cristais de titanita. E) Apatita subédrica associada a minerais máficos de titanita e minerais opacos. F) Apatita anédrica inclusa em biotita intensamente cloritizada (BMG). 61

Figura 23- Imagens de ERE de cristais de apatita do Granito São Jorge Jovem. A) Apatitas subédricas inclusas em cristais de biotita e plagioclásio (ABMG) B) Cristais de apatita apresentando espessamento das fraturas e bordas irregulares. C) Cristais subédricos de apatita com textura rugosa (BMG) D) Apatitas inclusas em biotita com porções fragmentadas (BMG). 62

Figura 24- Diagrama Ca x P (%peso) das apatitas estudadas. 67

Figura 25- Diagrama Rb x Y (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) são colocadas para comparação. 68

Figura 26- Diagrama Rb x Sr (%peso) das apatitas das rochas estudadas. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) são colocadas para comparação.	69
Figura 27- Diagrama Ca x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação	70
Figura 28- Diagrama Ca+P x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação.	71
Figura 29- Diagrama Ca x ETR total+somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	17
2	METODOLOGIA	18
2.1	MATERIAL UTILIZADO	18
2.2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	18
2.3	ESTUDOS PETROGRÁFICOS	18
2.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	19
3	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	22
3.1	O DOMÍNIO RIO MARIA, PROVÍNCIA CARAJÁS.....	25
3.1.1	Suíte Intrusiva Velho Guilherme	25
3.1.2	Suíte Jamon	26
3.1.3	Suíte Sanukitoide Rio Maria	26
3.1.3.1	Granito Antônio Vicente.....	28
3.1.3.2	Granitos Jamon e Redenção.....	28
3.2	PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS	31
3.2.1	Granito São Jorge Jovem	31
3.3	APATITA COMO UM INDICADOR PETROLÓGICO E METALOGENÉTICO ..	33
4	RESULTADOS	35
4.1	ASPECTOS PETROGRÁFICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS	35
4.1.1	Granito Antônio Vicente	35
4.1.2	Granito Redenção	39
4.1.3	Granito Jamon	43
4.1.4	Suíte Sanukitoide Rio Maria	47
4.1.5	Granito São Jorge Jovem	48
4.2	ASPECTOS MORFOLÓGICOS DAS APATITAS POR MEV-ERE	53
4.2.1	Granito Antônio Vicente	53
4.2.2	Suíte Jamon	56
4.2.3	Suíte Sanukitoide Rio Maria	58
4.2.4	Granito São Jorge Jovem.....	60
4.3	ANÁLISES QUÍMICAS POR EDS	64

4.3.1	Granito Antônio Vicente	64
4.3.2	Granito Jamon	64
4.3.3	Granito Redenção	65
4.3.4	Suíte Sanukitoide Rio Maria	65
4.3.5	Granito São Jorge Jovem.....	65
5	DISCUSSÕES	67
5.1	DIAGRAMAS DISCRIMINANTES	67
5.2	APATITAS DO GRANITO ESTANÍFERO ANTÔNIO VICENTE.....	73
5.3	APATITAS DE OUTROS GRANITOS.....	74
6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A apatita de composição $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ é um mineral acessórios comuns em vários tipos de rochas e, conseqüentemente, o entendimento da sua química mineral é de grande utilidade na compreensão geoquímica do ambiente em que ela ocorre (LIU; COMODI, 1993). Sha e Chappell (1999) afirmam que a composição química de um mineral em um sistema magmático varia em função da temperatura, pressão, fugacidade de oxigênio e composição de fases coexistentes, bem como da composição do sistema magmático como um todo. Assim, o conhecimento da composição química de um mineral magmático pode fornecer informações importantes a respeito de sua rocha fonte e das condições reinantes durante sua cristalização.

Minerais acessórios como a apatita, armazenam vários elementos menores e traço em sua estrutura como Na, K, Mn, F, Cl, Sr, Pb, Th, U, V, As e ETR, que podem fornecer informações importantes sobre os detalhes dos processos magmáticos envolvidos durante a sua cristalização (CHU *et al.*, 2009)

A Linha de Pesquisa em Quartzo e Zircão (LPQZ), ligada ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides do IG-UFPA, vem estudando os aspectos morfológicos e as assinaturas geoquímicas desses dois minerais em rochas ígneas e corpos de *greisens* associados, através de diferentes técnicas de microanálises, com o objetivo de: (1) Utilizar as variações morfológicas e composicionais do zircão como indicadores de granitos especializados; (2) Utilizar os tipos morfológicos de quartzo e suas alterações como marcadores dos estágios de cristalização magmática e hidrotermal. Como a apatita é um mineral geralmente precoce na ordem de cristalização de minerais magmáticos de rochas granitoides e tem fornecido informações petrológicas e metalogenéticas similares as do zircão (SHA; CHAPPEL, 1999; BELOUSOVA *et al.*, 2001; CHU *et al.*, 2009) este mineral foi escolhido como tema central desta pesquisa.

1.1 APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram estudados morfológica e geoquimicamente cristais de apatita de diferentes corpos granitoides, incluindo um granito mineralizado em Sn, utilizando-se imagens de luz transmitida obtidas em um microscópio petrográfico convencional, além de imagens por elétrons retroespalhados (ERE) e análises químicas semiquantitativas por espectroscopia de dispersão de energia (EDS), utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os cristais de apatita analisados são

provenientes dos seguintes granitos: (1) Antônio Vicente, pertencente à Suíte Intrusiva Velho Guilherme (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA 2005), localizado a norte da cidade de São Félix do Xingu (ABREU; RAMOS, 1974; DALL'AGNOL; TEIXEIRA; MAGALHÃES, 1993; TEIXEIRA, 1999; TEIXEIRA *et al.*, 2005); (2) Jamon e Redenção, da Suíte Jamon, situados nas regiões de Rio Maria e Redenção, SE do Pará (DALL'AGNOL *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2009a) ; (3) São Jorge Jovem, situado na região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós (LAMARÃO *et al.*, 2002); (4) Granodiorito da Suíte Sanukitoide Rio Maria aflorante às proximidades da cidade de Rio Maria (2,87 Ga), Província Carajás (OLIVEIRA *et al.*, 2009b).

Os resultados obtidos permitiram comparações importantes acerca das apatitas presentes em cada rocha e em suas variações faciológicas, permitindo a definição de uma assinatura geoquímica para a apatita do granito estanífero Antônio Vicente, principal objetivo desta pesquisa. Tal fato permitiu incluir este mineral na rotina de estudos da LPQZ.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo de minerais resistentes a alterações e a transformações durante os processos geológicos, conhecidos como minerais resistentes indicadores (*RIM-Resistate Mineral Indicator*), é uma técnica amplamente utilizada principalmente nas ocorrências e prospecção de corpos diamantíferos, porém com potencial para aplicação em outros bens minerais. Em estudos de prospecção de diamante comumente são utilizadas granada, piroxênio, cromita e Mg-ilmenita. Como indicadores em potencial de depósitos de Cu-Mo-Au pórfiro são utilizados o rutilo, turmalina, magnetita e apatita (BELOUSOVA *et al.*, 2002). Em corpos especializados em Sn-W, o zircão vem sendo utilizado como importante mineral indicador desse tipo de mineralização (LAMARÃO *et al.*, 2007, 2012, 2013, 2014)

Cristais de apatita ocorrem dispersos nas diferentes fácies petrográficas do granito estanífero Antônio Vicente, Província Carajás. A definição de uma assinatura geoquímica característica para esse mineral, utilizando imagens de ERE e análises semiquantitativas de elementos traço por EDS, pode ser uma ferramenta adicional na identificação preliminar desse tipo de mineralização.

Do ponto de vista científico, a identificação de rochas graníticas mineralizadas em Sn através da geoquímica de cristais de apatita vem corroborar os estudos desenvolvidos pelo GPPG em cristais de zircão de granitos especializados, demonstrando que a apatita pode ser

utilizada como um mineral resistato indicador e confirmar a importância desta metodologia na prospecção preliminar de corpos mineralizados.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho é o estudo de cristais de apatita de rochas graníticas utilizando imagens por ERE e análises químicas semiquantitativas de EDS, adquiridas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), na tentativa de definir uma assinatura geoquímica para apatita de granitos estaníferos, permitindo que as mesmas possam ser utilizadas como indicador metalogenético de granitos especializados. São estudados comparativamente cristais de apatita de outros importantes corpos granitoides do Cráton Amazônico. Os seguintes corpos foram selecionados para este estudo:

- 1- **Granito estanífero Antônio Vicente** (Figura 4), localizados na região de São Félix do Xingu e pertencente à Suíte Intrusiva Velho Guilherme (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; DALL'AGNOL *et al.*, 2005; LAMARÃO *et al.*, 2012);
- 2- **Granitos Jamon e Redenção** (Figura 4), pertencentes à Suíte Jamon, SE do Cráton Amazônico (DALL'AGNOL *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2005);
- 3- **Suíte Sanukitoide Rio Maria** (Figura 3), formada predominantemente por rochas granodioríticas com rochas intermediárias e máficas ocorrendo localmente (OLIVEIRA *et al.*, 2009b; SANTOS *et al.*, 2013)
- 4- **Granito São Jorge Jovem** (Figura 5), localizado na Província Aurífera do Tapajós (FARACO; CARVALHO; KLEIN, 1997) e intrusivo no Granito São Jorge Antigo (LAMARÃO *et al.*, 2002, 2005).

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- 1- Obter imagens através de microscopia convencional e por ERE de cristais de apatita presentes nas rochas graníticas mencionadas acima, procurando identificar tipos morfológicos, transformações, inclusões e possíveis zoneamentos;
- 2- Caracterizar geoquimicamente, através de análises semiquantitativas de EDS, os elementos presentes nos diferentes cristais;
- 3- Tratar os dados obtidos em diagramas geoquímicos específicos;

4- Definir uma assinatura geoquímica característica para as apatitas do granito estanífero Antônio Vicente e sua possível utilização como mineral resistato indicador (*RIM-resistate indicator mineral*) para esse tipo de mineralização.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAL UTILIZADO

Para o estudo de apatitas foram utilizadas lâminas polidas (Tabela 1) disponíveis no acervo do GPPG e selecionadas com base em trabalhos anteriores que envolveram petrografia, geoquímica e geocronologia dos corpos estudados (DALL'AGNOL *et al.*, 1999, 2005; LAMARÃO *et al.*, 2002; OLIVEIRA, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2005; PIMENTEL; MACHADO, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 2009b; TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2002, 2005).

2.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Nesse estudo foram consultadas os seguintes materiais bibliográficos:

- a) Publicações versando sobre as Províncias Aurífera do Tapajós e Estanífera do Sul do Pará, onde estão localizados os granitos São Jorge Antigo e Antônio Vicente, respectivamente, e sobre o Domínio Rio Maria, onde se localizam os granitos Redenção e Jamon, além da Suíte Sanukitoide Rio Maria (FARACO; CARVALHO; KLEIN, 1997; DALL'AGNOL *et al.*, 2005, 2007; VASQUEZ *et al.*, 2008; LAMARÃO *et al.*, 2002, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2009b);
- b) Livros e apostilas envolvendo princípios básicos e aplicações em MEV (REED, 1996; FRIEL, 2003);
- c) Publicações abordando o estudo composicional de apatitas (DUTRA; FORMOSO, 1995; SHA; CHAPPELL, 1999; LUO *et al.*, 2009; BELOUSOVA *et al.*, 2001, 2002; CHU *et al.*, 2009);

2.3 ESTUDOS PETROGRÁFICOS

O estudo petrográfico constou na descrição sucinta da mineralogia das diferentes rochas utilizadas neste trabalho, da obtenção de fotomicrografias de feições mineralógicas e texturais características, através de microscopia de luz transmitida, bem como da identificação dos cristais de apatita para o estudo de MEV.

2.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O equipamento de MEV utilizado foi um LEO-ZEISS 1430 do Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFPA). As lâminas polidas foram previamente metalizadas com carbono. As imagens por elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas de EDS das apatitas foram realizadas com um detector por EDS Sirius-SD acoplado ao MEV. As condições para obtenção de imagens por ERE e análises por EDS foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho = 15 mm, tempo de contagem = 30s com 4000 a 5000 c/s para cada análise. As análises de EDS utilizaram o padrão ZAF ($Z=n^{\circ}$ atômico, A =absorção atômica, F =fluorescência de Raios-X), que faz correções entre pico e background do elemento. As imagens de ERE foram comparadas entre si para identificar possíveis zoneamentos composicionais, inclusões e/ou alterações. Os dados geoquímicos foram tratados e interpretados em diagramas específicos utilizando-se o software GCDkit 2.2

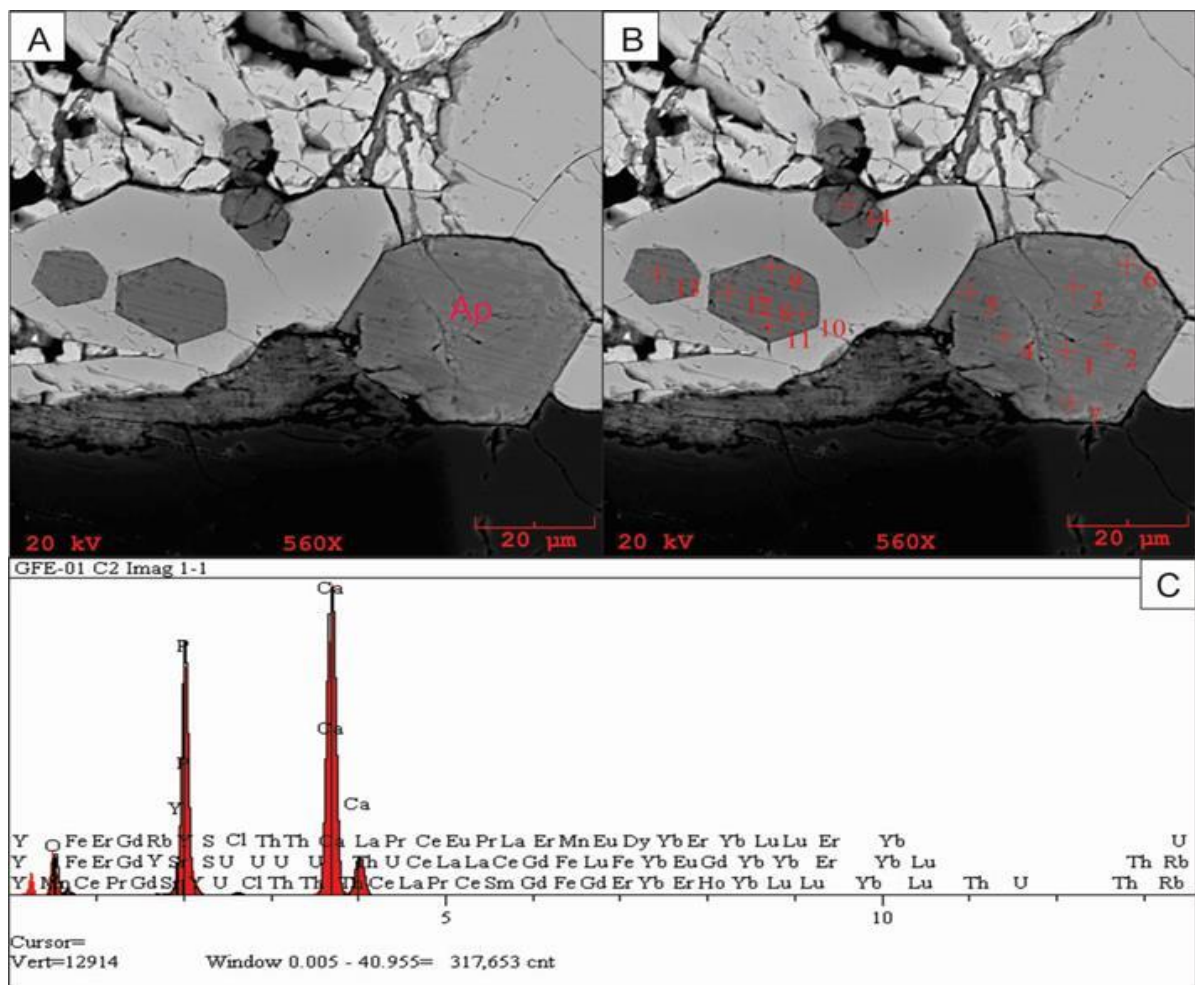
O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de um feixe de elétrons para geração das imagens, pois estes apresentam comprimento de onda menor que a luz visível, possibilitando a obtenção de imagens com resoluções em escala micrométrica. Os feixes são gerados por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 200 V a 30 KV. Essa variação de voltagem provoca o aquecimento do filamento permitindo a modificação da aceleração dos elétrons. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando na aceleração em direção ao mesmo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. As bobinas de varredura são responsáveis pela varredura do feixe de elétrons sobre a amostra, a lente objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada, todo este processo ocorre dentro da coluna do MEV em alto vácuo.

No interior da câmara de vácuo do MEV está situado o detector de elétrons retroespalhados responsável pela geração das imagens por ERE, e o detector de elétrons secundários que originam imagens com grandes ampliações e melhor resolução. Imagens de catodoluminescência (CL) e análises químicas semiquantitativas por EDS são geradas com o uso de equipamentos complementares como a Mono-CL da Gatan e o EDS Sirius-SD da IXRF Systems, presentes no MEV utilizado neste trabalho.

Imagens de ERE são obtidas em decorrência da variação da velocidade do feixe de elétrons quando este interage com a amostra. Nessas interações ocorre a mudança na trajetória do elétron, sem que resulte na variação da sua energia cinética, denominada de interações elásticas. Como resultado dessa interação elástica, o elétron proporciona a obtenção de imagens retroespalhadas no MEV (Figura 1A).

As análises químicas semiquantitativas por EDS são realizadas sobre as imagens de ERE (Figura 1B). A emissão do feixe de elétrons sobre um mineral excita os elétrons mais internos de seus átomos, deslocando-os de sua órbita, criando vacâncias e, assim, ionizando o átomo. Para retornar ao seu estado de equilíbrio, elétrons das camadas mais externas são deslocados para as camadas mais internas, quando esses elétrons são bruscamente desacelerados, e a diferença de energia cinética entre os orbitais é então emitida na forma de fóton, com comprimento de onda no espectro de raios-X (Figura 1C).

Figura 1- A) Imagens de ERE mostrando cristais euédricos de apatita. B) Análises pontuais de EDS (números em vermelho). C) Difratograma da análise de EDS do ponto 1.



Fonte: Do autor.

Tabela 1 - Relação dos corpos estudados, com respectivas lâminas polidas e fácies petrográficas correspondentes.

UNIDADES GRANÍTICAS	AMOSTRAS	FÁCIES PETROGRÁFICAS
Antônio Vicente	GFE-01, IE-04	BASMG
	GAM-CS-54	BMG
	SL-06-DT	BSG
	NE-82	BSGA
Redenção	DCR-33B	BMG
	DC-120	LMG
Jamon	AU-391	ABMG
	AU-375	BMG
Suíte Sanukitoide Rio	ADR-3A	EBAGRD
Maria	ADR-1	
São Jorge Jovem	SJ-9/7, 7/4 e 2/5	ABMG
	SJ-4/11	BMG

A=anfíbólio E=epidoto, B=biotita, S=sienogranito, MG=monzogranito, A=alterado, L=leuco, GRD=granodiorito.

Fonte: Do autor.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico é constituído de terrenos Arqueanos e Proterozoicos, sendo subdividido em províncias geocronológicas distintas a partir de assembleias litológicas, *trends* estruturais e histórias geológicas particulares e distintas em relação às províncias adjacentes (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999, 2004; SANTOS *et al.*, 2000; SANTOS, 2003), dispostas em torno de um núcleo arqueano denominado de Província Amazônia Central (> 2,5 Ga). Tassinari e Macambira (2004) consideram que a Província Amazônia Central é formada por dois grandes blocos tectônicos, Carajás e Xingu-Iricoumé, enquanto Santos *et al.*, (2000) baseando-se na interpretação de novos dados U-Pb e Sm-Nd obtidos na porção ocidental e central do cráton, e na reavaliação de dados geocronológicos disponíveis na literatura, propôs mudanças cartográficas e evolutivas, admitindo o bloco Carajás como uma província independente formada durante o arqueano e com extensão até o Amapá.

As províncias geocronológicas definidas por Tassinari e Macambira, (1999, 2004), são alongadas na direção NW-SE e seriam o resultado de retrabalhamentos e acreção crustal durante o Paleo e o Mesoproterozoico ao longo de cinturões móveis, (CORDANI; SATO, 1999; TASSINARI; MACAMBIRA, 1999, 2004; SANTOS *et al.*, 2000). Essas províncias foram denominadas Maroni-Itacaiúnas (2,2 – 1,9 Ga), Ventuari-Tapajós (1,9 – 1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1,8 – 1,55 Ga), Rondoniana-San Ignácio (1,55 – 1,3 Ga) e Sunsás (1,25 – 1,0 Ga) (Figura 1).

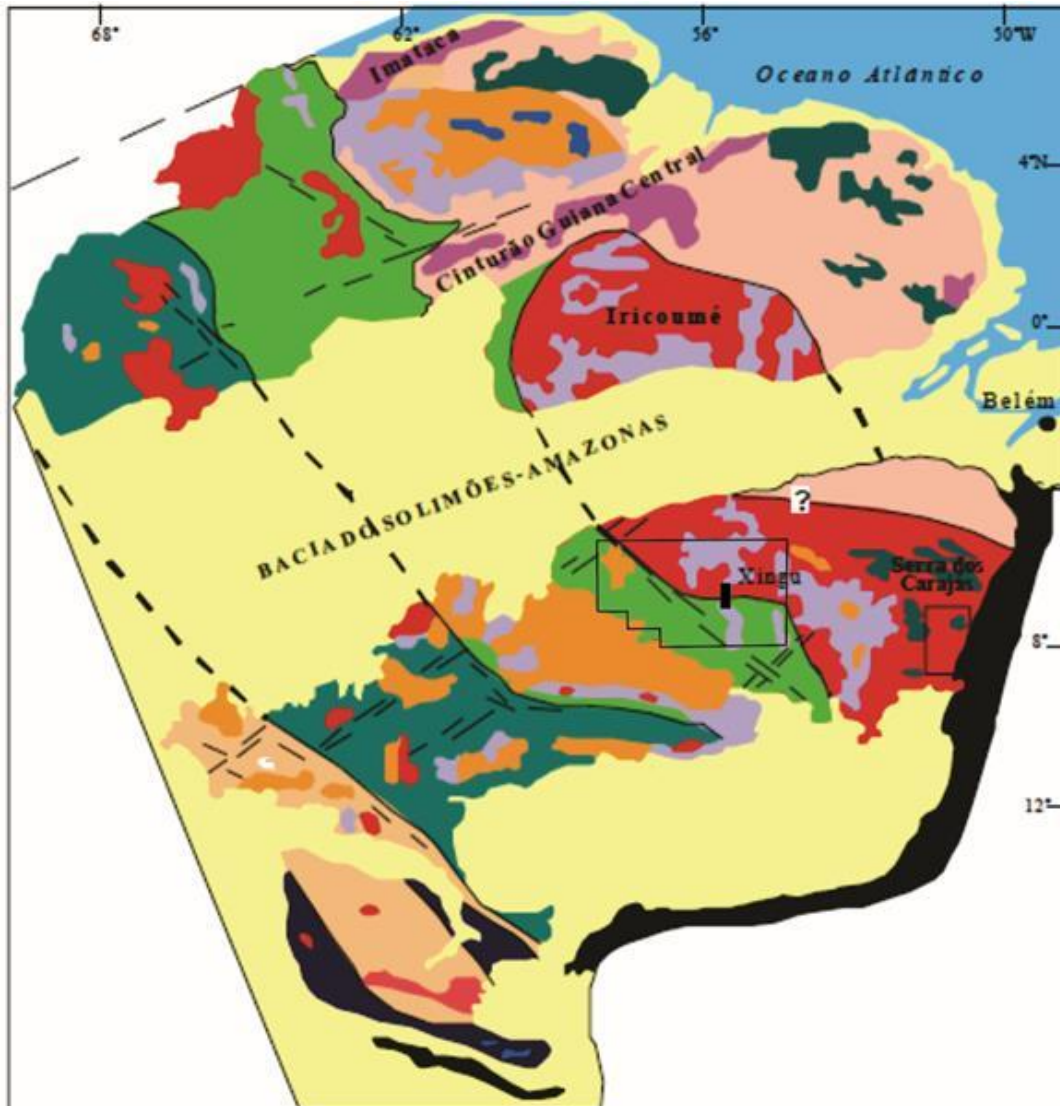
Inserida nos domínios da Província Amazônia Central, a Província Carajás, seria formada por três domínios tectônicos, segundo Costa *et al.*, (1995): Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (CCI) a norte, Cinturão de Cisalhamento Pau D'arco (CCPD) a sul, e o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) representando um domínio tectonicamente preservado entre eles. Dall'Agnol *et al.*, (1997) e Rolando e Macambira (2002, 2003), consideram o CCPD como um prolongamento do TGGRM até a região de Redenção e Serra do Inajá, reduzindo a Província Carajás em dois domínios o TGGRM e o Bloco Carajás. O Bloco Carajás é constituído pela Bacia Carajás a norte e como denominação informal de Domínio de Transição a sul, interpretado como uma possível extensão do Domínio Rio Maria, afetada pelos eventos neoarqueanos que moldaram a Bacia de Carajás (DALL'AGNOL *et al.*, 1997, 2006; DALL'AGNOL, OLIVEIRA; LAMARÃO, 2013).

Vasquez *et al.*, (2008), seguindo a proposta de Santos *et al.*, (2003), definem dois domínios na Província Carajás: o Domínio Rio Maria (antigo TGGRM) de idade

mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga) e o Domínio Carajás, formado por rochas meso a neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga) e comparativamente menos estudado (Figura 1). Feio *et al.*, (2012) redefiniram o Domínio de Transição como Subdomínio de Transição, o qual se estenderia desde a borda sul da Bacia Carajás até o norte de Sapucaia, prolongando-se lateralmente até a região de São Félix do Xingu (Figura 2). Recentemente, Dall’Agnol, Oliveira e Lamarão, (2013) adotaram as denominações de Domínio Canaã dos Carajás e Domínio Sapucaia para as porções norte e sul deste Subdomínio por entenderem que o mesmo não corresponderia a uma crosta arqueana homogênea.

A seguir são apresentadas as principais unidades litoestratigráficas que compõem as regiões de ocorrência dos corpos graníticos utilizados neste trabalho

Figura 2- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico delimitadas segundo Tassinari e Macambira, (2004), com indicação das áreas utilizadas neste trabalho.



Províncias Geocronológicas

- Amazônia Central (> 2,5 Ga)
- Maroni-Itacaiúnas (2,2 – 1,9 Ga)
- Ventuari-Tapajós (1,9 – 1,8 Ga)
- Rio Negro-Juruena (1,8 – 1,55 Ga)
- Rondoniana-San Ignácio (1,55 – 1,3 Ga)
- Sunsás (1,25 – 1,0 Ga)

Áreas estudadas

- Domínio Rio Maria
- Província Aurífera do Tapajós
Região de Vila Riozinho

Unidades Geológicas

- Cobertura sedimentar fanerozóica
- Cobertura sedimentar pré-cambriana
- Granitóides
- Vulcanismo ácido intermediário
- Vulcanismo máfico
- Greenstone belts
- Complexos granulíticos
- Cinturões móveis neoproterozóicos

Fonte: Modificado de Tassinari e Macambira, (2004).

3.1 O DOMÍNIO RIO MARIA, PROVÍNCIA CARAJÁS

O Domínio Rio Maria (VASQUEZ *et al.*, 2008) inserido na porção sul da Província Carajás, tem idade mesoarqueana e é constituído por *greenstone belts* arqueanos do Supergrupo Andorinhas (2.98-2.90 Ga) e por suítes TTG's (Tonalito Arco Verde, 2,98 a 2,93 Ga; Trondhjemitó Mogno, ~2,96 Ga; Tonalito Caracol, ~2,93 Ga; e Tonalito Mariazinha, ~2.92 Ga). Após um intervalo de 50 Ma, este terreno foi novamente afetado por intensa atividade magmática com geração da suíte sanukitoides (2.87 Ga; Granodiorito Rio Maria, Quartzo-diorito Parazônia, Granito Rancho de Deus, e rochas máficas associadas), rochas TTG's mais jovens relacionadas ao Trondhjemitó Água Fria (~2.86 Ga), suítes de leucogranodioritos e leucogranitos (2,87 Ga; Suíte Garantã, Granodiorito Grotão e rochas análogas), e leucogranitos potássicos (~2.86 Ga; granitos Xinguara e Mata Surrão, além de rochas similares) (ALMEIDA *et al.*, 2011; ALMEIDA; DALL'AGNOL; LEITE, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2009b e SANTOS *et al.*, 2013). Durante o Paleoproterozóico, mais precisamente em torno de 1,88 Ga, a região de Rio Maria foi palco de intenso magmatismo sendo cortada por granitos anorogênicos paleoproterozoicos pertencentes à Suíte Jamon (DALL'AGNOL *et al.* 2005, 2006; DALL'AGNOL; OLIVEIRA, 2007). A região de São Félix do Xingu, situada nos domínios da Província Amazônia Central, abrange rochas arqueanas do Domínio Rio Maria e do Supergrupo Itacaiúnas (ARAÚJO *et al.*, 1988). Próximo a São Félix do Xingu, as rochas paleoproterozoicas são representadas por corpos máfico-ultramáficos da Suíte Cateté (MACAMBIRA; FERREIRA FILHO, 2002), pelo granito Parauari (MACAMBIRA; VALE, 1997), por rochas vulcânicas das Formações Sobreiro e Iriri (CPRM/DNPM, 1997; FERNANDES *et al.*, 2006; PINHO *et al.*, 2006) ou Sobreiro e Santa Rosa (FERNANDES, 2009; JULIANI; FERNANDES, 2010), além de granitos anorogênicos mineralizados em Sn e W da Suíte Intrusiva Velho Guilherme (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2005; LAMARÃO *et al.*, 2012).

3.1.1 Suíte Intrusiva Velho Guilherme

A Suíte Intrusiva Velho Guilherme (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2005) pertencente a Província Estanífera do Sul do Pará (ABREU; RAMOS, 1974 *apud* FERNANDES *et al.*, 2006) localizando-se na região sul-sudeste do Estado do Pará, entre os municípios de Tucumã e São Félix do Xingu, com sua área de ocorrência situando-se no Domínio Rio Maria e Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (ARAÚJO *et al.*, 1988; TEIXEIRA *et al.*, 2005). É composta pelos granitos especializados

Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Serra da Queimada, Bom Jardim, Rio Xingu, Benedita e Ubim-Sul, com idades de cristalização entre 1,88 e 1,86 Ga (MACAMBIRA; LAFON, 1995; TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2005; PINHO, 2005; LAMARÃO *et al.*, 2012). Suas rochas são de composição sienograníticas a monzograníticas, hololeucocráticas a leucocráticas alteradas por processos tardi a pós-magmáticos em diferentes intensidades; feldspato-alcálico-granitos e corpos de *greisens* hospedeiros da mineralização de Sn e W ocorrem associados às rochas mais evoluídas (TEIXEIRA, 1999; TEIXEIRA *et al.*, 2005).

3.1.2 Suíte Jamon

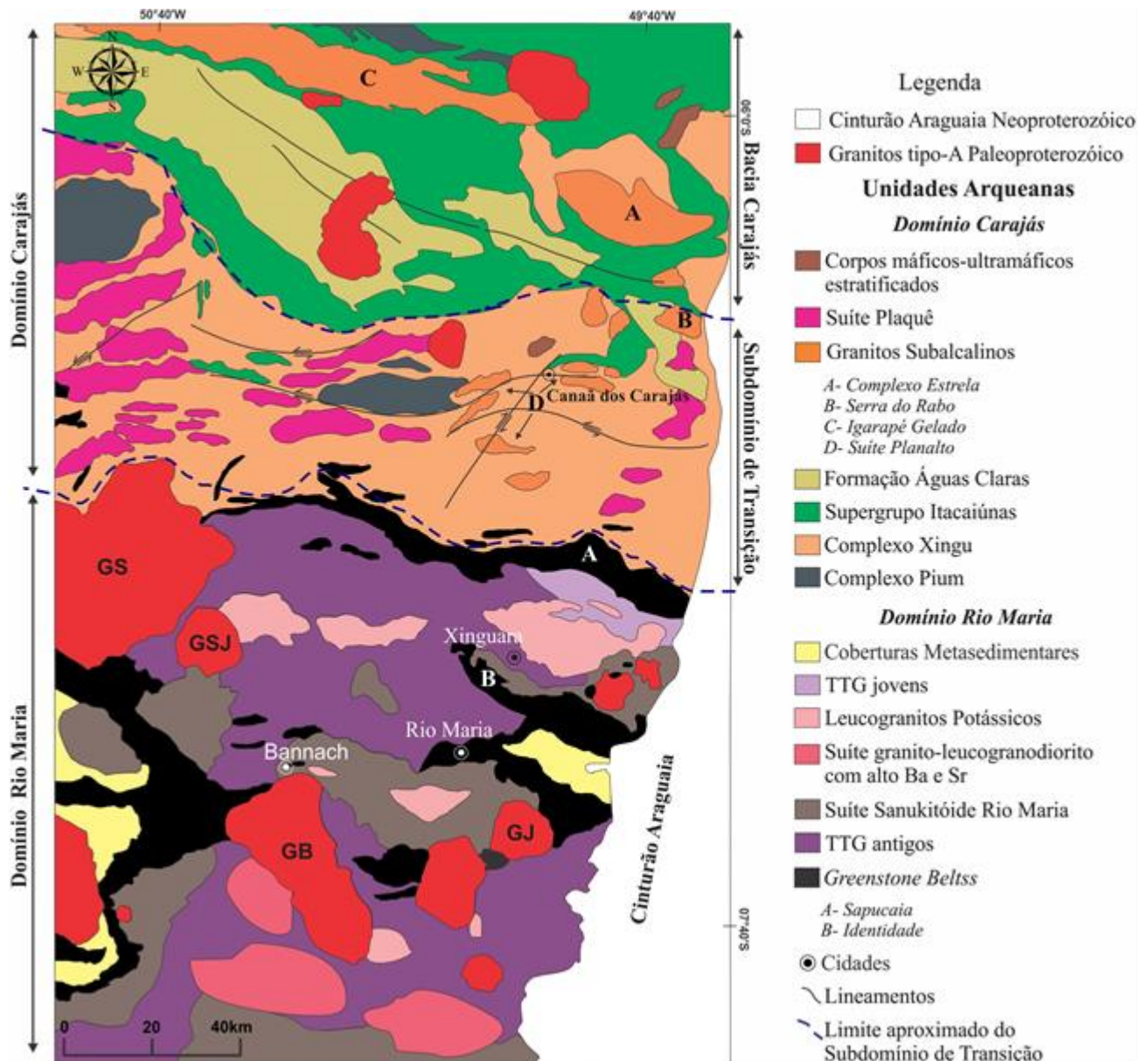
A Suíte Jamon (DALL'AGNOL *et al.*, 2005, 2007; ALMEIDA; DALL'AGNOL; OLIVEIRA, 2006) localizada no sudeste do Cráton Amazônico (Figura 3), é representada pelos granitos Jamon, Musa, Redenção, Bannach, Marajoara e Manda Saia, constituídos por monzogranitos e sienogranitos isotrópicos, com conteúdo de minerais máficos entre 15 e 5%, podendo atingir 20% nas rochas menos evoluídas. A biotita é a principal fase máfica e o anfibólio está presente somente nas rochas menos evoluídas. A mineralogia acessória inclui zircão, apatita, magnetita, ilmenita, allanita e titanita. Estes granitoides são datados do Paleoproterozoico, com idade de cristalização em torno de 1,88 Ga (BARBOSA *et al.*, 1995; DALL'AGNOL *et al.*, 1999), intrudidos em terrenos arqueanos da Província Amazônia Central e gnaisses do Complexo Xingu (MACAMBIRA *et al.*, 1990), cortando discordantemente suas rochas encaixantes. Pertencentes a Província Metalogenética de Carajás (PMC), dados químicos e experimentais demonstram que a Suíte Jamon evoluiu em condições relativamente oxidantes e todos os granitos são de caráter metaluminosos a peraluminosos, análogo a granitos tipo A intraplaca (PEARCE; HARRIS; TINDLE, 1984; WHALEN; CURRIE; CHAPPELL, 1987; EBY, 1992; DALL'AGNOL *et al.*, 1999; OLIVEIRA, 2006).

3.1.3 Suíte Sanukitoide Rio Maria

Possui grandes exposições a norte da cidade de Redenção, a sul de Rio Maria, a leste da localidade de Bannach e a sul e nordeste de Xinguará (Figura 3), porção SE do Cráton Amazônico, sendo intrusiva em *greenstones* do Supergrupo Andorinhas, no Tonalito Arco Verde e no Complexo Tonalítico Caracol (ALTHOFF; BARBEY; BOULLIER, 2000). É formada predominantemente por rochas granodioríticas, com monzogranitos subordinados; rochas intermediárias (quartzo dioritos, quartzo monzodioritos) e acamadadas, interpretadas

como rochas cumuláticas, foram identificadas localmente às proximidades das cidades de Bannach e Rio Maria. As rochas granodioríticas, objeto deste estudo, apresentam epidoto primário, zircão, allanita, titanita, apatita e magnetita como principais fases acessórias. São rochas metaluminosas, de afinidade cálcico-alcalina, com enriquecimento acentuado em Mg, Cr e Ni em relação a outras rochas granodioríticas da região. Datações U-Pb e Pb-Pb em zircão definiram idades de cristalização de 2,87 Ga para essas rochas (PIMENTEL; MACHADO, 1994; MACAMBIRA; LANCELOT, 1996; OLIVEIRA *et al.*, 2009b)

Figura 3- Mapa geológico simplificado da Província Carajás, mostrando os limites aproximados entre os Domínios Rio Maria e Carajás e entre o Subdomínio de Transição e a Bacia Carajás. Notar extensa distribuição de rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria . GSJ= Granito São João; GS= Granito Seringa; GB= Granito Bannach; GJ= Granito Jamon.



Fonte: Feio, (2011).

3.1.3.1 Granito Antônio Vicente

O Granito Antônio Vicente (GAV) apresenta forma subcircular e está situado aproximadamente a 50 km a noroeste da cidade de São Félix do Xingu, porção SE do Cráton Amazônico (Figura 4). Predominam monzogranitos e sienogranitos do tipo A, subgrupo A₂, reduzidos e hidrotermalmente alterados, com suas rochas mais evoluídas e corpos de *greisens* associados contendo mineralizações de Sn e W. O GAV é incluído na Suíte Intrusiva Velho Guilherme (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002; TEIXEIRA *et al.*, 2005; DALL'AGNOL *et al.*, 2005; LAMARÃO *et al.*, 2012) e integra, juntamente com outros corpos mineralizados, a Província Estanífera do Sul do Pará (ABREU; RAMOS, 1974; DALL'AGNOL; TEIXEIRA; MAGALHÃES, 1993; CPRM/DNPM, 1997). Intrusivo em rochas do Complexo Xingu, do Grupo São Sebastião, em rochas vulcânicas do Grupo Uatumã e no Granito Parauarí (TEIXEIRA, 1999; TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002). Apresenta idade de cristalização de 1867±4 Ma (TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002), e é formado pelas fácies biotita-anfibólio sienogranito a monzogranito (BASMG), anfibólio-biotita sienogranito (ABSG), biotita monzogranito (BMG) e biotita sienogranito (BSG) dividido nos tipos alterado (BSGA) e intensamente alterado (BSGIA); corpos de *greisens* ocorrem hospedados nos BSG. A mineralogia acessória inclui zircão, apatita, ilmenita, fluorita e, comumente, topázio e monazita (TEIXEIRA; DALL'AGNOL, 1991; TEIXEIRA, 1999; TEIXEIRA; BELLO; BETTENCOURT, 2002). Geoquimicamente o GAV é subalcalino, mostra caráter metaluminoso a levemente peraluminoso, assinatura de granito tipo A (WHALEN; CURRIE; CHAPPELL, 1987) e afinidade geotectônica com granitos intraplaca (PEARCE; HARRIS; TINDLE, 1984).

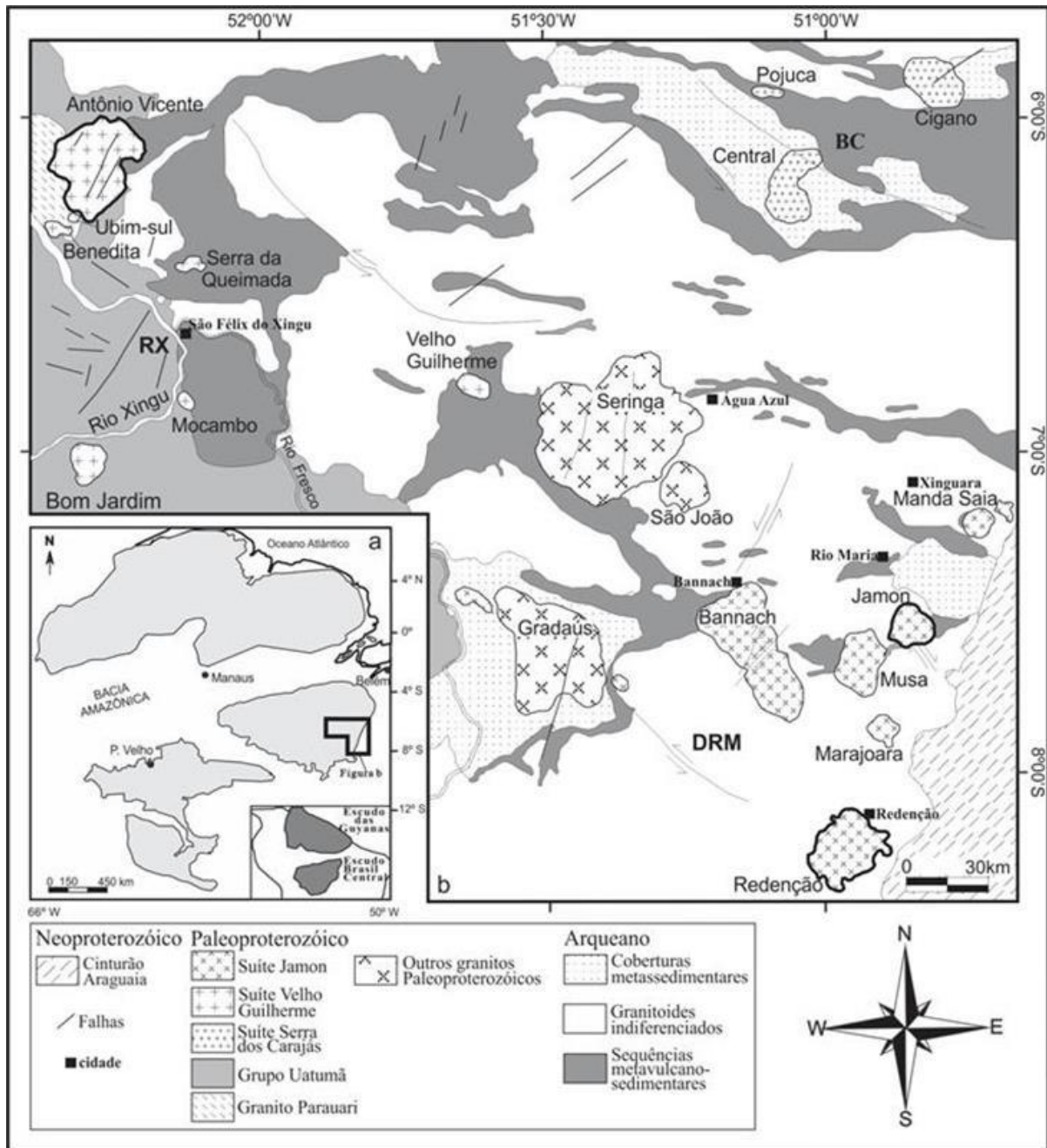
3.1.3.2 Granitos Jamon e Redenção

Correspondem aos granitos paleoproterozoicos do tipo A, oxidados e integrantes da Suíte Jamon (DALL'AGNOL *et al.*, 2005). Ocorrem na forma de corpos subcirculares intrusivos em rochas arqueanas do Domínio Rio Maria (VASQUEZ *et al.*, 2008) borda oriental do Cráton Amazônico, sudeste do Pará. O Granito Jamon, localizado a sudeste do município de Rio Maria (Figura 4), é composto por três fácies petrográficas concêntricas, sendo a dominante e mais externa formada por hornblenda-biotita monzogranito (HBMG), seguida de biotita monzogranito (BMG), localizada próximo ao centro do corpo, e de biotita microgranitos (BMcG), aflorantes apenas na porção centro-sul do maciço e provavelmente intrusiva nas anteriores. Apatita, zircão, titanita, allanita, magnetita e ilmenita são as

principais fases acessórias, com os dois últimos apresentando conteúdos modais relativamente elevados (>0,5%). Datado pelo método Pb-Pb em zircão, forneceu idade de cristalização de 1885 ± 32 Ma (MACAMBIRA; DALL'AGNOL, 1997).

O Granito Redenção aflora a sul do Domínio Rio Maria, nas proximidades da cidade de Redenção (Figura 4); é formado predominantemente por monzogranitos de granulação grossa a média e textura equigranular a seriada, localmente porfirítica. O conteúdo de minerais máficos (biotita, anfibólio, \pm clinopiroxênio) variam de 6 a 15 %, podendo atingir 25% nas rochas menos evoluídas, e diminuindo a <3% nos leucogranitos (OLIVEIRA *et al.*, 2009c). Zircão, allanita, titanita, apatita, magnetita e ilmenita são as principais fases acessórias. Subdivido em nove fácies por Oliveira e Dall'Agnol, (2009). Datado pelo método Pb-Pb em rocha total forneceu idade de cristalização de 1885 ± 4 Ma (OLIVEIRA; DALL'AGNOL, 2009). Os granitos Jamon e Redenção são subalcalinos, metaluminosos a levemente peraluminosos e mostram afinidades geoquímicas com granitos tipo A intraplacas (WHALEN; CURRIE; CHAPPELL, 1987; PEARCE; HARRIS; TINDLE, 1994).

Figura 4- (a) Esboço do Crátão Amazônico com a localização aproximada da Província Carajás. (b) Mapa geológico simplificado das suítes graníticas paleoproterozóicas do Crátão Amazônico mostrando a localização dos granitos Antônio Vicente, Jamon e Redenção. RX= região do Xingu; DRM=Domínio Rio Maria; BC=Bloco Carajás.



Fonte: Modificado de Dall'Agnol *et al.*, (2005).

3.2 PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS

A Província Aurífera do Tapajós (PAT; FARACO; CARVALHO; KLEIN, 1997) está localizada na porção centro-sul do Cráton Amazônico; ocupa uma grande área da província Ventuari-Tapajós (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999, 2004) e tem sua porção norte-nordeste inserida nos domínios da província arqueana Amazônia Central (Figura 5). Klein e Vasquez (2000) dividiram a PAT em dois domínios tectônicos: um orogênico, situado na porção sul-sudoeste, contendo as rochas mais antigas e afetadas por uma tectônica compressiva transpressiva, e um pós-orogênico extensional, situado na porção nordeste, onde estão as rochas mais jovens e isentas de deformação.

Pertencentes ao domínio orogênico ocorrem granodioritos e tonalitos cálcio-alcalinos do Complexo Cuiú-Cuiú, com idades de cristalização de 2033 ± 4 Ma e 2011 ± 33 Ma (SANTOS *et al.* 2000, 2004) e rochas vulcanossedimentares do Grupo Jacareacanga com idades U-Pb em zircões detríticos de 2,10-2,87 Ga (SANTOS *et al.* 2000, 2004). O domínio pós-orogênico é formado por rochas vulcânicas intermediárias a félsicas, cálcio-alcalinas da Formação Vila Riozinho (~2,0 Ga; LAMARÃO *et al.*, 2002), granitoides cálcio-alcalinos sin a tardi-orogênicos da Suíte Creporizão (1,98-1,87 Ga), incluindo o Granito São Jorge, granitoides cálcio-alcalinos da Suíte Parauari (1,89-1,87 Ga) e alcalinos da Suíte Intrusiva Maloquinha (~1,88 Ga), além de vulcânicas félsicas da Formação Morais Almeida (1,87-1,88 Ga; LAMARÃO *et al.*, 2002; 2008; KLEIN; VASQUEZ, 2000; SANTOS *et al.*, 2004).

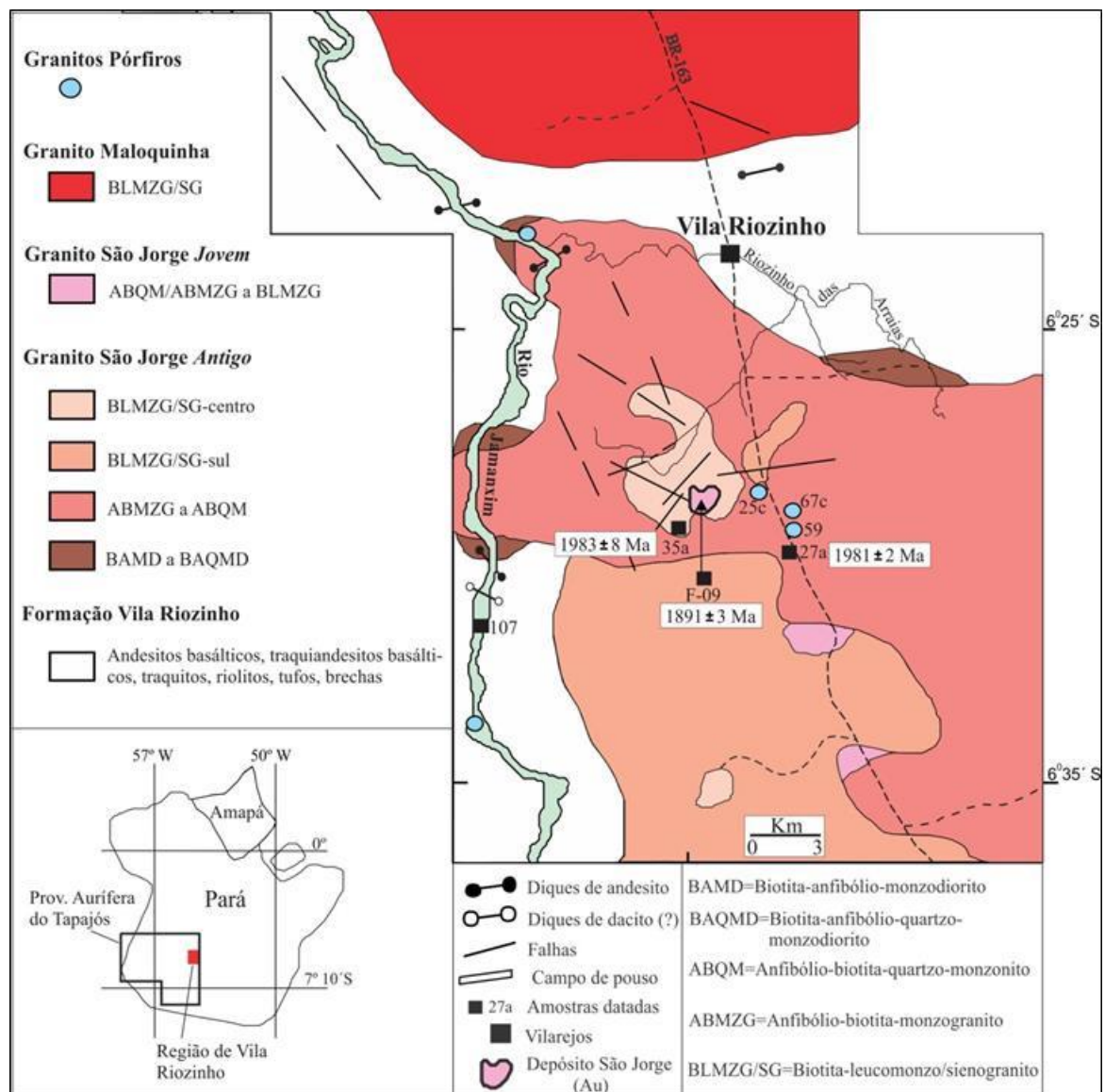
A região de Vila Riozinho, onde se localiza o Granito São Jorge (LAMARÃO *et al.*, 2002, 2008) situa-se na porção central da PAT (Figura 1). O Corpo São Jorge é formado pelos granitos São Jorge Antigo e São Jorge Jovem. Dados pelo método Pb-Pb em zircão, apresentando idades de cristalização de 1983 ± 8 Ma e 1891 ± 3 Ma (LAMARÃO; DALL'AGNOL, 2002; BORGES *et al.*, 2009)

3.2.1 Granito São Jorge Jovem

O Granito São Jorge Jovem (GSJJ) está localizado na região de Vila Riozinho, porção centro-leste da Província Aurífera do Tapajós (Figura 5), nos domínios da Província Ventuari-Tapajós (TASSINARI; MACAMBIRA, 2004) ou Tapajós-Parima (SANTOS *et al.*, 2000), e dista cerca de 300 km a sul da cidade de Itaituba. É intrusivo no Granito São Jorge Antigo e possui em sua porção central uma área intensamente fraturada e hidrotermalizada onde se localiza o depósito de ouro São Jorge. As fácies anfibólio-biotita monzogranito a quartzo monzonito (ABMG a ABQM) e biotita-leucomonzogranito (BLMZG) são as rochas

dominantes; apresentam granulação média, coloração cinza a cinza-rosada e textura granular hipidiomórfica; apatita, zircão, magnetita, titanita e allanita compõe a fase acessório. O GSJJ plota no campo de granitos de arco vulcânico ou pós-colisionais (PEARCE, 1996), apresenta assinatura cálcico-alcalina de alto-K e caráter fracamente metaluminoso a peraluminoso. Datação Pb-Pb em zircão forneceu idade de cristalização de 1891 ± 3 Ma (LAMARÃO *et al.*, 2002; BORGES *et al.*, 2009).

Figura 5- Mapa geológico da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, mostrando as áreas de ocorrência dos granitos São Jorge Antigo e São Jorge Jovem com suas respectivas idades de cristalização, e do depósito de ouro São Jorge.



Fonte: Modificado de Lamarão *et al.*, (2002).

3.3 APATITA COMO UM INDICADOR PETROLÓGICO E METALOGENÉTICO

A capacidade de incorporar elementos menores e traço em sua estrutura, durante o processo de cristalização magmática torna a apatita um mineral importante para o estudo da composição geoquímica do seu magma hospedeiro durante o curso de evolução magmática. Por isso, sua composição química tem se mostrado um bom indicador petrológico e metalogenético (DUTRA; FORMOSO, 1995; SHA; CHAMPELL, 1999; BELOUSOVA *et al.*, 2001, 2002; TOLEDO; PEREIRA, 2001; PROWATKE; KLEMME, 2006; CHU *et al.*, 2009). A composição da apatita pela fórmula definida em $A_{10}(ZO_4)_6X_2$, sofrendo substituição nas seguintes posições: $A = Ca^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}, Ba^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}, ETR^{3+}, Eu^{2+}, Ce^{4+}, Al^{3+}, Na^+$; $Z = P^{5+}, Si^{4+}, S^{6+}, Al^{3+}, As^{5+}, V^{5+}, CO_3^{-2}, SO_4^{-2}, CrO_4^{-2}, VO_4^{-2}$; $X = F^-, Cl^-, OH^{-2}, O^{-2}, CO_3^{-2}$.

Cristais de apatita foram utilizados para caracterizar petrológica e geoquimicamente granitos tipo I e tipo S do Lachland Fold Belt, Austrália (SHA; CHAMPELL, 1999), utilizando-se como critérios a afinidade química dos elementos presentes em cristais de apatitas, a associação com o conteúdo de sílica, a fugacidade de oxigênio e o nível do fracionamento dos magmas. Apatitas de granitos tipo S são enriquecidas em F e empobrecidas em Cl comparadas com apatita de granitos tipo I máficos. Por outro lado, apatitas de granitos tipo S possuem alto teor de Mn e Fe, resultante da fugacidade de oxigênio mais baixa de seu magma, em relação a apatitas de granitos tipo I máficos. Esses autores concluíram que a composição da apatita pode ser utilizada para identificar diferentes tipos de granitos.

As concentrações de elementos traço de apatitas de granitoides do Mt Isa Inlier, no NW de Queensland, obtidas através de análises de microsonda e ICP-MS (BELOUSOVA *et al.*, 2001) mostraram que a distribuição desses elementos, especialmente ETR, Y, Sr, Mn e Th, refletem fortemente as características químicas da rocha hospedeira. As variações nas concentrações desses elementos nas apatitas foram correlacionadas com o conteúdo de sílica, estado de oxidação do ferro, total de álcalis e índice de saturação em alumina (ASI). O enriquecimento relativo de Y, ETRP e Mn, e o empobrecimento em Sr nas apatitas reflete o grau de fracionamento do granito hospedeiro. Apatitas de granitos fortemente oxidados tendem a ter concentrações mais elevadas de ETRL em relação aos ETRP. Concentrações de Mn são mais elevadas em apatitas de granitos reduzidos porque o Mn^{2+} substitui diretamente o Ca^{2+} . Como a composição de elementos traço da apatita reflete a composição química da rocha total, ela pode ser um indicador mineral útil para o reconhecimento de granitos com

mineralizações específicas. A exemplo, da apatita proveniente do depósito Ehrenfriedersdorf, mineralizados em Sn e W, que apresentam enriquecimento em ETRP, Mn e U (KEMPE; GÖTZE, 2002).

Em rochas granitoides, dominam fluorapatitas com teores de F entre 1,3 e 2,8 % que tendem a aumentar com a diferenciação; o Cl em apatitas se correlaciona negativamente com o F e concentrações de 0,5-2,0 % são encontradas em apatitas de rochas menos fracionadas. Granitoides altamente fracionados podem conter apatitas enriquecidas em Rb e Y, este último com teores mais elevados em apatitas de pegmatitos. A presença de ETR em apatitas permite a separação entre granitos oxidados e reduzidos. Granitos oxidados contêm apatitas enriquecidas em ETRL, enquanto os reduzidos apresentam redução de ERTL (BELOUSOVA *et al.*, 2002).

O estabelecimento de uma assinatura geoquímica em apatita a partir de elementos menores e traço para granitos estaníferos, correlacionados a assinaturas já estabelecidas para zircão e quartzo mostram que a apatita tem potencial para ser um indicador petrológico e metalogenético, auxiliando, em estudos de proveniência, na identificação de fracionamento magmático, e como indicador preliminar de corpos graníticos estaníferos.

4 RESULTADOS

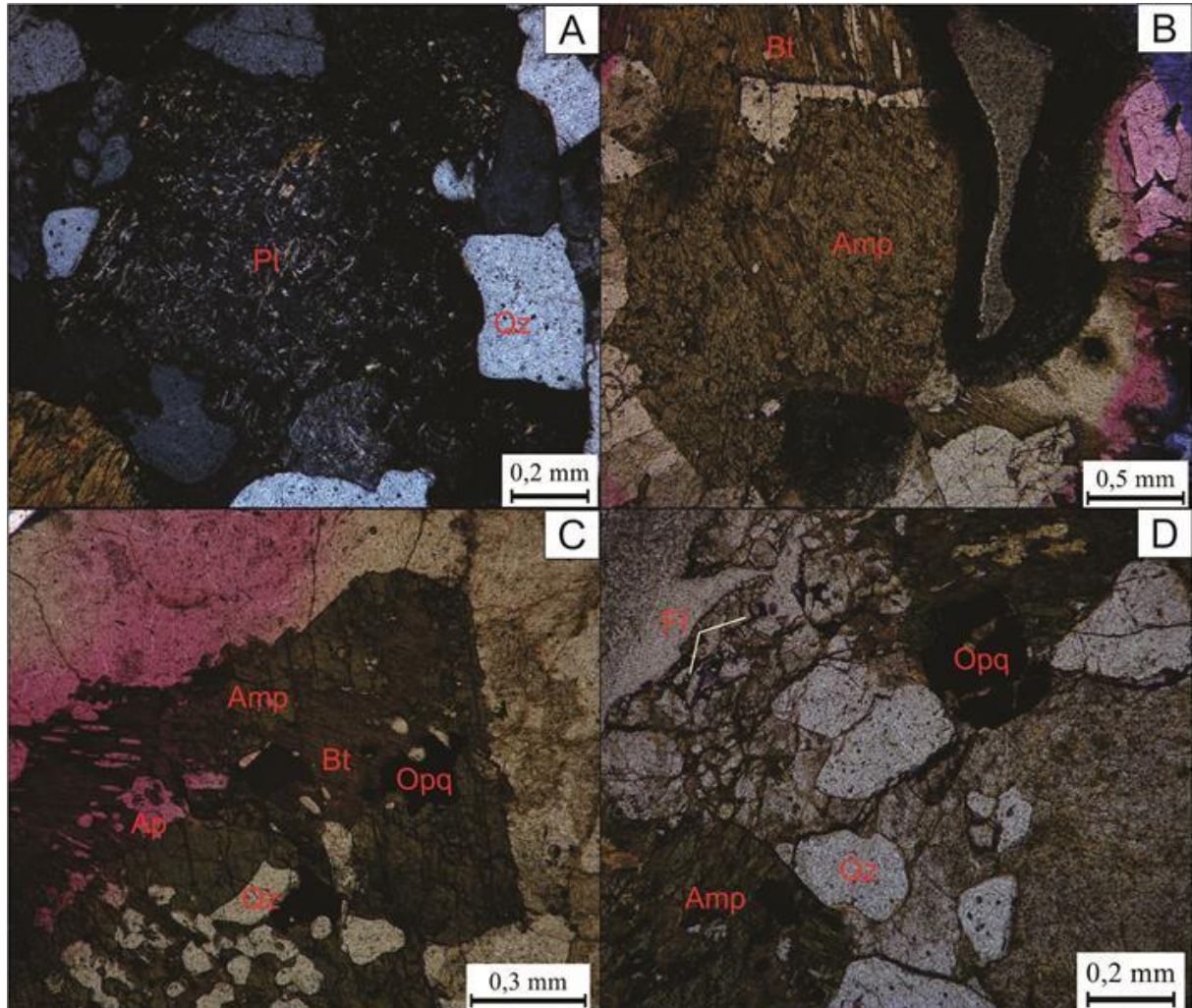
4.1 ASPECTOS PETROGRÁFICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS

4.1.1 Granito Antônio Vicente

O Granito Antônio Vicente estudado em detalhe por Teixeira e Dall'Agnol, (1991); Dall'Agnol, Teixeira e Magalhães, (1993); Teixeira, (1999); Teixeira, Bello e Bettencourt, (2002); Teixeira *et al.*, (2005). Foi dividido em quatro fácies principais, todas afetadas por alterações tardi- a pós-magmáticas em diferentes intensidades: 1) Biotita-anfibólio sienogranito com biotita-anfibólio monzogranito subordinado (BASMG); 2) Anfibólio-biotita sienogranito, biotita-anfibólio sienogranito a álcali-feldspato granito (BASAFG), biotita sienogranito com clorita e álcali-feldspato granito (AFG); 3) Biotita sienogranito (BSG) com as variedades alterado (BSGA) e intensamente alterado (BSGIA), e 4) Biotita monzogranito (BMG) com biotita sienogranito subordinado. Para este estudo foram selecionadas apatitas dos BASMG (GFE-01, IE-04), BMG (GAM-CS-54) e BSG (SL-06-DT) com variação de BSGA (NE-82).

As rochas do BASMG têm textura hipidiomófica heterogranular de granulação média, contendo $M > 5\%$. O plagioclásio, feldspato-alcálico e quartzo compõem os minerais essenciais e a biotita e anfibólio como os principais minerais ferromagnesianos; o zircão, apatita, titanita, allanita e minerais opacos são os minerais acessórios. Os cristais de plagioclásio são subédrico, maiores que 1 mm, zonados e com alteração de sericita e argilominerais (Figura 6A). Os cristais de feldspato-alcálico são subédricos, por vezes, anédricos e variam de finos a médios; são formados por processo de “microclinização” do plagioclásio, desenvolvendo contatos irregulares ou interpenetrantes com o plagioclásio ou entre si (TEIXEIRA, 1999). O quartzo se apresenta como cristais anédricos e subédricos, com contatos irregulares e localmente retos, sendo pouco fraturados. Composto os minerais máficos, o anfibólio ocorre na forma de cristais anédricos a subédricos, com tamanhos de 2 e 3 mm. Mostram contatos retos e interpenetrantes, formando agregados com plagioclásio, minerais opacos e apatita; localmente altera para biotita (Figura 6B). A biotita forma lamelas anédricas e subédricas marrom-avermelhadas a marrom-amareladas; inclusões de apatita e opacos são comuns (Figura 6C). Os minerais acessórios ocorrem geralmente associados aos minerais máficos; a apatita aparece na forma de prismas hexagonais, como mineral acessório secundário ocorre a fluorita, porém é raro (Figura 6D).

Figura 6- Fotomicrografias dos BASMG. A) Cristal de plagioclásio alterado por sericita e argilominerais. B) Cristal subédrico de anfibólio alterado para biotita e inclusão de apatita. C) Seção basal de anfibólio sendo alterada para biotita ao longo dos planos de clivagem, contendo inclusões de apatita e minerais opacos. D) Cristais de fluorita em porções mais alteradas da rocha; anfibólio alterado e plagioclásio intensamente saussuritizado ocorrem associados. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



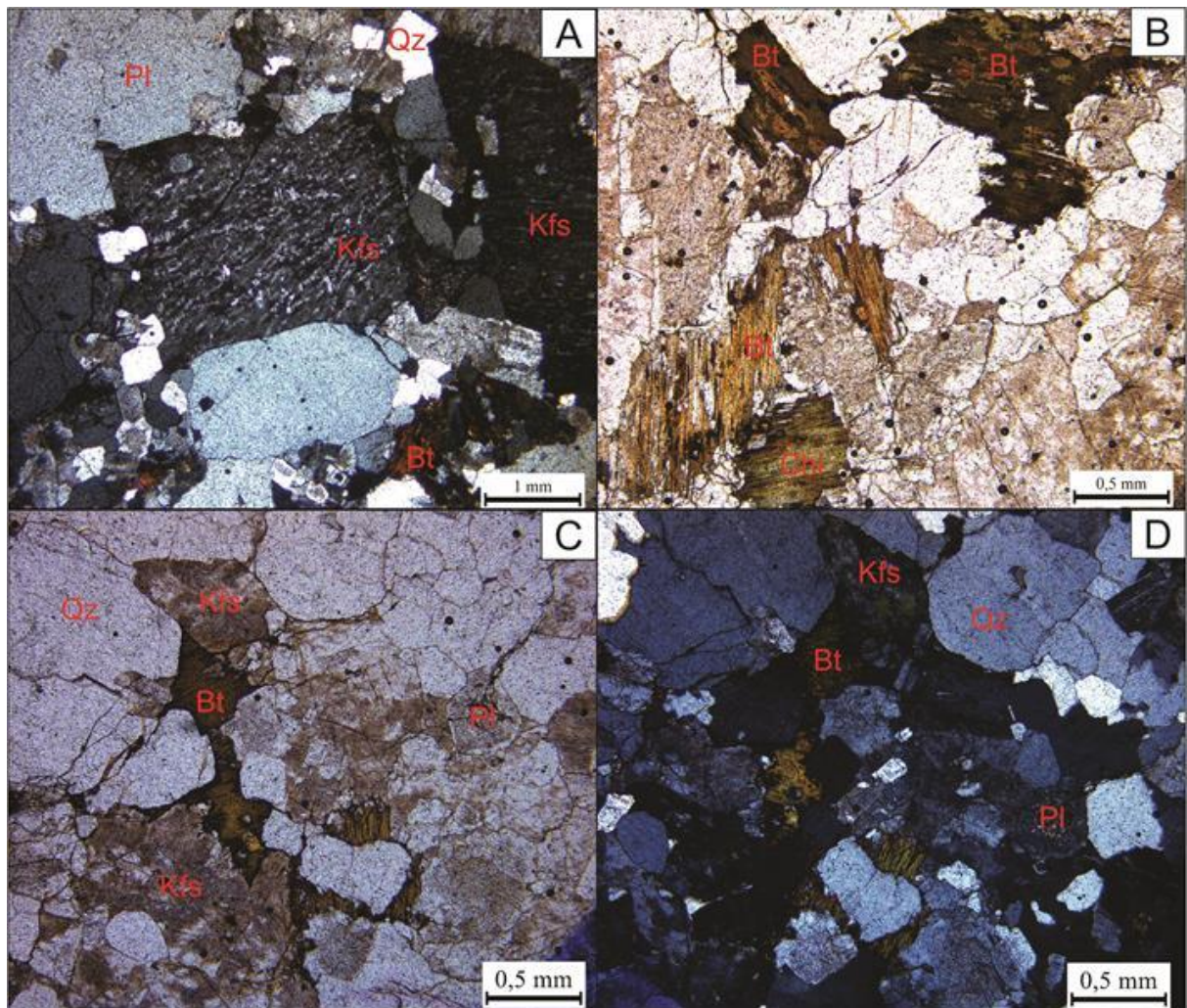
Fonte: Do autor

Os BMG exibem textura hipidiomórfica equigranular a heterogranular média. Quartzo, feldspato-alcálico e plagioclásio são os minerais essenciais e a biotita o ferromagnésico dominante. Como fases acessórias ocorrem o zircão, minerais opacos, apatita e, subordinadamente, monazita.

O plagioclásio (3 a 5 mm) é subédrico, mostra contato reto a irregular com os demais minerais e alteração para sericita, muscovita, fluorita e epidoto. O feldspato-alcálico é subédrico, apresenta comumente intercrescimento micropertítico e alteração para argilominerais (Figura 7A). O quartzo tem formas anédricas e localmente apresenta feições de recristalização. Composto os minerais máficos a biotita é marrom-avermelhada, subédrica a

anédrica e contém inclusões de apatita, zircão e opacos (Figura 7B). Os minerais acessórios são constituídos pela apatita que ocorre na forma de prismas hexagonais ou como cristais subarredondados. O zircão e a titanita são subédricos a anédricos e inclusos na biotita e opacos (Figura 7C e D).

Figura 7- Fotomicrografias dos BMG. A) Cristal subédrico de feldspato-alcálico com intercrescimento micropertítico; cristal de plagioclásio pouco alterado; cristal anédrico de quartzo. B) Cristal subédrico de biotita cloritizado. C) Cristal subédrico de biotita intersticial aos demais minerais. D) Aspectos texturais da rocha, composta pelos cristais de feldspato-alcálico, plagioclásio, quartzo e biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).

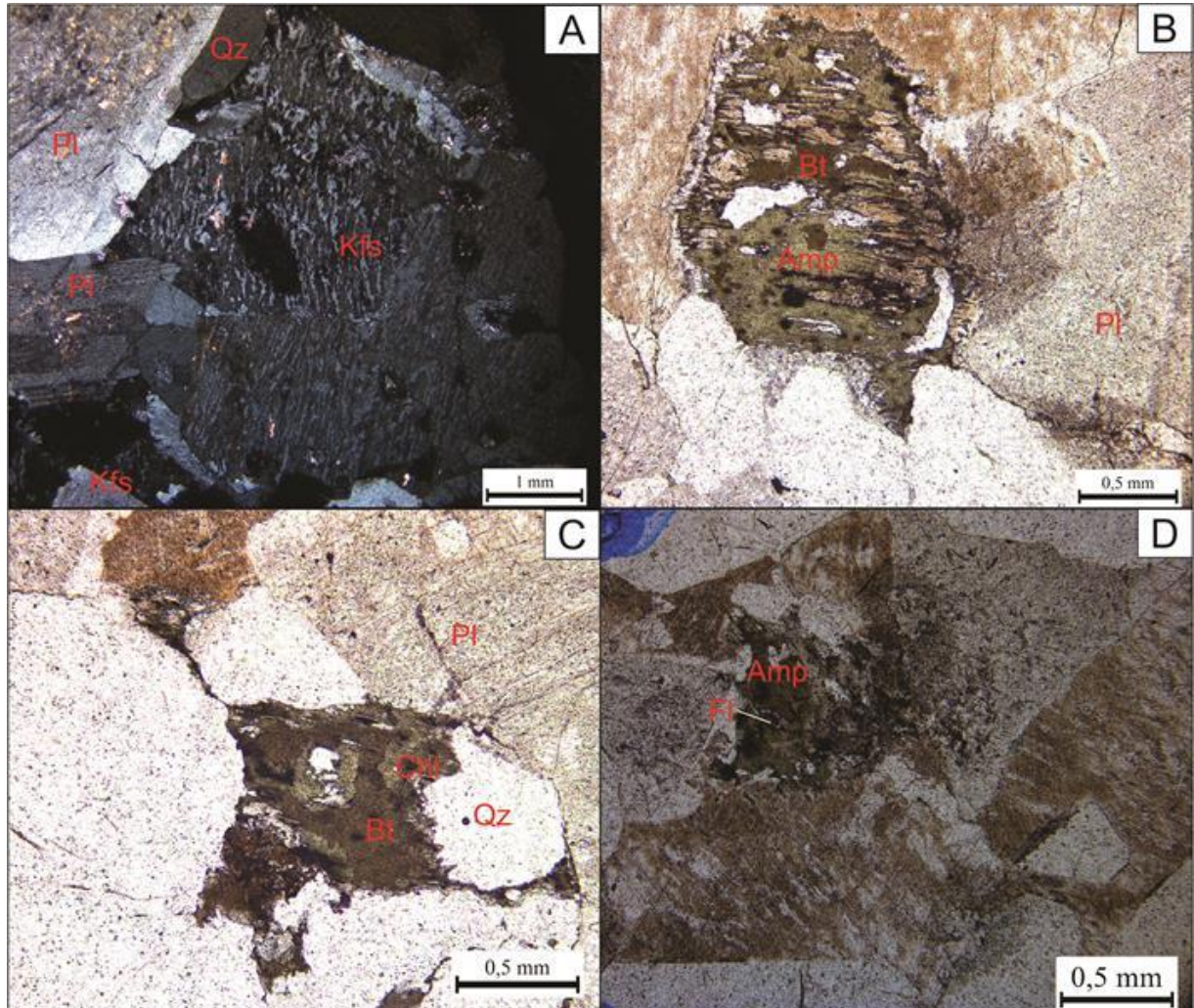


Fonte: Do autor.

Os BSG e BSGA são representadas por rochas com alteração tardi- a pós-magmática mais intensa que as anteriores, com textura granular de granulação média a grossa. São mais enriquecidas em feldspato-alcálico e empobrecidas em plagioclásio, anfibólio e biotita (TEIXEIRA; DALL'AGNOL, 1991). Com relação aos minerais acessórios, existe uma maior ocorrência de zircão, allanita e epidoto e menor de apatita e titanita nessas rochas.

O feldspato-alcálico (>5 mm) é resultado da “microclinização” do plagioclásio (Figura 8A); texturas peritíticas são comuns. Os cristais de plagioclásio (3 a 4 mm) são subédricos a anédricos e com alteração de sericita e argilominerais. O quartzo é anédrico apresenta feições de recristalização. Na assembleia que compõe os minerais máficos raros pseudomorfos de anfibólio aparecem com bordas irregulares, intensamente alterados para biotita (Figura 8B). A biotita é anédrica, com inclusões de quartzo, zircão e apatita, se encontra intensamente cloritizada (Figura 8C). Na fase acessória a apatita exibe forma anédrica e tamanho reduzido quando comparado a apatita da fácies BASMG, aparecendo comumente inclusa em anfibólio. A fluorita aparece como mineral secundário resultado das alterações tardi- a pós-magmática (Figura 8D). Segundo a ordem de cristalização estabelecida por Teixeira (1999) para os minerais das fácies BASMG, BMG e BSG, a apatita aparece como mineral cristalizado no estágio magmático, juntamente com zircão e minerais opacos.

Figura 8- Fotomicrografias dos BSG e BSGA. A) Cristal subédrico de feldspato-alcálico perítico alterado para argilominerais; cristal subédricos de plagioclásio zonado, alterado para sericita e argilominerais; cristal anédrico de quartzo. B) Cristais subédricos de anfíbólio intensamente transformados para biotita e clorita; inclusões de opacos aparecem dispersas. C) Cristal subédrico de biotita alterada para clorita e intersticial ao plagioclásio e quartzo. D) Pseudomorfos de anfíbólio com inclusões de fluorita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



Fonte: Do autor.

4.1.2 Granito Redenção

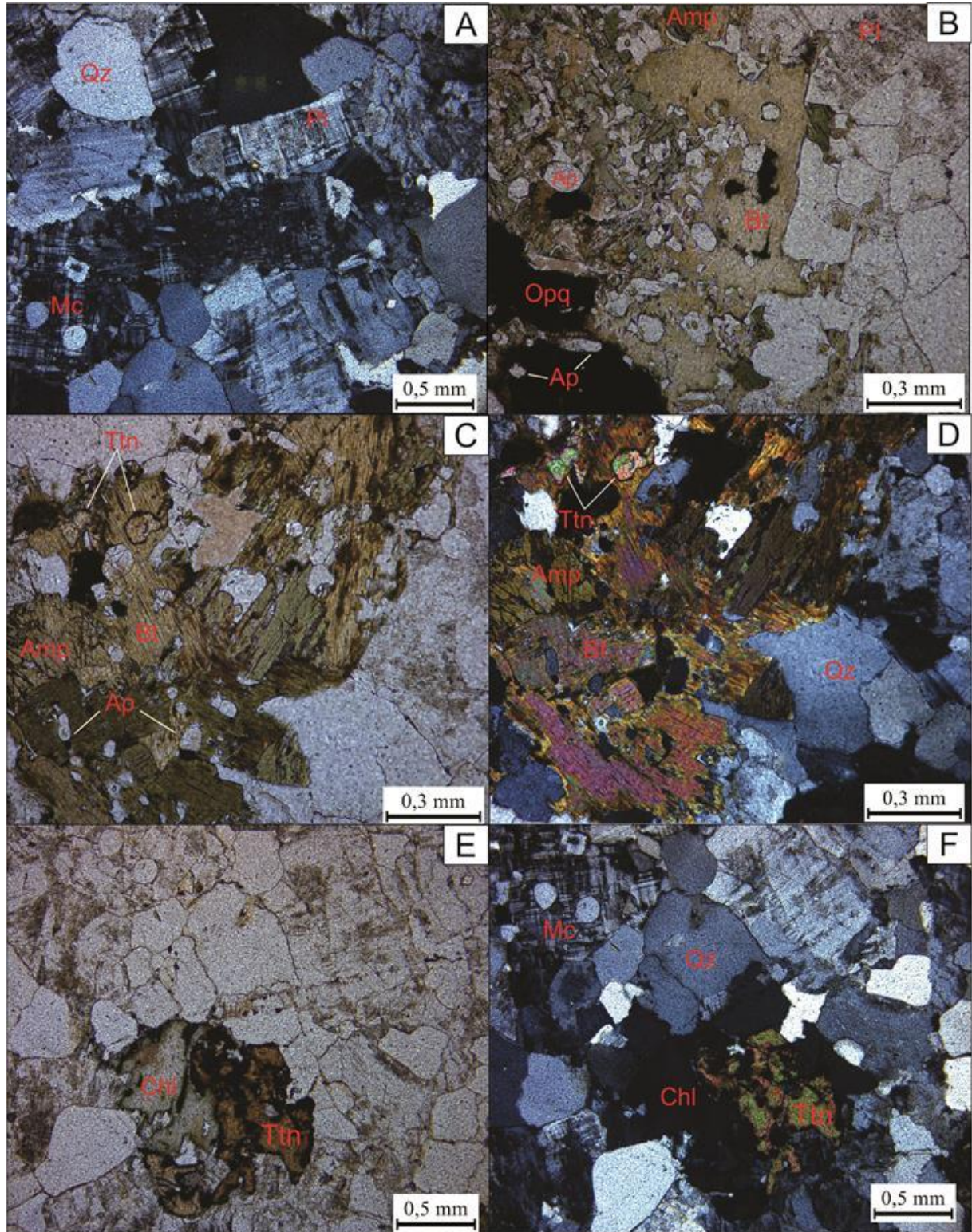
O Granito Redenção possui nove diferentes fácies, com as rochas mais evoluídas ocupando a porção central e as menos evoluídas se concentrando ao longo da borda sudeste do corpo (OLIVEIRA *et al.*, 2005, 2009a). Foram estudadas a apatita das fácies biotita monzogranito (BMG), amostra DCR-33B e leucomonzogranito amostra DC-120.

Os BMG apresentam textura granular hipidiomórfica, equigranular, de granulação média (Figura 9A). O plagioclásio, microclina e quartzo compõem os minerais essenciais, a

biotita é o mineral ferromagnesiano dominante e apatita, titanita, allanita e opacos os principais acessórios. Sericita, clorita, epidoto e biotita são as principais fases secundárias.

Os minerais félsicos são compostos por cristais euédricos a subédricos de plagioclásio, zonado e com composição oligoclásio sódico a albita, podendo atingir de 0,5 a 4,0 mm; encontra-se fraca a intensamente alterado para sericita e \pm epidoto, principalmente no núcleo. Os cristais de microclina são subédricos, com tamanhos de 0,8 a 4,0 mm. O quartzo é anédrico e intersticial. A assembleia de minerais máficos nessa fácies atingem 6,9% (OLIVEIRA *et al.*, 2005) são representados por biotita, variando de 0,5 a 3,0 mm, cor marrom-pálido e com frequentes inclusões de apatita e titanita (Figura 9B); o anfibólio ocorre como cristais reliquiares finos, com tamanhos maiores que 1 mm e intensamente alterados para biotita (Figura 9C). Os minerais acessórios são compostos principalmente por apatita prismática, pouco fraturada (Figura 9D). A titanita é subédrica a anédrica incluída em cristais de anfibólio e biotita (Figura 9E e F). A clorita aparece nas porções mais alteradas (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Figura 9- Aspectos petrográficos dos BMG. A) Textura granular hipidiomórfica característica, com a presença de cristais de plagioclásio, quartzo e microclina. B) Cristais subédricos e subarredondados de apatita incluídos na biotita; minerais opacos aparecem associados. C) Cristais de biotita e anfibólio associados, conjunto comum de minerais máficos. D) Cristais de anfibólio alterados para biotita com inclusões de apatita e titanita. E) Presença de titanita anédrica associada à clorita. F) Cristais anédricos de titanita como mineral acessório. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).

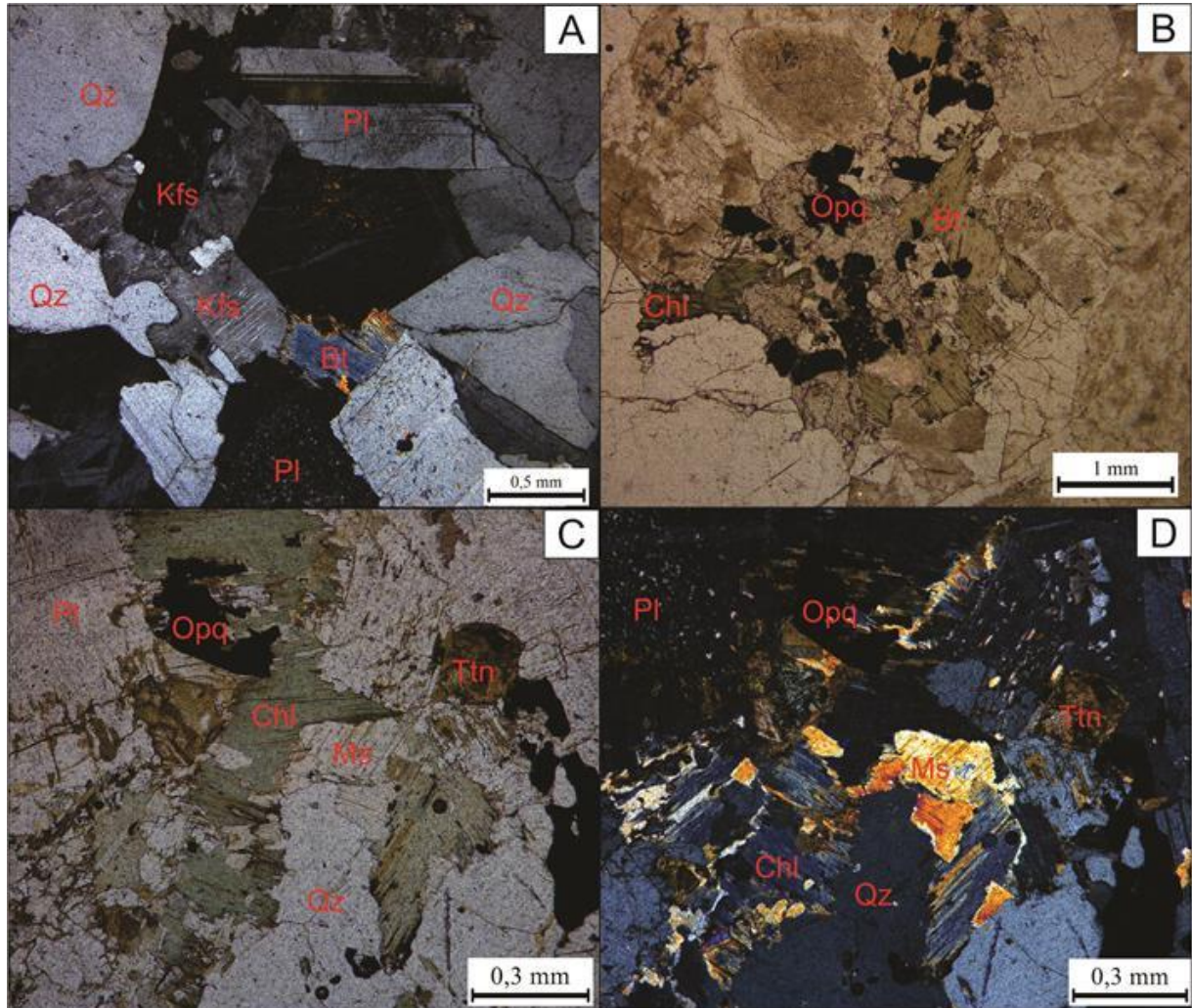


Fonte: Do autor.

As rochas leucomonzograníticas contêm menos de 3% de minerais máficos, estando relacionadas as fácies mais evoluídas do corpo Redenção (OLIVEIRA *et al.*,2009a). Composta por rochas de textura granular hipidiomórfica, equigranulares e de granulação grossa. O feldspato potássico, quartzo e plagioclásio são as fases essenciais e a biotita o ferromagnesiano presente. Como acessório ocorrem a allanita, titanita e apatita. Os minerais secundários são clorita, titanita, fluorita e sericita.

Os cristais de feldspato potássico (5 a 10 mm), mostram forma subédrica a anédrica localmente com alteração para argilominerais. O plagioclásio (4 a 6 mm) esta presente em quantidades menores nesta fácies, é subérico e frequentemente sericitizado. O quartzo, com 33% modal e tamanho variando de 2 a 5 mm (Figura 10A), é representado por cristais anédricos com frequentes intercrescimentos granofíricos com cristais de feldspato potássico. Os minerais máficos são reduzidos quando comparados as fácies anteriores, o anfibólio é ausente ou relíquiar, porém quando presente aparece transformado para biotita. A biotita é subédrica, frequentemente contendo inclusões de apatita e quartzo, sendo comum a ocorrência de fluorita. Como mineral secundário a clorita (5 mm) exhibe cor verde oliva e forma subédrica (Figura 10B e C). Comumente associado aos minerais máficos ocorrem allanita, muscovita e titanita (Figura 10D). Segundo Oliveira *et al.*(2005), que estabelece a sequencia de cristalização com base na observação das diferentes fácies, a apatita aparece como cristalizada em estágio magmático.

Figura 10- Fotomicrografia dos LMG. A) Rocha de textura hipidiomórfica, composta por biotita, plagioclásio, quartzo e feldspato potássico. B) Cristais de biotita cloritizado em associação aos minerais opacos. C) Associação de minerais máficos na rocha, representado por clorita, titanita e opacos. D) Cristais de titanita e muscovita como minerais acessórios. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



Fonte: Do autor.

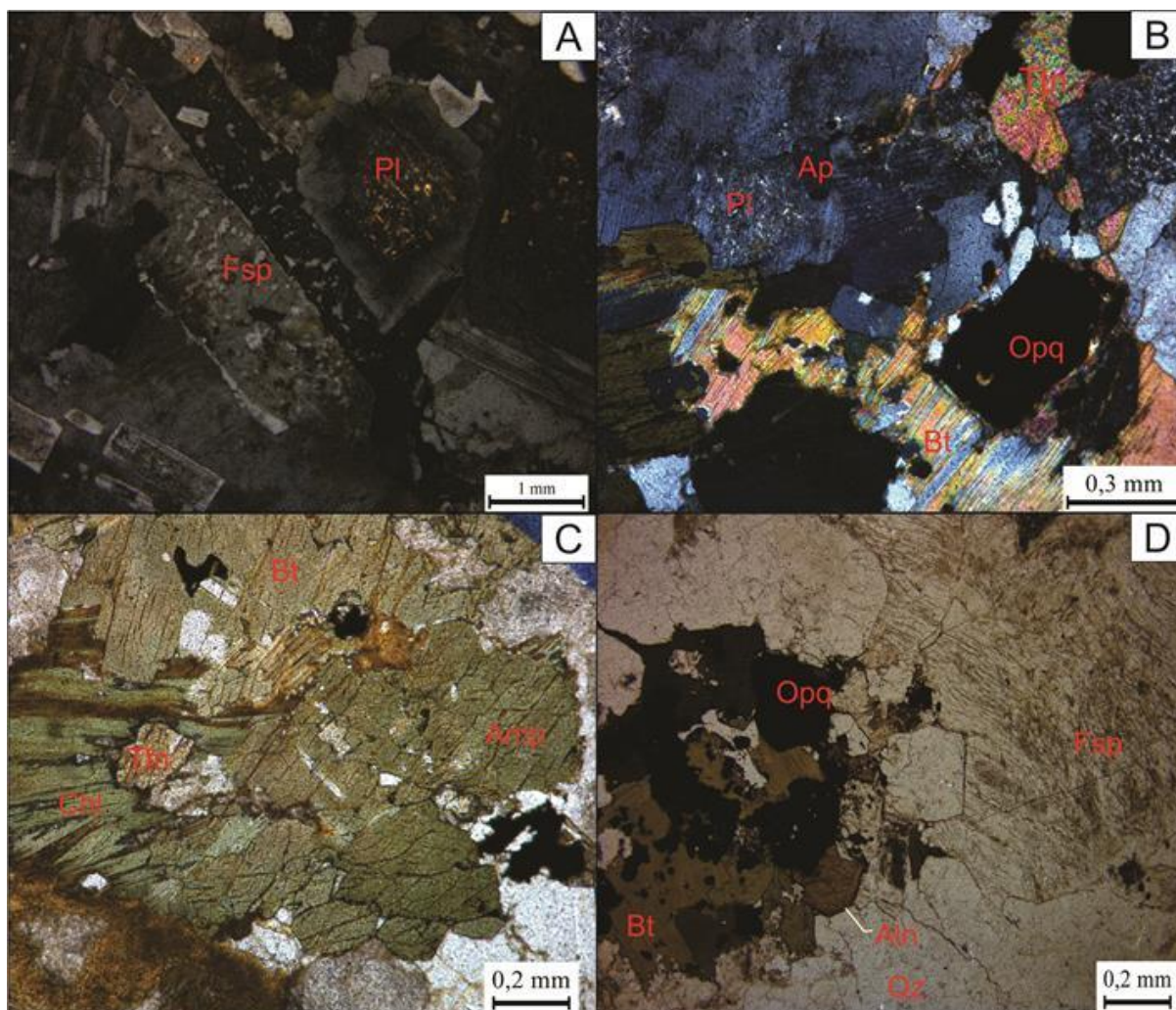
4.1.3 Granito Jamon

O Granito Jamon (DALL'AGNOL *et al.*, 1999) é composto por três principais fácies: 1) Anfibólio-biotita monzogranito (ABMG); 2) Biotita monzogranito (BMG) e, 3) Leucomonzogranito (LMG). Neste foram estudado as apatitas ABMG (amostra AU-391) e BMG (amostra AU-375).

Os ABMG exibem textura granular média, com cristais equigranulares, são as rochas mais abundantes do corpo. O plagioclásio, feldspato-alcálico, quartzo compõem os minerais essenciais e o anfibólio e biotita os principais minerais ferromagnesianos. A apatita, titanita e allanita pertencentes a fase acessória. Os cristais de plagioclásio (2 mm) são localmente

zonados e saussuritizado; do tipo andesina ($An < 41$) com variação para oligoclásio cálcico ($An > 25$) (Figura 11A). O feldspato-alkalino tem forma subédrica e tamanho maior que 6 mm; intercrescimento micropertítico e alterações para argilominerais são comuns. Os cristais de quartzo são anédricos e comumente mostram intercrescimentos granofíricos. O conteúdo de minerais máficos é maior nessa fácies e o anfibólio descrito como hornblenda aparece constantemente associado com o plagioclásio e biotita (Figura 11B). A hornblenda (~2mm) comumente associada ao plagioclásio, é subédrica e com intensa alteração para biotita (Figura 11C). A biotita (~1mm) é marrom-avermelhada e alterada para clorita; inclusões de apatita e titanita são comuns. A apatita e titanita aparecem como importantes minerais acessórios (Figura 11D); a apatita tem forma acicular e hexagonal, porém em menor quantidade e tamanho que na fácies anterior e a titanita exibe forma anédrica incluída em cristais de anfibólio.

Figura 11- Aspectos petrográficos dos ABMG. A) Cristal subédrico de feldspato-alkalino com intercrescimento mimerquítico; cristal subédrico de plagioclásio zonado e com alteração de sericita. B) Minerais ferromagnesianos de biotita e anfibólio, com inclusões de titanita. C) Cristal subédrico de anfibólio intensamente alterado. D) Associação de minerais máficos.



Fonte: Do autor.

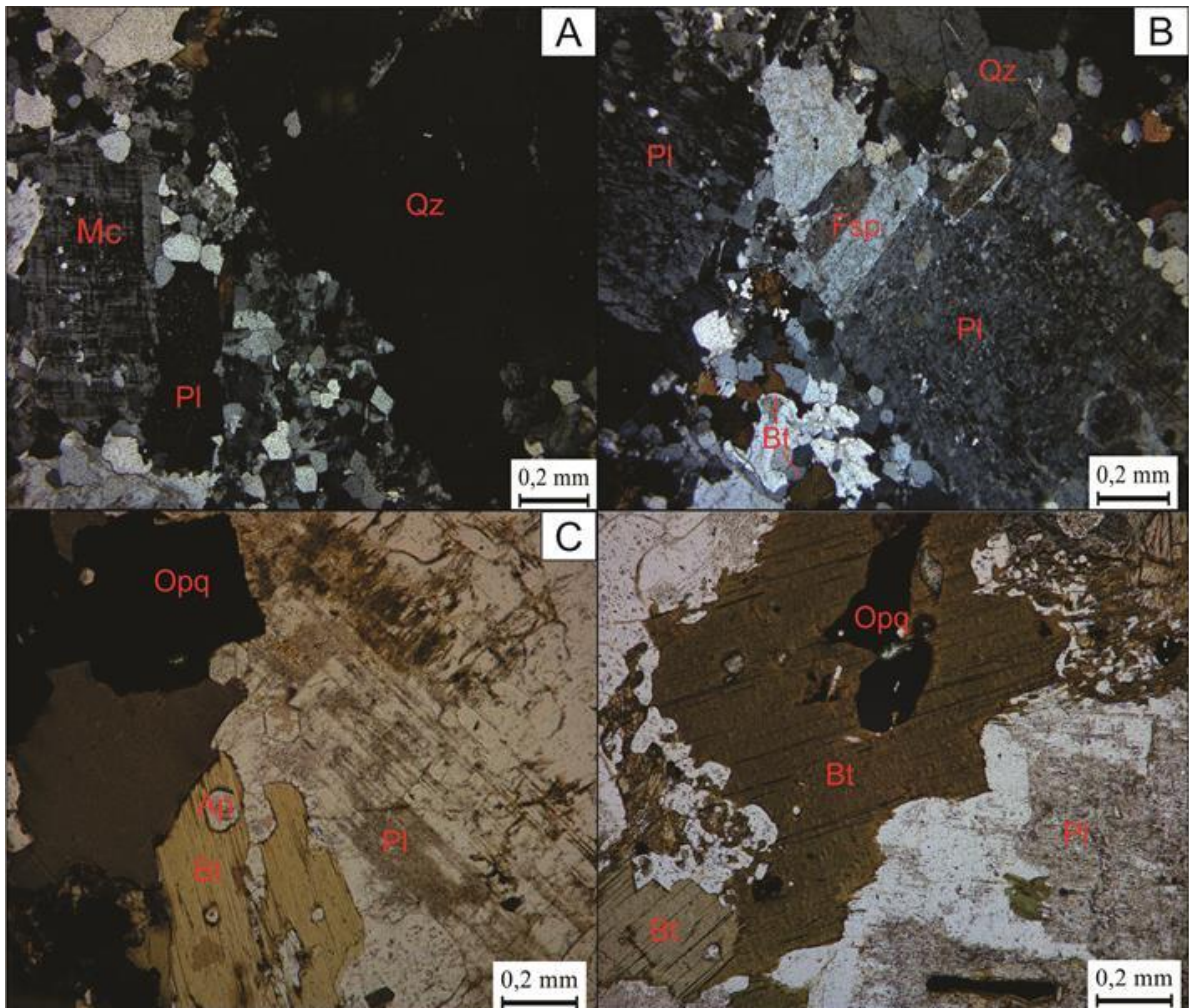
Os BMG são mais restritos ao centro do corpo; o anfibólio foi quase totalmente transformado para a biotita, que passa a ser a fase máfica dominante. Minerais opacos, apatita e titanita são os principais acessórios.

A rocha tem textura granular, de granulação fina com cristais equigranulares. O plagioclásio, comumente zonado, passa a ter uma composição mais sódica ($An < 25$), apresenta-se saussuritizado e transformado para argilominerais (Figura 12A). O feldspato-alkalino, classificado como microclina e ortoclásio, exibe maclamento característico e alteração para argilominerais (Figura 12B). Os cristais de quartzo localizados nas bordas dos cristais de plagioclásio são anédricos a arredondados e menores que 0,2 mm; os cristais maiores que 0,4 mm são anédricos, localmente subarredondados. Os minerais máficos são compostos pelo anfibólio quase inteiramente alterado para biotita, aparecendo como mineral

reliquiar. A biotita apresenta forma subédrica, marrom-avermelhada e com inclusões de biotita, geralmente se encontra associada a cristais opacos e alterada para clorita (Figura 12C). A apatita, titanita e zircão aparecem como minerais acessórios; A apatita é prismática acicular (Figura 12D), porém, em menor quantidade e tamanho que nas fácies anteriores, e os cristais de zircão e titanita são subarredondados associados a biotita.

Na sequencia de cristalização descrita por Dall’Agnol *et al.*(1999), a apatita, zircão, magnetita e ilmenita \pm clinopiroxênio são cristalizadas ainda em estágio magmático.

Figura 12- Fotomicrografias dos BMG. A) Aspectos texturais dos cristais de microclina, plagioclásio e quartzo. B) Cristais finos de quartzo bordejando o plagioclásio, sericitizado e bem desenvolvido C) Cristal subédrico de biotita com inclusão de apatita. D) Inclusões de opacos em cristal anédrico de biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



Fonte: Do autor.

4.1.4 Suíte Sanukitoide Rio Maria

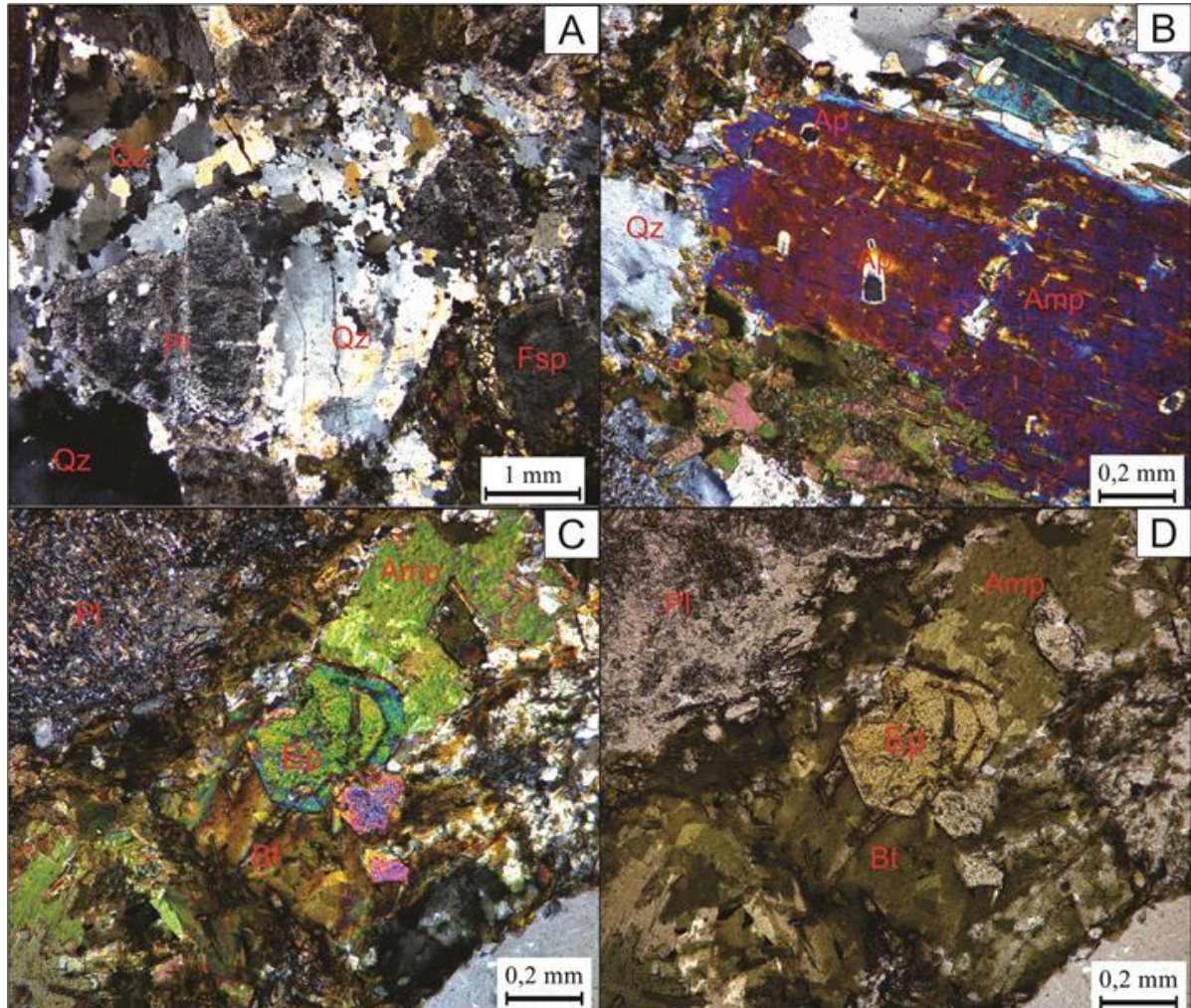
A Suíte Sanukitoide Rio Maria é dominada por rochas granodioríticas com ocorrências subordinadas de monzogranitos, além de quartzo dioritos, quartzo monzodioritos e rochas acamadadas. Os granodioritos, estudados neste trabalho, apresentam coloração cinza, com tons esverdeados decorrentes da alteração do plagioclásio; mostram textura hipidiomórfica e granulação média a grossa. Foram analisadas as apatitas das amostras ADR-3A e ADR-1, pertencente aos granodioritos.

Foram descritos como epidoto-biotita-anfibólio granodiorito de textura granular hipidiomórfica, granulação de média e cristais equigranulares. Os principais minerais máficos são o anfibólio, biotita e epidoto magmático; o plagioclásio se mostra intensamente saussuritizado e os principais acessórios são zircão, apatita, magnetita, titanita e allanita (OLIVEIRA *et al.*, 2009b).

O plagioclásio é subédrico (2 mm), originalmente zonado e intensamente saussuritizado, característica marcante dessas rochas, juntamente com a presença frequente de epidoto magmático. O quartzo é anédrico com tamanhos maiores que 1 mm e apresenta localmente feições de recristalização. O feldspato potássico exibe forma subédrica e é de formação tardia (Figura 13A). Dos cristais máficos, o anfibólio apresenta tamanho superior a 1 mm, é subédrico a euédrico, parcialmente alterado para biotita e subordinadamente titanita e epidoto (Figura 13B). A biotita primária tem forma subédrica, mostra inclusões de apatita e titanita, comumente associada a outros minerais máficos; mostra relações de equilíbrio com o epidoto magmático. A presença do epidoto magmático zonado, mostrando faces retas com anfibólio e biotita, é uma característica dessas rochas (Figura 13C e D). Na fase acessória a apatita, aparece na forma prismas hexagonais, inclusas em cristais de biotita e anfibólio, por vezes no plagioclásio. A titanita na forma de cristais subédricos, estão associados a minerais ferromagnesianos.

A ordem de cristalização dos minerais estabelecida por Ronaib e Oliveira (2013), com base nas análises texturais das assembleias mineralógicas, suas relações de contato e inclusões, assim como os efeitos dos processos pós-magmáticos e deformacionais atuantes no estágio subsolidus, a apatita aparece como mineral de cristalização magmática.

Figura 13- Feições petrográficas da Suíte Sanukitoides Rio Maria. A) Cristais subédricos de plagioclásio alterado e zonado; cristais anédricos de quartzo, fraturado e com feições de recristalização. B) inclusões de apatita prismática em cristal de anfibólio, principal fase máfica dos sanukitoides C) Cristal euédrico de epidoto, zonado e em associação a cristais de anfibólio e biotita. D) Cristal de epidoto magmático. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



Fonte: Do autor

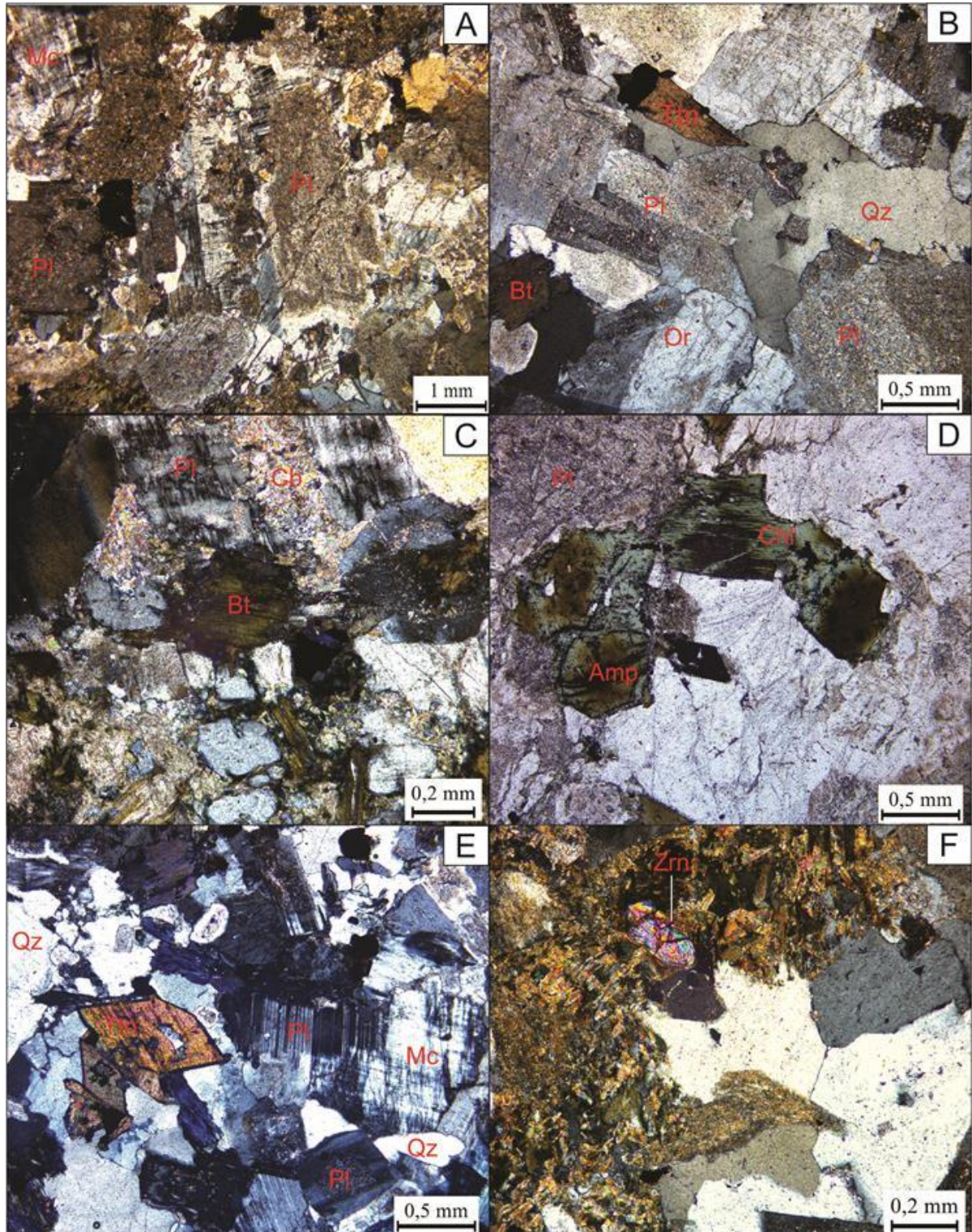
4.1.5 Granito São Jorge Jovem

O Granito São Jorge Jovem (GSJJ) possui duas fácies principais (LAMARÃO *et al.*, 2001, 2002): 1) Anfibólio-biotita monzogranito a quartzo monzonito (ABMZG a ABQM); 2) Biotita leucomonzogranito (BLMZG). Foram estudadas apatitas dos ABMG, amostras SJ-9/7, 7/4 e 2/5 e a BMG, amostra SJ-4/11.

Os ABMG são as rochas dominantes, apresentam granulação média, textura granular hipidiomórfica. São formados essencialmente por microclina, plagioclásio (andesina sódica a oligoclásio cálcico) e quartzo (Figura 14A), tendo como minerais ferromagnesianos a biotita e anfibólio e como acessórios o zircão, apatita, titanita, opacos e rara allanita.

A microclina (0,5 a 4,0mm), comumente apresenta intercrescimento micropertítico, inclusões de plagioclásio e quartzo, e alteração para argilomineral. O plagioclásio (~2 mm) é subédrico, com forte zoneamento normal-oscilatório e intensamente apresenta composição de andesina sódica a oligoclásio cálcico. Localmente ocorrem inclusões de zircão, titanita e apatita e intercrescimentos mirmerquíticos. O quartzo tem formas anédricas (0,3 a 2,6 mm) e extinção ondulante moderada (Figura 14B). Os minerais máficos são representados por cristais de biotita e anfibólio. A biotita dominante tem pleocroísmo castanho-claro a amarelo-pálido; é subédrica a anédrica (Figura 14C); apresenta inclusões de apatita e titanita. O anfibólio é esverdeado, subédrico e alterado para biotita, titanita, epidoto, carbonato e com inclusões frequentes de apatita e opacos (Figura 14D). Na fase acessório a titanita, zircão e apatita são identificadas, a titanita é subédrica ainda com características magmáticas (Figura 14E), a apatita na forma prismática ocorre principalmente inclusos em biotita, anfibólio e plagioclásio e o cristal subédrico de zircão incluído em biotita (Figura 14F).

Figura 14- Fotomicrografias dos ABMG. A) Cristal subédrico de plagioclásio zonado e saussuritizado. B) Textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterado, microclina, quartzo, biotita e titanita. C) Cristal subédrico de biotita cloritizado. D) Cristais de anfibólio alterados para biotita, clorita e mostrando inclusões de apatita. E) Cristal euédrico de titanita ainda com feição magmática. F) Cristal subédrico e subarredondado de zircão incluído em biotita. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010).



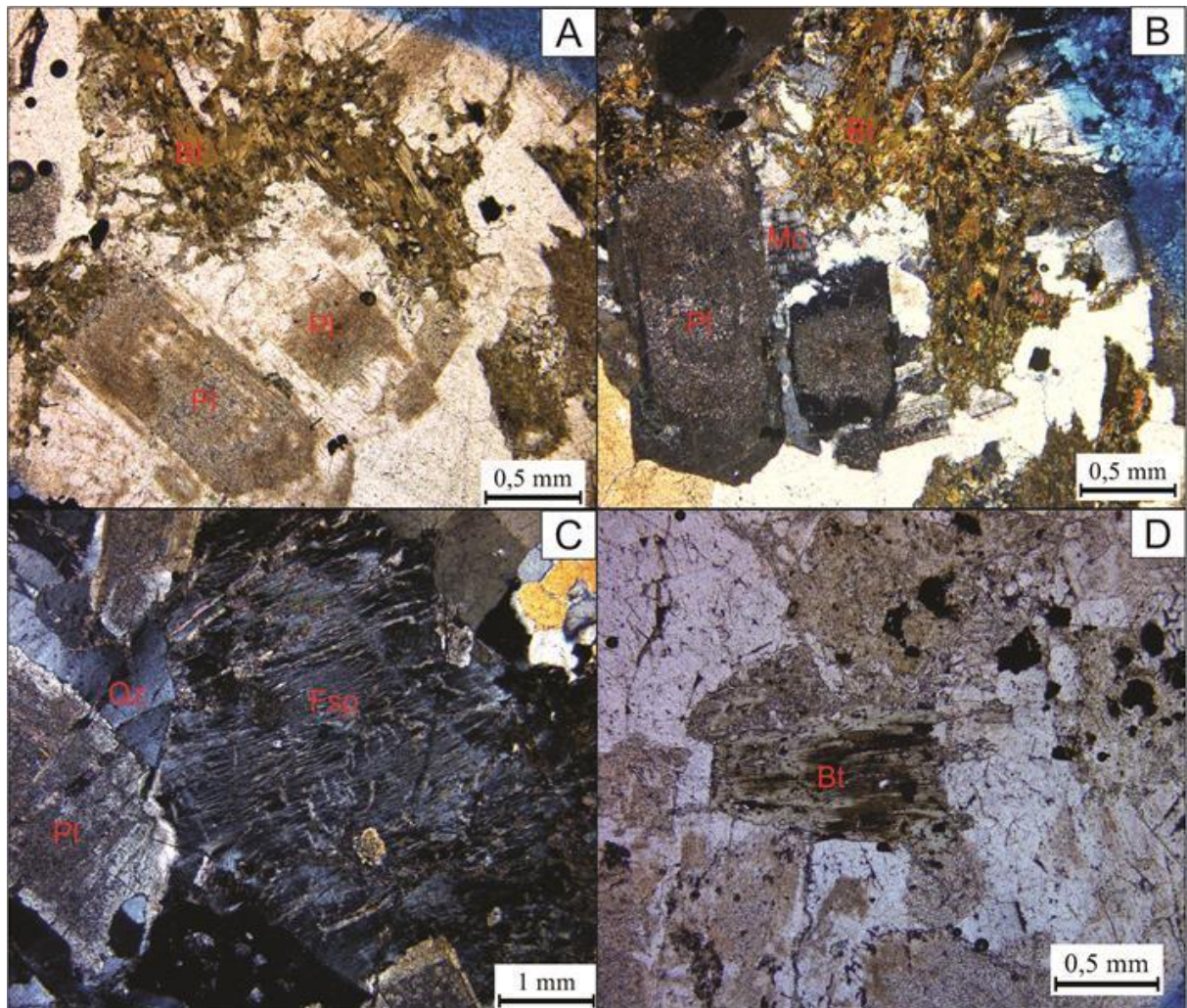
Fonte: Do autor.

A fácies biotita monzogranito (BMG) exibe textura granular hipidiomórfica de granulação média. O plagioclásio, quartzo e feldspato-alcálico compõem os minerais essenciais e a biotita aparece como principal mineral ferromagnésico. A fase acessória é composta por titanita, apatita e opacos.

O plagioclásio é subédrico, com tamanho de 0,5 a 1 mm, localmente zonado e intensamente alterado para sericita e argilominerais (Figura 15A e 15B). O feldspato-alcálico é subédrico, com tamanho variando de 2 a 3 mm, comumente alterado para argilominerais, e por vezes, com intercrescimento minerquítico (Figura 15C). O quartzo exibe a forma anédrica, se localizando intersticialmente aos demais minerais. A biotita é o principal mineral máfico exibe cor marrom-esverdeada, na forma de lamelas subédricas a anédricas, cloritizada e inclusões de titanita e opacos (Figura 15D).

Segundo Lamarão *et al.*,(2001), que estabelece a sequência de cristalização com base na observação das diferentes fácies, a apatita aparece como cristalizada em estágio magmático.

Figura 15- Fotomicrografias dos BMG. A) Cristais subédricos de biotita e plagioclásio, este alterado para argilominerais. B) Cristal subédrico de plagioclásio zonado. C) Textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterado, feldspato-alcálico, quartzo. D) Cristal de biotita cloritizado e com inclusões de apatita e opacos. Legenda conforme Whitney e Evans, (2010). Fonte: Do autor



Fonte: Do autor

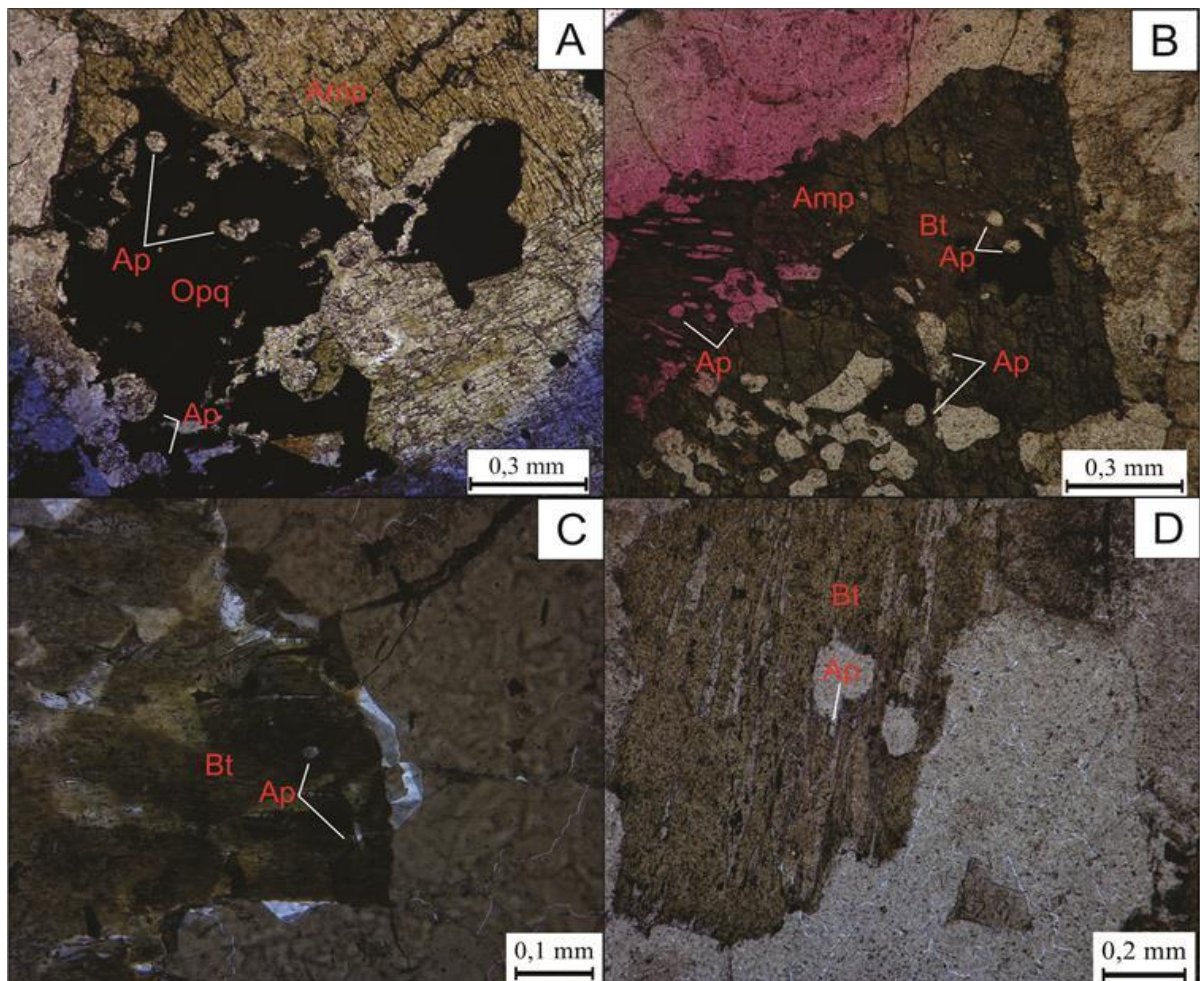
4.2 ASPECTOS MORFOLÓGICOS DAS APATITAS POR MEV-ERE

4.2.1 Granito Antônio Vicente

No Granito Antônio Vicente foram analisados vinte e nove cristais de apatita provenientes dos BASMG (amostras GFE-01 e IE-04), BMG (amostra GAM-CS-54), consideradas as rochas menos evoluídas; além dos BSG (amostra SL-06) e BSGA (amostra NE-82), portadores da mineralização.

A Figura 16 mostra imagens em luz transmitida de cristais de apatita obtidas nas diferentes fácies do Granito Antônio Vicente. Anfibólio, biotita e minerais opacos são os principais hospedeiros de cristais euédricos ou subédricos nas rochas menos evoluídas (BASMG e BMG). Nos BSG a apatita ocorre como cristais predominantemente finos e anédricos inclusos em cristais de biotita cloritizada.

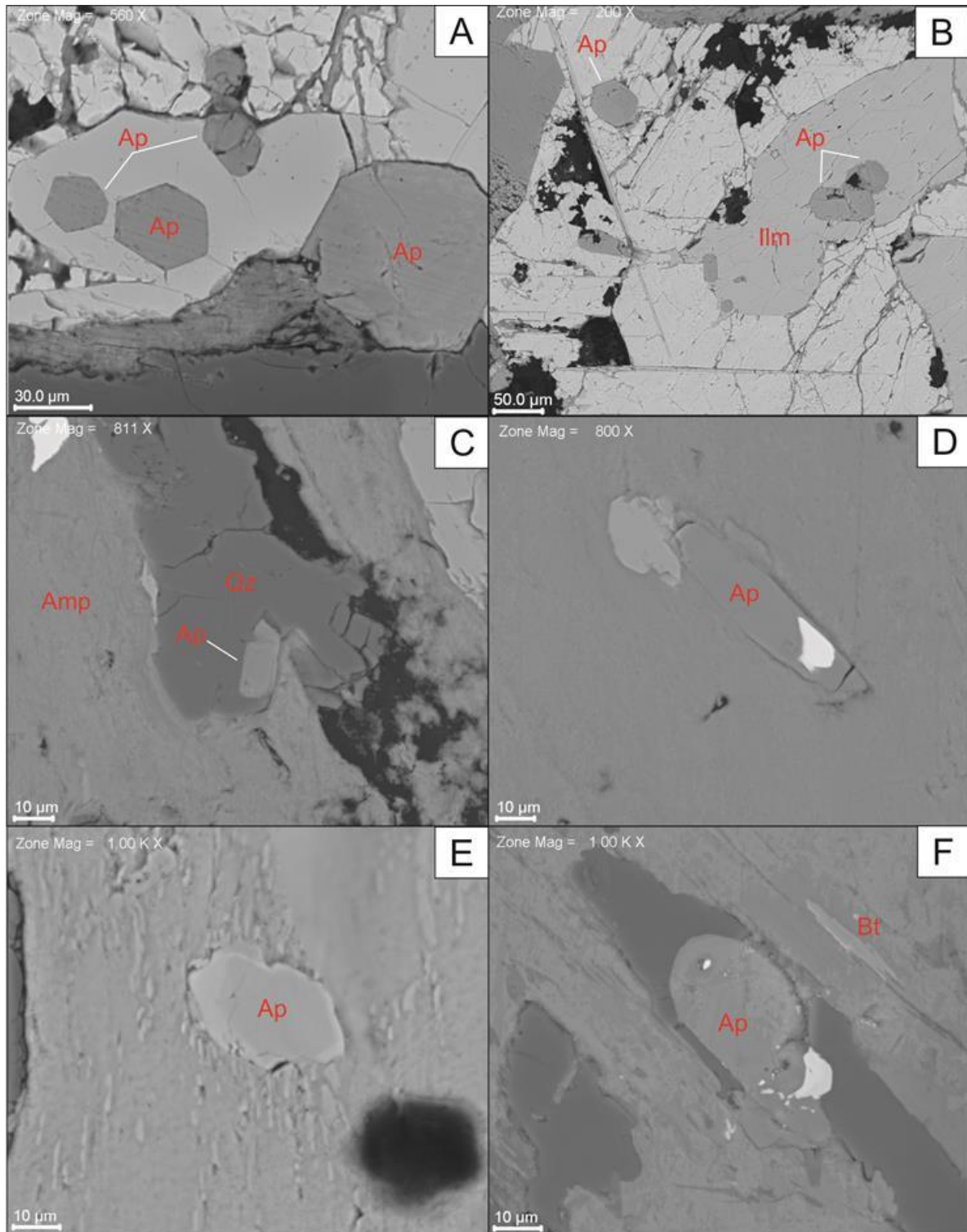
Figura 16- Imagens de cristais de apatita em luz transmitida. A) Cristais euédricos de apatita inclusos em minerais opacos (BASMG). B) Cristais euédricos a subédricos de apatita inclusos em anfibólio. C) Cristais de apatita inclusos em biotita (BMG). D) Cristal anédrico de apatita incluído em biotita cloritizada, na fácies BSGA. Fonte: Do autor



Fonte: Do autor.

A Figura 17 mostra imagens de ERE de cristais de apatita. A apatita dos BASMG, forma cristais prismáticos euédricos ou subédricos, com tamanho de 0,1 mm a 0,05 mm e pouco fraturados (Figura 17A); incluso em ilmenita (Figura 17B). Nos BMG a apatita apresenta características morfológicas intermediárias entre os BASMG e BSG, com redução significativa de tamanho, se apresentando mais fina que a anterior ($\sim 0,01$ mm). Entretanto, mantém a forma de cristais subédricos e pouco fraturados (Figura 17C). A apatita das rochas mineralizadas (BSG e BSGA) é representada por cristais anédricos, com tamanhos em torno de 0,01 mm e moderadamente fraturados, por vezes apresentando borda levemente mais clara (Figura 17E) e inclusões de outros minerais mais luminescentes. Comumente são encontradas como inclusões ou associadas a minerais ferromagnesianos (Figura 17F).

Figura 17- Imagens de ERE de cristais de apatita. A) Apatita pertencente à fácies BASMG, na forma de prismas hexagonais, bem desenvolvidos e pouco fraturados. B) Cristais de apatita da fácies BASMG incluída em cristais de ilmenita. C) Apatita dos BMG, com forma subédrica, porém com tamanhos inferiores ao das rochas anteriores. D) Cristal subédrico de apatita com inclusões de mineral mais luminescente (não identificado). E) Cristal subarredondado de apatita com borda mais clara, sugerindo zoneamento composicional nos BSG. F) Cristal subarredondado de apatita incluída em biotita nos BSG; finas inclusões luminescentes (não identificadas) são comuns.



Fonte: Do autor

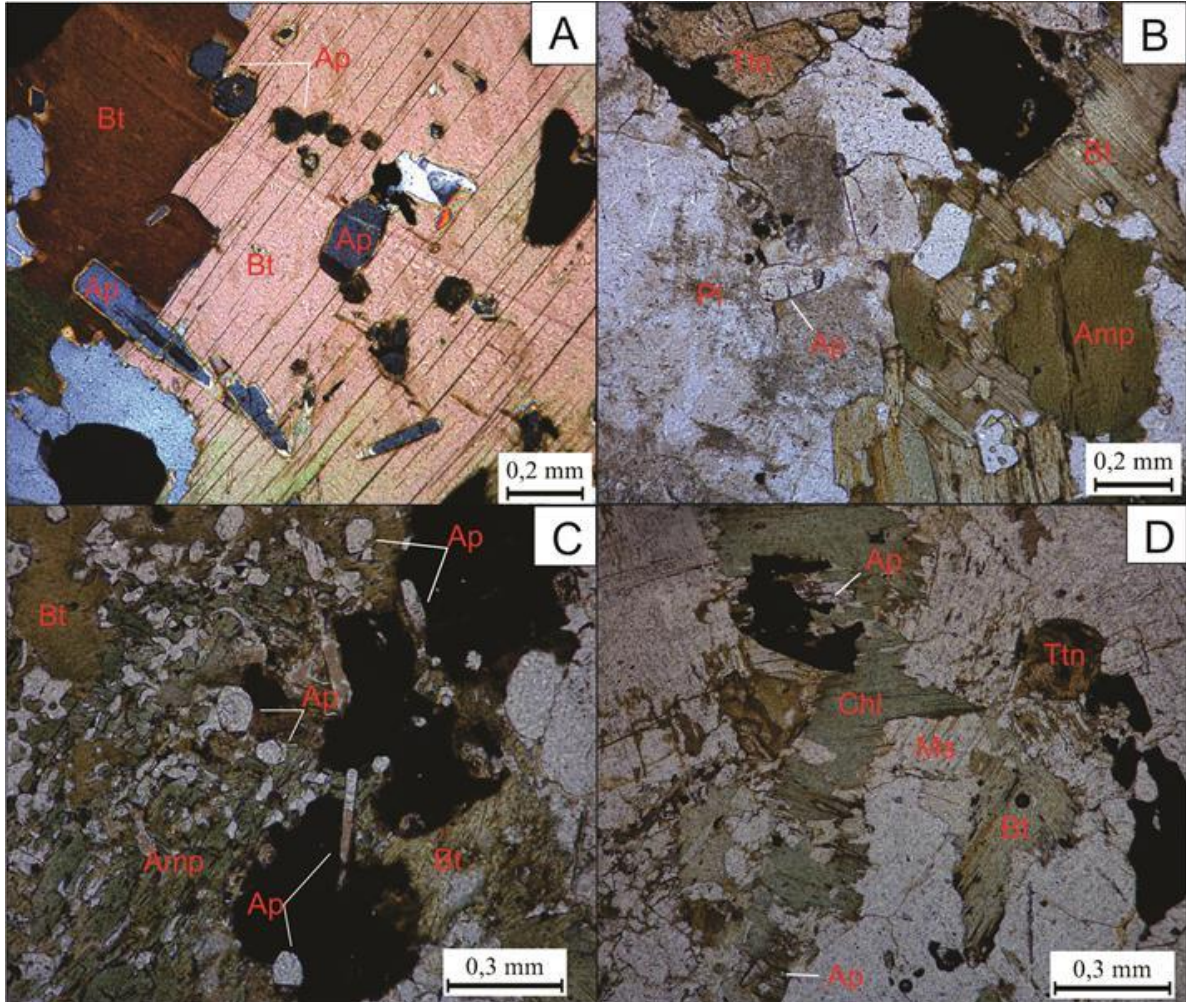
4.2.2 Suíte Jamon

No granito Jamon foram estudados vinte e seis cristais de apatita pertencentes às fácies anfibólio-biotita monzogranito (ABMG; amostra AU-391) e biotita monzogranito (BMG; amostra AU-375). No granito Redenção foram analisados vinte e um cristais pertencentes ao biotita monzogranito (BMG; amostra DCR-33B) e leucomonzogranito (LMG; amostra DC-120). Todos os cristais foram imageados por MEV-ERE, analisados e mostraram alguma similaridade quanto a sua morfologia.

No Granito Jamon, imagens em luz transmitida mostram um predomínio de apatitas euédricas ou subédricas na fácies menos evoluída (ABMG), comumente inclusas em biotita, plagioclásio e anfibólio (Figura 18 A e B). Nos BMG a apatita é comparativamente mais fina, anédrica e inclusa em biotita intensamente alterada para clorita.

Nos BMG do Granito Redenção, as apatitas são predominantemente subédricas e inclusas em cristais de anfibólio intensamente alterados, biotita e opacos (Figura 18C), enquanto nos LMG mostram formas anédricas e tem a biotita cloritizada como principal hospedeiro (Figura 18D)

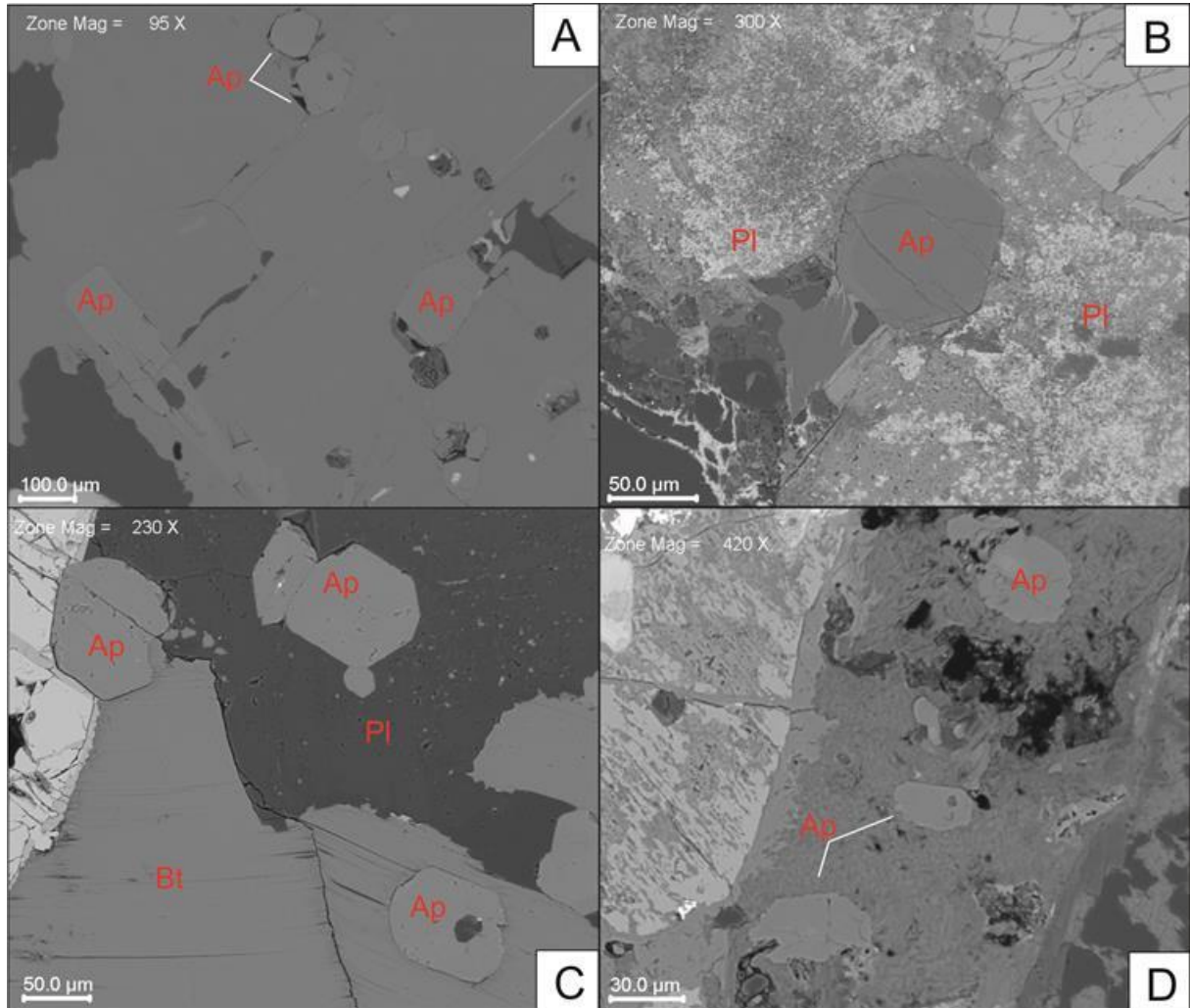
Figura 18- Imagens em luz transmitida de cristais de apatita. A) Apatita com formas subédricas inclusas em cristais grossos de biotita bem preservada (fácies ABMG, Granito Jamon). B) Cristais subédricos de apatita inclusos em plagioclásio (BMG, Gr. Jamon). C) Cristais prismáticos e aciculares de apatita inclusos em anfibólio, biotita e minerais opacos (BMG, Gr. Redenção). D) Cristais anédricos fraturados de apatita inclusos em biotita cloritizada (LMG, Granito Redenção).



Fonte: Do autor

A Figura 19 apresenta imagens de ERE de cristais de apatita dos granitos Jamon e Redenção. Os cristais são euédricos ou subédricos, pouco fraturados e bem desenvolvidos, atingindo 0,1 mm, aparecem inclusos em biotita e plagioclásio alterado (ABMG, Granito Jamon) (Figura 19A e B); localmente apresentam leve zoneamento (Figura 19B). Nos BMG do Granito Redenção, apresentam-se como cristais subédricos inclusos em biotita e plagioclásio (Figura 19C). Nos LMG (Figura 19D) os cristais de apatita são subédricos, com bordas irregulares e comparativamente menores aos cristais da fácies anterior (~0,03 mm); aparecem inclusos em biotitas cloritizadas.

Figura 19- Imagens de ERE de cristais de apatita dos granitos Jamon e Redenção. A) Cristais euédrico a subédricos de apatita inclusos em biotita (ABMG, Granito Jamon). B) Cristal subédrico de apatita zonado (ABMG, Granito Jamon). C) Cristais subédricos de apatita com inclusos em biotita e plagioclásio (BMG, Granito Redenção). D) Cristais de apatita subédricos e anédricos, inclusos em biotita cloritizada (LMG, Granito Redenção).

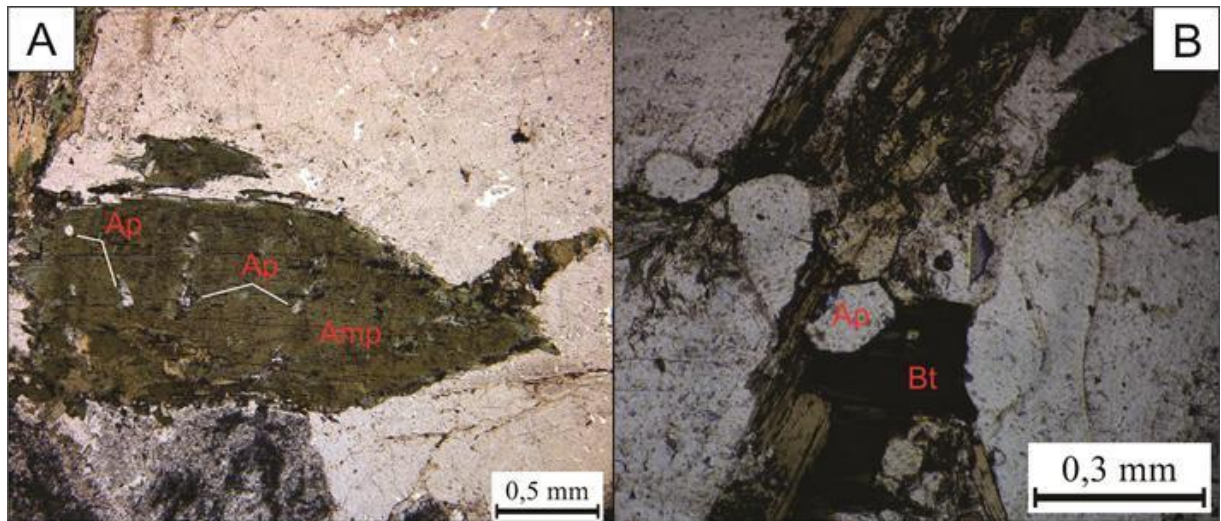


Fonte: Do autor

4.2.3 Suíte Sanukitoide Rio Maria

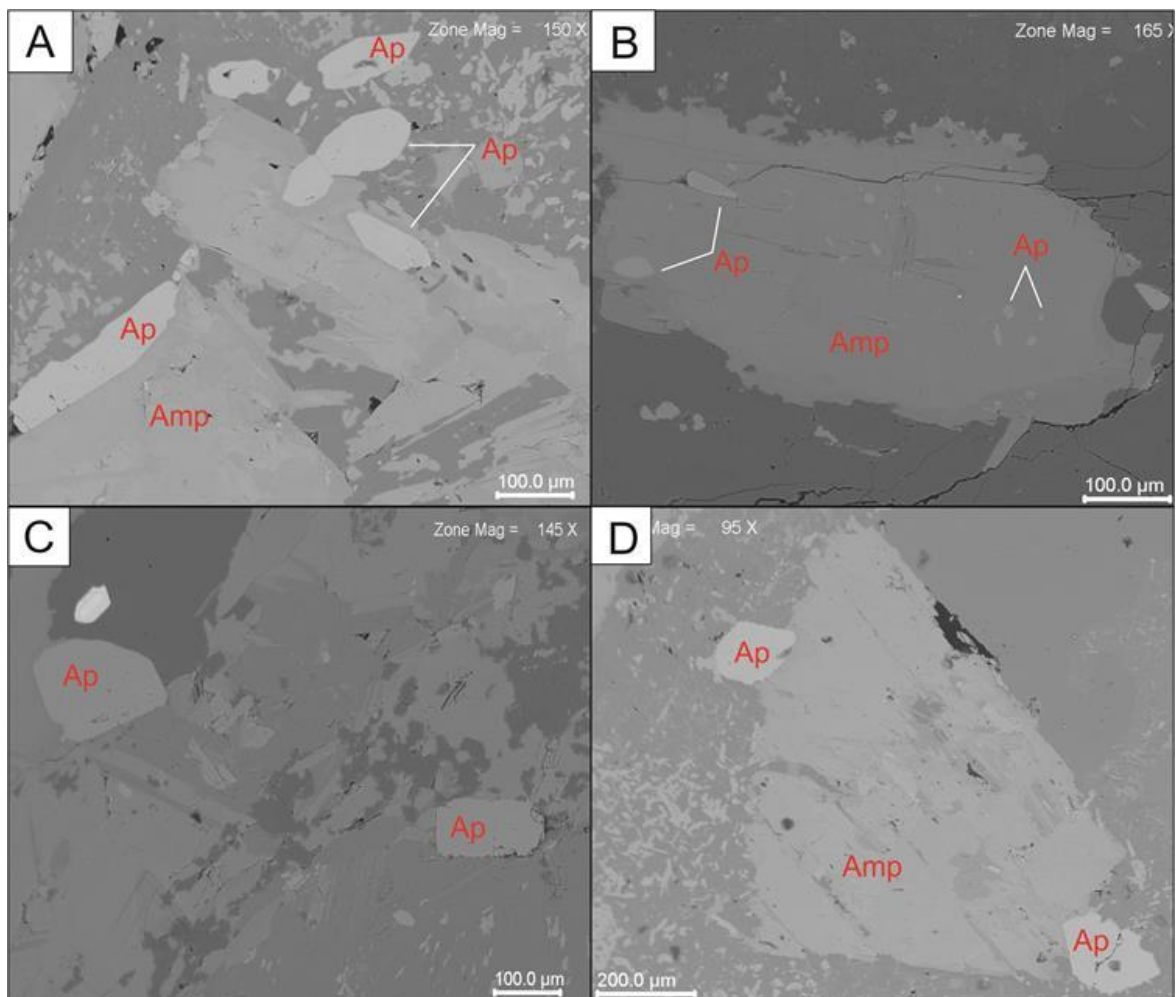
Foram analisados dezenove cristais de apatita provenientes das amostras ADR-3A e ADR-01, ocorrentes às proximidades da cidade de Rio Maria, SE do Pará. Os cristais são subédricos ou anédricos, pouco fraturados e com tamanhos de até 0,2 mm; comumente ocorrem como inclusões em anfibólio e, mais raramente, em biotita cloritizada (Figura 20A e B). Cristais prismáticos bem desenvolvidos são abundantes nessas amostras (Figura 21). Localmente alguns cristais mostram feições de dissolução com bordas irregulares (Figura 21A e C); comumente ocorrem como inclusões em anfibólio (Figura 21C e D).

Figura 20- Imagens de cristais de apatita em luz transmitida inclusos em anfibólio (A) e biotita cloritizada (B).



Fonte: Do autor.

Figura 21- Imagens de ERE de cristais de apatita do sanukitoide Rio Maria. A) Cristais subédricos bem desenvolvidos. B) Cristais anédricos de apatita inclusos em anfibólio. C) Cristais subarredondados com bordas irregulares. D) Cristais anédricos de apatita no contato entre plagioclásio saussuritizado e anfibólio alterado.

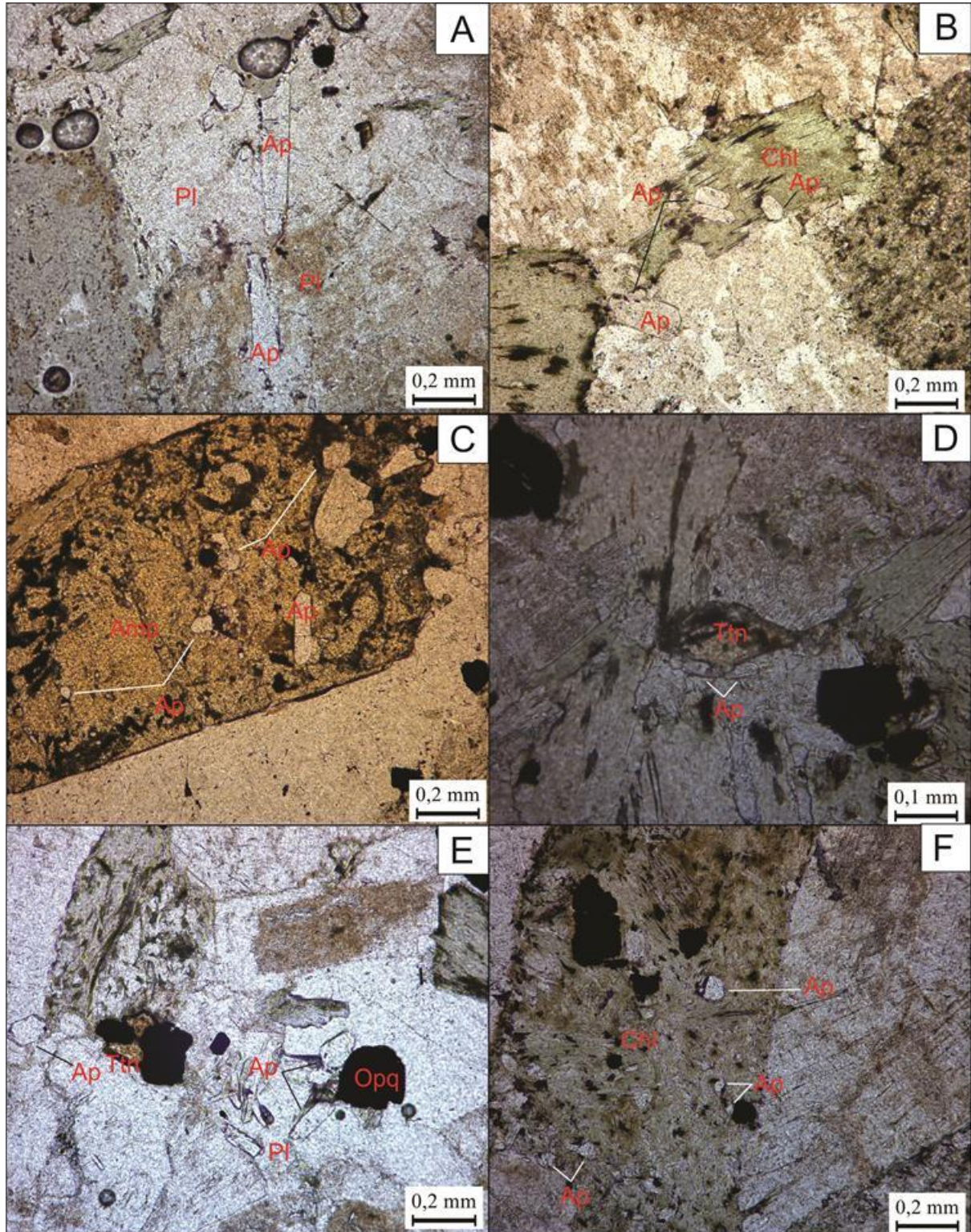


Fonte: Do autor

4.2.4 Granito São Jorge Jovem

Foram analisados cinquenta cristais de apatita provenientes de testemunhos de sondagem furo 2 (amostra SJ-2/5), 7 (amostra SJ-7/4) e 9 (amostra SJ-9/7), pertencente a fácies ABMG. Nos BMG foram analisadas apatitas do furo 4 (SJ-4/11). Os cristais são euédricos a subédricos, pouco fraturados e com tamanhos de até 0,2 mm (Figura 22A); ocorrem como inclusões em plagioclásio, anfibólio e clorita (Figura 22B), comumente associado à titanita (Figura 22D). Cristais anédricos são raros, e estão inclusos em biotita cloritizada (Figura 22E e F).

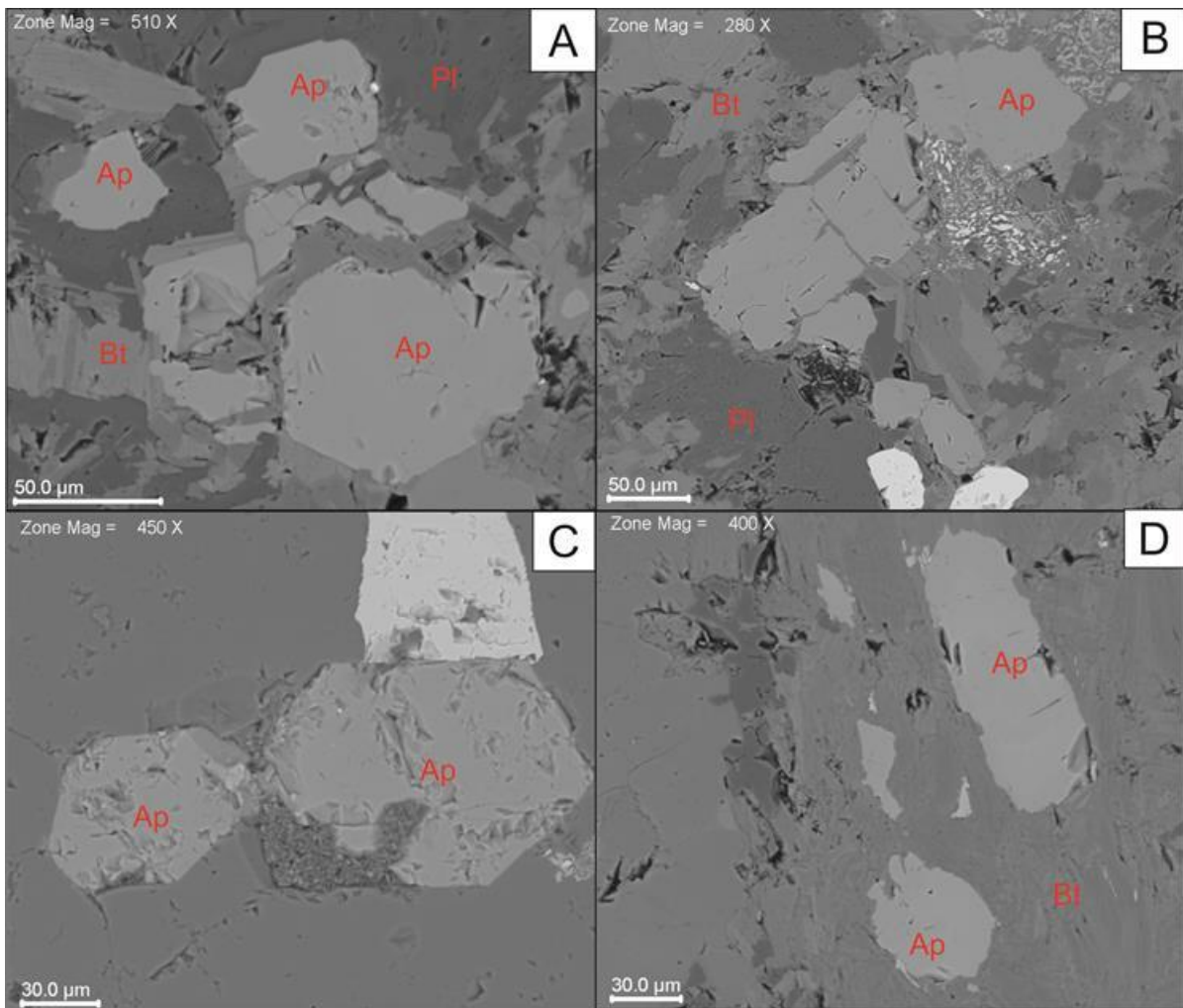
Figura 22- Cristais de apatita em petrografia pertencentes ao GSJJ. A) Cristais subédricos de apatita incluídos em plagioclásio (ABMG). B) Apatita subédrica e subarredondada incluída em cristais clorita. C) Cristais euédricos e subédricos incluídos em cristais de anfíbólio. D) Apatita subédrica localizada no contato com cristais de titanita. E) Apatita subédrica associada a minerais máficos de titanita e minerais opacos. F) Apatita anédrica incluída em biotita intensamente cloritizada (BMG).



Fonte: Do autor

A Figura 23 mostra cristais de apatita do GSJJ em imagens de ERE. Nos ABMG, os cristais são subédricos, moderadamente fraturados e atingindo tamanhos entre 0,1 e 0,2 mm aparecem inclusos em biotita e plagioclásio (Figura 23A e B). Localmente apresentam textura rugosa, bordas irregulares e espessamento das fraturas (Figura 23B). Nos BMG, os cristais são subédricos, com tamanho de ~0,1 mm e textura rugosa (Figura 23C); apresentam ainda bordas irregulares, são parcialmente fragmentados e comumente inclusos em biotita (Figura 23D).

Figura 23- Imagens de ERE de cristais de apatita do Granito São Jorge Jovem. A) Apatitas subédricas inclusas em cristais de biotita e plagioclásio (ABMG) B) Cristais de apatita apresentando espessamento das fraturas e bordas irregulares. C) Cristais subédricos de apatita com textura rugosa (BMG) D) Apatitas inclusas em biotita com porções fragmentadas (BMG).



Fonte: Do autor.

Tabela 2- Relação das amostras estudadas, com suas respectivas características morfológicas.

	Unidade Geológica	Amostras	Quant. de cristais analisados	Morfologia	Minerais Associados
Província Estanifera do Sul do Pará	Granito Antônio Vicente	GEF-01 e IE-04 GAM-54 SL-06 e NE-82	29 cristais	Na fáceis BASMG e BMG os cristais são euédricos a subédricos; Na fáceis BSG os cristais são anédricos, por vezes, zonados.	Ilmenita, anfibólio e biotita
Domínio Rio Maria	Granito Jamon	AU-391 e AU-375	26 cristais	Cristais subédricos e zonados.	Plagioclásio, anfibólio e biotita
	Granito Redenção	DCR-33B e DC-120	21 cristais	Na fáceis BMG os cristais são subédricos; na LMG os cristais são subédricos com bordas irregulares.	Plagioclásio, biotita
	Suíte Sanukitoide Rio Maria	ADR-3A e ADR-1	18 cristais	Os cristais são subédricos e anédricos, alguns com bordas irregulares.	Anfibólio
Província Aurífera do Tapajós	Granito São Jorge Jovem	SJ-9/7, SJ-4/11 e SJ-2/5	50 cristais	Cristais subédricos, com bordas irregulares e por vezes, fragmentados.	Plagioclásio, biotita, clorita e titanita

Fonte: Do autor.

4.3 ANÁLISES QUÍMICAS POR EDS

As análises químicas semiquantitativas foram realizadas em apatitas das diferentes unidades geológicas e granitóides, comparadas em diagramas geoquímicos elementares. Foi criada uma rotina de análises envolvendo vinte e sete elementos dentre os quais P, Ca, Sr, Y, Rb, ETR e somatória de (F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y) que apresentaram melhores resultados nos diagramas geoquímicos e permitiram uma boa caracterização dos granitos estaníferos, foco principal deste trabalho. A Tabela 3, apresenta os intervalos de variação desses elementos.

4.3.1 Granito Antônio Vicente

As apatitas dos BASMG são mais enriquecidas em Ca e P (37,35% a 46,05% e 20,33% a 23,91%, respectivamente) em relação às apatitas dos BMG (37,92 a 39,83% e 20,35 a 21,09%) e dos BSG (29,50 a 43,04% e 17,13 a 22,89%). Por outro lado, os conteúdos de Rb, Y e Sr mostraram comportamento inverso, ou seja, são mais empobrecidos nas apatitas dos BASMG (0,12 a 0,64%, 0,84 a 1,50%, 0,12 a 0,33%), mostram um leve enriquecimento nas apatitas dos BMG (0,36 a 0,51 %, 1,25 a 1,60%, 0,16 a 0,28%) e são bem mais elevados nas apatitas das rochas BSG (0,27 a 2,45%, 0,80 a 4,18%, 0,17 a 1,16%).

As somatórias dos ETR e (F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y) são mais elevadas nas apatitas dos BSG (3,76 a 11,30 ppm e 1,64 a 8,53 ppm) quando comparadas às somatórias das apatitas dos BMG (5,11 a 6,29 ppm e 2,68 a 3,15 ppm) e BASMG (3,49 a 5,85 ppm e 1,94 a 3,19 ppm). Os conteúdos de ETRP são mais elevados nas apatitas dos BSG (1,87 a 4,84 ppm), intermediários nos BMG (3,32 a 3,87 ppm) e inferiores nas apatitas dos BASMG (1,50 a 2,83 ppm)

4.3.2 Granito Jamon

Os teores de Ca e P encontrados nas apatitas do Granito Jamon são pouco variáveis nos ABMG, variam de 37,84 a 43,48%, com média de 39,33%, e de 19,55 a 21,22%, com média de 20,30%. Nos BMG variam, neste mesmo sentido, de 39,14 a 41,19%, com média de 39,97%, e de 19,94 a 21,33%, com média de 20,60%. Nas apatitas dos ABMG, o Rb, Y e Sr variam de 0,10 a 0,68%, 0,62 a 1,45% e 0,08 a 0,43%, respectivamente, e nos BMG apresentam variação de 0,12 a 1,01%, 1,06 a 1,99% e 0,12 a 0,60%. A somatória dos ETR é muito próxima nas apatitas dos ABMG (3,04 a 5,22%) e dos BMG (2,93-5,81%), porém as últimas mostram um maior enriquecimento na somatória (F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y), com conteúdos entre 1,83 e 3,72%, contra 1,47 a 2,57% encontrados nas apatitas dos ABMG.

4.3.3 Granito Redenção

As apatitas estudadas do Granito Redenção apresentam características composicionais semelhantes às encontradas nas apatitas do granito Jamon. O Ca e P nas apatitas dos BMG variam de 33,89 a 41,89% e de 18,97 a 21,01%; nos LMG variam de 38,17 a 42,23% e de 19,95 a 21,12%. Nos BMG, as apatitas mostram conteúdos de Rb (0,17 a 0,87%), Y (0,41 a 1,27%) e Sr (0,13 a 0,56%) baixos a coincidentes com o das apatitas dos LMG (0,11 a 0,94%, 0,98 a 1,26% e 0,16 a 0,80%, respectivamente). A somatória dos ETR mostra que as apatitas dos BMG são um pouco mais enriquecidas (3,65 a 6,26%) que as dos LMG (3,39 a 4,36%). Por outro lado, os conteúdos (F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y) são um pouco mais elevados nas apatitas das rochas leucograníticas (1,62 a 3,98%) em comparação com o das apatitas dos BMG (1,26 a 2,99%).

4.3.4 Suíte Sanukitoide Rio Maria

As apatitas das rochas sanukitoides apresentaram composições distintas das demais apatitas analisadas. O Ca varia muito pouco (44,99 a 46,33%), enquanto o P assume valores entre 20,53 e 21,51%. Os teores de Rb e Sr são extremamente baixos nas apatitas das rochas sanukitoides (0,03 a 0,31% e 0,0 a 0,12%), enquanto o Y é mais elevado, variando de 1,89 a 2,86%. Os conteúdos totais de ETR situam-se entre 1,31 e 4,77% e a somatória (F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y) entre 2,27 e 3,26%.

4.3.5 Granito São Jorge Jovem

Análises das apatitas dos ABMG mostram conteúdos de Ca e P variando de 35,42-41,14% (média de 38,18%) e de 18,40 e 20,18% (média de 19,62%). Apatitas dos BMG apresentaram conteúdos de Ca entre 37,51 e 43,47% (média de 39,72%) e de P entre 19,70 e 21,88% (média de 20,42%). O Rb, Y e Sr variam pouco nas apatitas dos ABMG (0,10-0,96%, 0,45-1,51%, 0,09-0,59%, respectivamente) e BMG (0,08-0,56%, 0,60-1,09%, 0,13-0,57%).

Os ETR totais são muito próximos nas apatitas dos ABMG (2,63 e 4,73%) e dos BMG (2,85-4,34%); o mesmo comportamento é observado na somatória envolvendo F+Na+Mg+Cl+Mn+Rb+Sr+Y (1,06-3,09% nas apatitas dos ABMG e 1,25-2,53% nas apatitas dos BMG).

Tabela 3- Intervalos de variação obtidos por MEV-EDS dos principais elementos presentes nas apatitas dos corpos estudados (% em peso).

Unidade	Amostra	Rb	Sr	Y	Ca	P	Σ	ETR total	ETRL	ETRP
Gr. Antônio Vicente										
BASMG	GFE-01; IE-04	0,12-0,64	0,12-0,33	0,84-1,50	37,35-46,05	20,33-23,91	1,94-3,19	3,49-5,85	1,30-3,08	1,50-2,83
BMG	GAM-CS-54	0,36-0,51	0,16-0,28	1,25-1,60	37,92-39,83	20,35-21,09	2,68-3,15	5,11-6,29	1,60-3,07	3,32-3,87
BSG e BSGA	NE-82	0,27-2,45	0,17-1,16	0,80-4,18	29,50-43,04	17,13-22,89	1,64-8,53	3,76-11,30	1,20-3,85	1,87-4,84
Granito Redenção										
BMG	DCR-33B	0,17-0,87	0,13-0,56	0,41-1,27	33,89-41,89	18,97-21,01	1,26-2,99	3,65-6,26	0,97-2,86	2,0-3,50
LMG	DC-120	0,11-0,94	0,16-0,80	0,98-1,26	38,17-42,23	19,95-21,12	1,62-3,98	3,39-4,36	0,92-1,49	1,84-2,71
Granito Jamon										
ABMG	AU-391	0,10-0,68	0,08-0,43	0,62-1,45	37,84-43,48	19,55-21,22	1,47-2,57	3,04-5,22	1,03-2,66	1,84-3,21
BMG	AU-375	0,12-1,01	0,12-0,60	1,06-1,99	39,14-41,19	19,94-21,33	1,83-3,72	2,93-5,81	1,12-3,04	1,32-2,63
Suíte Sanukitoide Rio Maria	ADR-3A; ADR-1	0,03-0,31	0,0-0,12	1,89-2,86	44,99-46,33	20,53-21,51	2,27-3,26	1,31-4,77	0,83-1,72	0,15-3,21
Gr. São Jorge Jovem										
ABMG	SJ-9/7, 7/4 e 2/5	0,10-0,96	0,09-0,59	0,45-1,51	35,42-41,14	18,40-20,18	1,06-3,09	2,63-4,73	0,69-2,20	1,47-2,95
BMG	SJ-4/11	0,08-0,56	0,13-0,57	0,60-1,09	37,51-43,47	19,70-21,88	1,25-2,53	2,85-4,34	0,65-2,07	1,70-2,48

$$\Sigma = F + Na + Mg + Cl + Mn + Rb + Sr + Y$$

Fonte: Do Autor.

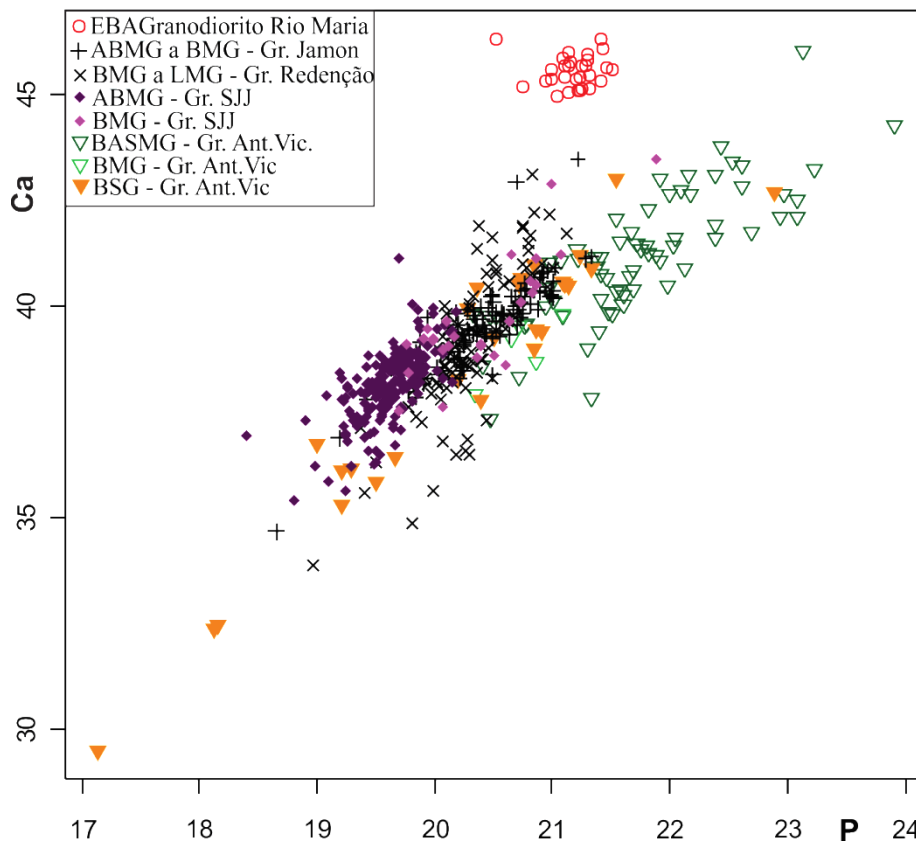
5 DISCUSSÕES

5.1 DIAGRAMAS DISCRIMINANTES

Para melhor visualizar as variações encontradas nas apatitas estudadas, apresentam-se, a seguir, alguns diagramas geoquímicos. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação), da Província Estanífera do Xingu, são colocados para comparação.

No diagrama Ca x P (Figura 24) os cristais de apatita das rochas sanukitoides (fácies EBAGRD) mostram conteúdos de Ca (45 a 46%) e P (21 a 22%) elevados e pouco variáveis, se isolam das demais apatitas. As apatitas dos granitos Jamon, Redenção, São Jorge Jovem tendem a se concentrar no centro do diagrama, com teores de Ca entre 42 e 35% e de P entre 19 e 21%. Observa-se, entretanto, um decaimento maior das apatitas do granito Redenção, com apatitas dos LMG apresentando valores mais baixos para ambos elementos. As apatitas das rochas do Granito Antônio Vicente mostram um *trend* negativo, com as rochas menos evoluídas (BASMG e BMG) apresentando apatitas enriquecidas em Ca e P e as rochas mais evoluídas (BSG) com os menores conteúdos deles.

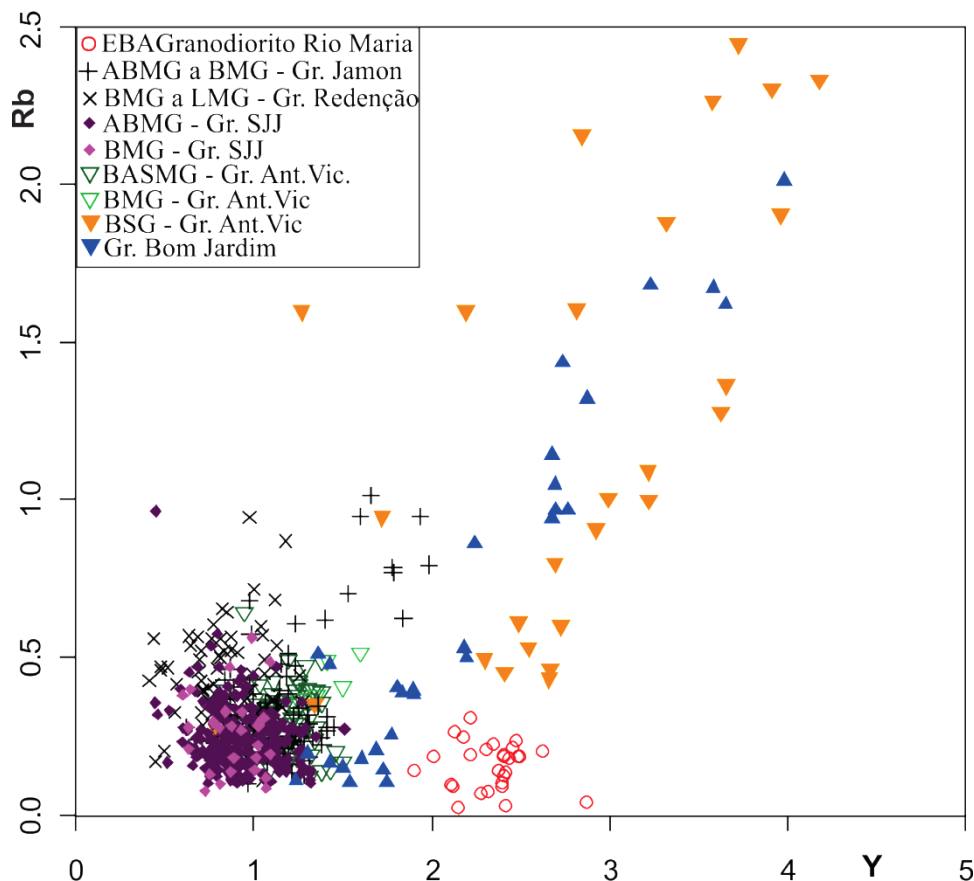
Figura 24- Diagrama Ca x P (% peso) das apatitas estudadas.



Fonte: Do autor.

No diagrama Rb x Y (Figura 25) as apatitas dos granitos Jamon, Redenção e São Jorge Jovem são empobrecidas nesses elementos e tendem a se concentrar predominantemente na porção inferior esquerda do diagrama, com intervalos de Y entre 0,5 e 1,5% e de Rb entre 0,1 a 0,7%; algumas apatitas das rochas mais evoluídas dos granitos Jamon e Redenção apresentam conteúdos de Rb e Y de 1,0 e 2,0, respectivamente. As apatitas das rochas sanukitoides são muito pobres em Rb (<0,5%), porém são mais enriquecidas em Y (entre 2 e 3%) e se separam das apatitas dos granitos anteriores. As apatitas das rochas menos evoluídas do Granito Antônio Vicente (BASMG e BMG) são empobrecidas nesses dois elementos e se juntam às apatitas dos granitos Jamon, Redenção e São Jorge Jovem. Por outro lado, as apatitas encontradas nas rochas mais evoluídas e associadas com a mineralização deste corpo, formam um *trend* de enriquecimento em Rb e Y e se separam das demais apatitas. Comportamento semelhante é observado nas apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim.

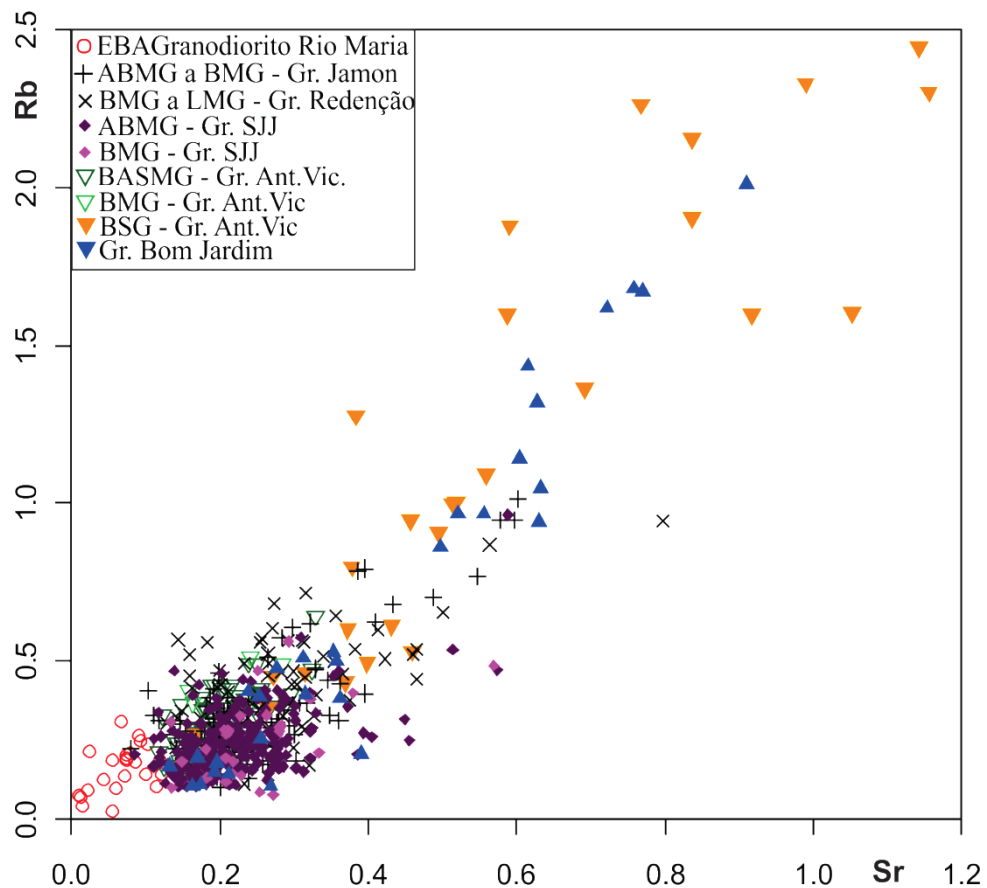
Figura 25- Diagrama Rb x Y (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) são colocadas para comparação.



Fonte: Do autor.

No diagrama Rb x Sr (Figura 26) o mesmo *trend* de enriquecimento é observado para as apatitas das rochas evoluídas do Granito Antônio Vicente (BSG). As apatitas das rochas menos evoluídas do Granito Antônio Vicente (ABMG e BMG) e das outras rochas granitoides estudadas apresentam conteúdos predominantemente inferiores a 0,5% para o Rb e 0,4% para o Sr e se concentram na porção inferior esquerda do diagrama. As apatitas dos sanukitoides são ainda mais empobrecidas e se separam das demais.

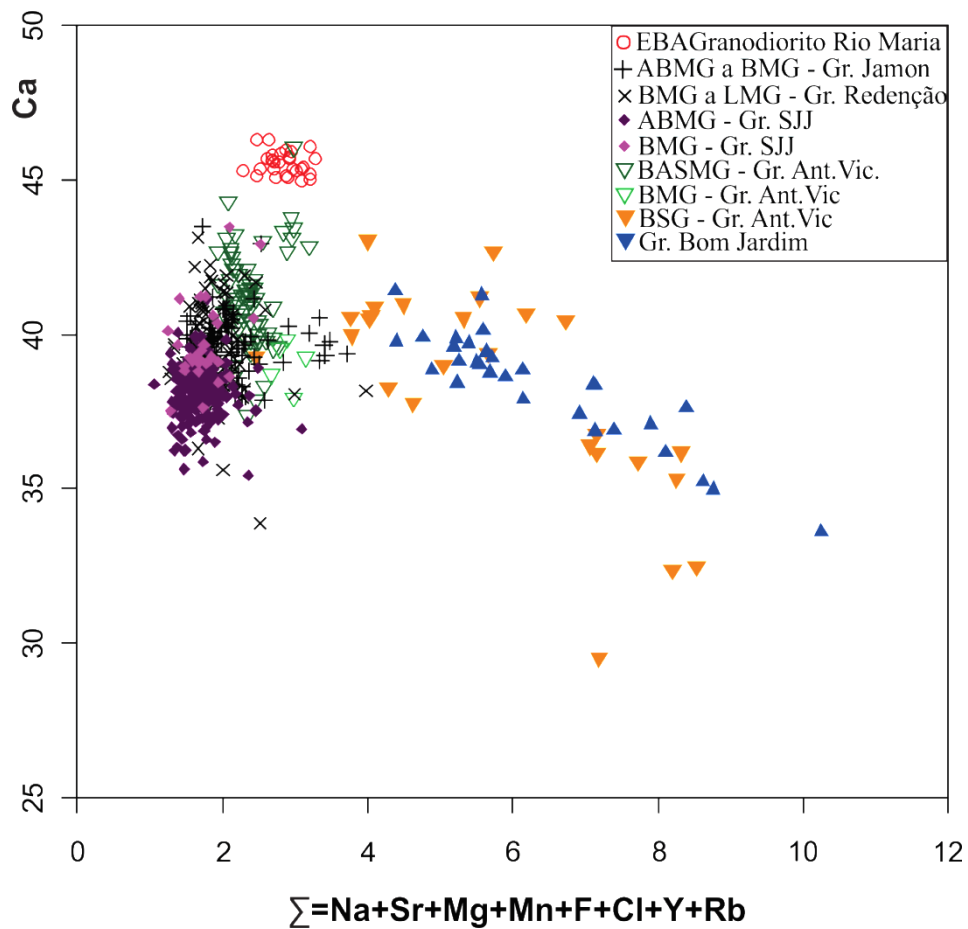
Figura 26- Diagrama Rb x Sr (%peso) das apatitas das rochas estudadas. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) são colocadas para comparação.



Fonte: Do autor.

No diagrama Ca x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (Figura 27) é nítido o enriquecimento em Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb nas apatitas que ocorrem nas rochas evoluídas e mineralizadas do Granito Antônio Vicente, deixando claro a existência de substituição pelo Ca. Nas rochas menos evoluídas do corpo Antônio Vicente, a troca desses elementos pelo Ca não é tão efetiva. O mesmo comportamento é observado nas apatitas das outras rochas estudadas. Chama atenção, as apatitas dos sanukitoides que se agrupam na parte superior do diagrama sem demonstrar possíveis substituições do Ca pelos elementos da somatória.

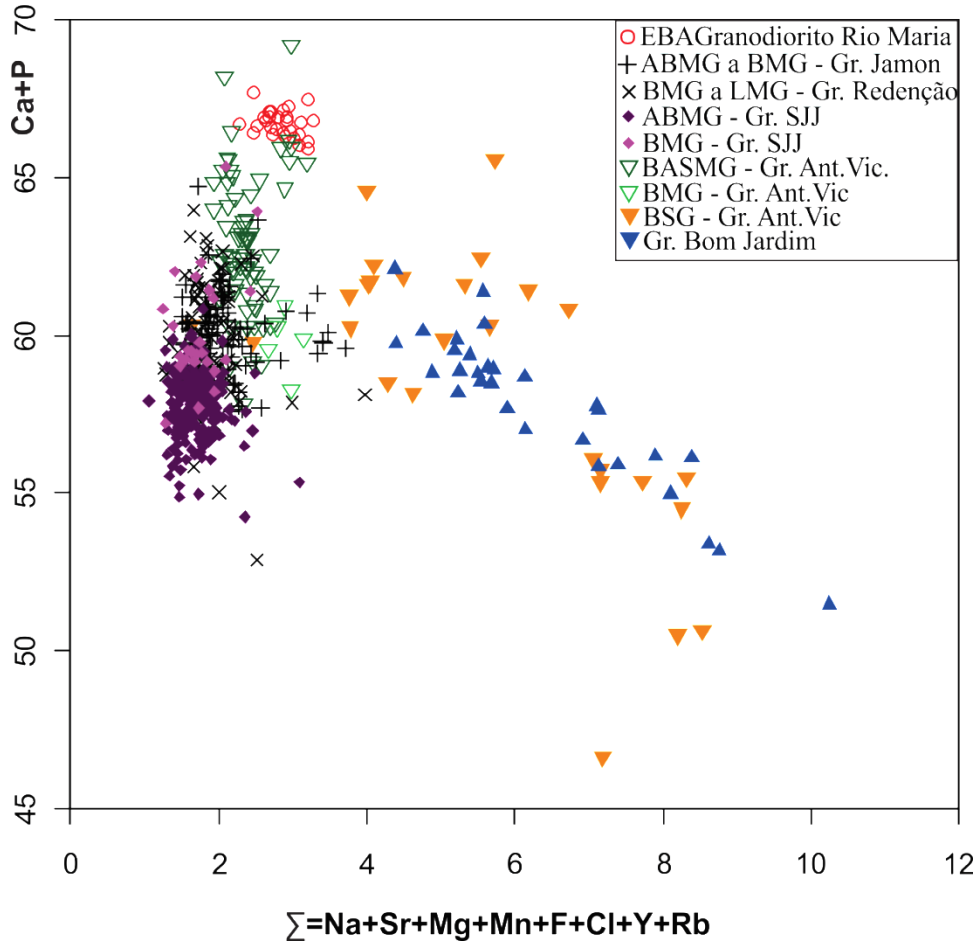
Figura 27- Diagrama Ca x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação



Fonte: Do autor.

No diagrama Ca+P x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (Figura 28) as apatitas estudadas mostram comportamento geoquímico similar aquele observado na Figura 27, sugerindo a existência de substituições de Ca e P pelos elementos da somatória, principalmente nas apatitas das rochas evoluídas do Granito Antônio Vicente.

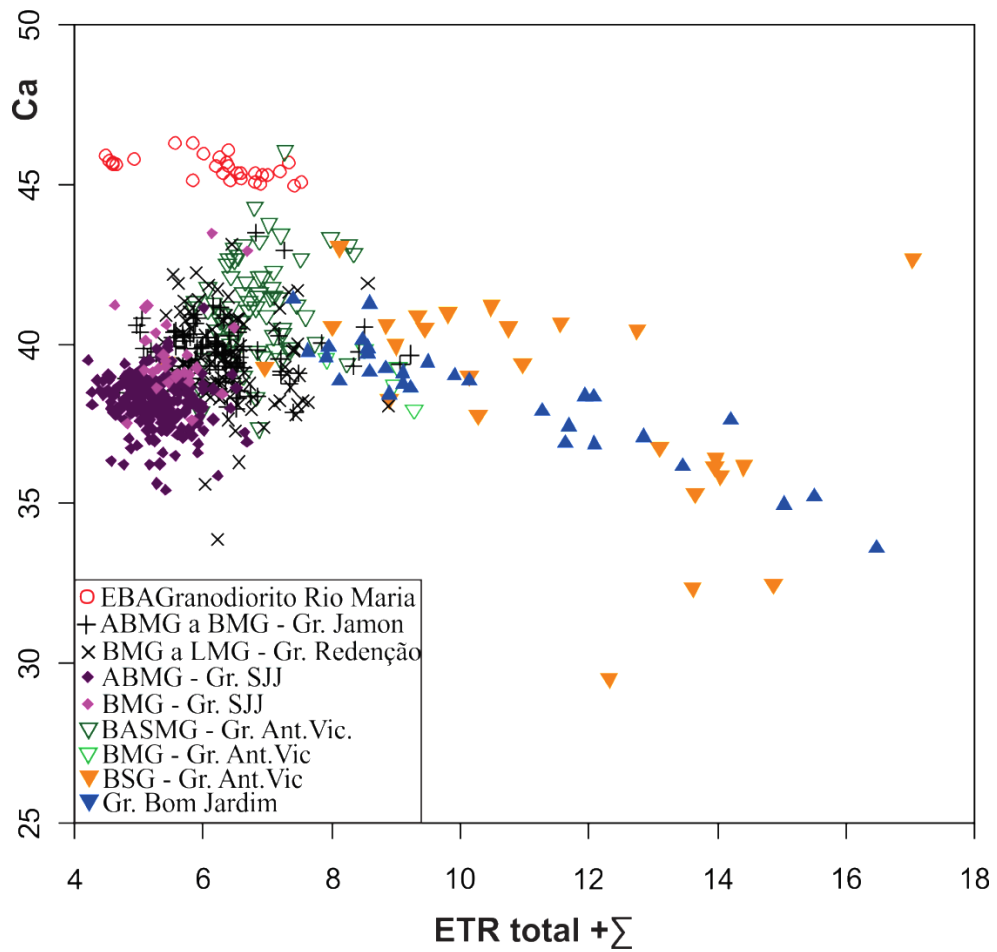
Figura 28- Diagrama Ca+P x somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação.



Fonte: Do autor.

No diagrama Ca x ETR total + somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (Figura 29) as apatitas das rochas evoluídas do Granito Antônio Vicente (BSG) mostram conteúdos de ETR e da somatória de (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) variando de 7,0 a 17,0%, bem superior ao encontrado nas apatitas das outras rochas graníticas (dominantemente <8,0%), incluindo as fácies menos evoluídas do Granito Antônio Vicente (ABMG e BMG).

Figura 29- Diagrama Ca x ETR total+somatória (Na+Sr+Mg+Mn+F+Cl+Y+Rb) (%peso) das apatitas dos granitos estudados. Apatitas do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) colocadas para comparação.



Fonte: Do autor.

5.2 APATITAS DO GRANITO ESTANÍFERO ANTÔNIO VICENTE.

Em termos morfológicos, o Granito Antônio Vicente possui apatitas euédricas ou subédricas em suas rochas menos evoluídas e preservadas de alterações mais intensas (BASMG e BMG). Em suas rochas mais evoluídas e alteradas hidrotermalmente (BSG a BSGA), portadoras de mineralizações de Sn, ocorrem apatitas predominantemente anédricas de granulação fina, por vezes subarredondadas, e em quantidade comparativamente menor.

As análises químicas semiquantitativas obtidas por MEV-EDS mostram que as apatitas das fácies BSG e BSGA do Granito Antônio Vicente apresentam conteúdos mais elevados de Rb (0,27-2,45%), Sr (0,17-1,16%) e Y (0,80-4,18%) quando comparados às apatitas de suas fácies menos evoluídas, dos granitos Jamon, Redenção, São Jorge Jovem, e das rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria. Paralelamente ao enriquecimento em Rb, Sr e Y, as apatitas dos BSG do Granito Antônio Vicente mostram empobrecimento em Ca e P, indicando a ocorrência de substituições diretas entre esses elementos.

Conteúdos significativos de ETR também são incorporados na estrutura da apatita em substituição ao Ca^{+2} (NASH, 1984; ROEDER *et al.*, 1987 *apud* BELOUSOVA *et al.*, 2001; TOLEDO; PEREIRA, 2001). Nas apatitas do corpo Antônio Vicente, o conteúdo total de ETR aumenta no sentido das rochas menos evoluídas para as mais evoluídas; nos ABMG varia de 3,49 a 5,85%, nos BMG de 5,11 a 6,29% e nos BSG a BSGA de 3,76 a 11,30%.

O comportamento morfológico e geoquímico apresentado pelas apatitas do Granito Antônio Vicente é observado também nas apatitas do Granito paleoproterozoico Bom Jardim (Faro, em preparação), composto por diferentes fácies petrográficas e igualmente mineralizado em Sn (\pm W) em suas rochas mais evoluídas.

Tal fato demonstra que as apatitas das rochas mais evoluídas e alteradas do granito especializado Antônio Vicente possuem uma assinatura geoquímica característica que pode ser utilizada preliminarmente como guia prospectivo de corpos mineralizados, ou, em outras palavras, como um mineral resistato indicador (*RIM-resistate indicator mineral*) para este tipo de mineralização. Outros minerais como o zircão (LAMARÃO *et al.*, 2007, 2012, 2014) e micas (ABRANTES JÚNIOR, 2009) também foram utilizados com esta mesma finalidade.

5.3 APATITAS DE OUTROS GRANITOS

As apatitas dos granitos Jamon e Redenção não apresentaram variações elementares significativas, com exceção de alguns cristais pertencentes às rochas monzograníticas do Granito Jamon e leucomonzograníticas do Granito Redenção que mostraram leve enriquecimento em Rb e Y (Figura 25) e em Sr (Figura 26).

As apatitas dos sanukitoides Rio Maria apresentaram os maiores conteúdos de Ca e P e as mais baixas concentrações de Rb, Sr e ETR total, indicando substituições mínimas a inexistentes entre esses elementos e permitindo sua individualização nos diferentes diagramas geoquímicos. Entretanto, seus teores de Y se mostraram mais elevados (entre 2 e 3%) que os das outras apatitas estudadas, com exceção das apatitas das rochas mineralizadas do Granito Antônio Vicente (Figura 25). Esta assinatura característica de suas apatitas parece estar ligada à origem mantélica, com certa contribuição crustal, de seu magma original (OLIVEIRA *et al.*, 2009b).

As apatitas do Granito São Jorge Jovem, provenientes de rochas preservadas e alteradas hidrotermalmente da área do depósito de ouro São Jorge, apresentaram forte homogeneidade composicional, contrariamente ao esperado por se tratar de rochas alteradas e mineralizadas. Novas análises envolvendo outros elementos associados ou afins com o Au são sugeridas para avaliar melhor o comportamento dessas apatitas.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho envolveu o estudo morfológico e geoquímico de cristais de apatita de diferentes rochas granitoides. O estudo morfológico das apatitas utilizou imagens de luz transmitida obtidas em um microscópio petrográfico convencional e imagens de ERE obtidas com o auxílio de um MEV. O estudo composicional envolveu análises químicas semiquantitativas por MEV-EDS

Os resultados deste trabalho mostraram que as apatitas das rochas mais evoluídas e mineralizadas em Sn do Granito Antônio Vicente (BSG e BSGA) apresentam enriquecimento em Rb, Y, Sr e ETR, principalmente os ETRP, quando comparadas com apatitas de suas rochas menos evoluídas (BASMG e BMG) e com a dos outros corpos granitoides estudados. Tais enriquecimentos são acompanhados pela diminuição sistemática nos conteúdos de Ca e P dessas apatitas, indicando a existência de substituições intensas entre esses elementos.

Apatitas de diferentes depósitos de Fe mostram características geoquímicas que confirmam o potencial deste mineral no estudo de mineralizações específicas. Apatitas de depósitos de Fe e óxidos de Fe-Ti mostram altos conteúdos de Mg e baixo de Fe, além de elevadas concentrações de Ni, Zn, V, Cu e As, uma assinatura geoquímica distinta de apatitas de outros tipos de rochas. Além disso, apatitas de depósitos hidrotermais de Cu-Zn mostram concentrações significantes de As, V, Ni, Cu e Fe (BELOUSOVA *et al.*, 2002).

A variação nos elementos traços em apatitas pode indicar também mudanças na composição da rocha total com o fracionamento (BELOUSOVA *et al.*, 2001). Neste aspecto, o enriquecimento relativo em Rb, Y e ETRP nas apatitas das rochas mais evoluídas do Granito Antônio Vicente estaria relacionado à cristalização fracionada, principal processo que comandou a evolução do Granito Antônio Vicente (TEIXEIRA *et al.*, 2002, 2005). Outra possibilidade seria atribuir este enriquecimento, ou parte dele, aos processos hidrotermais intensos que atuaram principalmente em suas rochas mais evoluídas e mineralizadas (BSG e BSGA).

Neste estudo, cristais de apatita do Granito Estanífero Bom Jardim (Faro, em preparação) apresentaram comportamento geoquímico semelhante ao das apatitas das rochas mineralizadas do corpo Antônio Vicente, reforçando a hipótese de que apatitas de granitos estaníferos podem funcionar preliminarmente como bons indicadores deste tipo de mineralização, ou seja, possuem características que podem classificá-las como um mineral resistato indicador, conforme Belousova *et al.*, (2009).

REFERÊNCIAS

- ABRANTES JÚNIOR, F. Caracterização de minerais micáceos dos Granitos Estaníferos Antônio Vicente, Mocambo e Serra da Queimada, Região de São Félix do Xingu, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). *Programa de Iniciação científica*, 2009.
- ABREU, F.A.M.; RAMOS, C.R. Estanho do Sul do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG, 1974. p. 11.
- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D. C. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 2, p. 282-295, 2006.
- ALMEIDA, J.A. C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; MACAMBIRA, M. J. B.; PIMENTEL, M. M.; RÄMÖ, O. T.; GUIMARÃES, F. V.; LEITE, A.A. S. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria Granite-Greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, v. 187, p. 201-221, 2011.
- ALMEIDA, J.A. C.; DALL'AGNOL R.; LEITE A.A. S. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 42, p. 103-126, 2013.
- ALTHOFF, F. J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A. M. 2.8 –3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, v. 104, p. 187-206, 2000.
- ARAÚJO, O.J. B.; MAIA, R.G. N.; JORGE JOÃO, X. S.; COSTA, J.B. S. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GEOLOGIA, 7., 1988. Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1988. p. 324-333.
- BARBOSA, A. A.; LAFON, J. M.; NEVES, A. P.; VALE, A. G. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: implicações para o magmatismo proterozoico da região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 7, p. 147-164, 1995.
- BARBOSA, A. A.; LAFON, J. M. Geocronologia Pb-Pb e Rb-Sr de Granitóides Arqueanos da Região de Redenção – Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 4, p. 255-264. 1996.
- BELOUSOVA, E. A.; WALTERS, S.; GRIFFIN, W. L.; O'REILLY, S. Y. Trace element signatures of apatites from granitoids of Mount Isa Inlier, north-west Queensland, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 48, p. 603- 619. 2001.
- BELOUSOVA, E. A.; GRIFFIN, W. L.; O' REALLY, S. Y.; FISHER, N. Y. Trace elements in apatite: relationship to source rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 76, p. 45-69. 2002.
- BORGES, R.M. K.; DALL'AGNOL, R.; LAMARÃO, C. N.; FIGUEIREDO, M.A. B.; LEITE, A.A. S.; BARROS, C.E. M.; COSTI, H. T. Petrografia, química mineral e processos hidrotermais associados ao depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Ver. Bras.Geoc.*, v.39, n. 2, p.375-393. 2009.

CHAPPELL, B. W.; WHITE, A. J. R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*. v. 83, p.1-26, 1992.

CHU, M. F.; WANG, K. L.; GRIFFIN, W. L.; CHUNG, S. L.; O'REILLY, S. Y.; PEARSON, N. J.; IIZUKA, Y. Apatite composition: tracing petrogenetic processes in Transhimalayan granitoids. *Journal of Petrology*, v. 50, p. 1829–1855, 2009.

CORDANI, U. G.; SATO, K. Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd isotopic systematic on granitoid rocks. *Episodes*, v. 22, n. 3, p.167-173, 1999.

COSTA, J.B. S.; ARAÚJO, J.B. A.; SANTOS, X. S.; JORGE JOÃO, M.J. B.; MACAMBIRA; LAFON, J. M. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, v. 7, p. 199-235, 1995.

CPRM/DNPM. *Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solo e de Vegetação para a Área do Projeto Grande Carajás – Sub Programa Mapas metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais. Folha São Felix do Xingu-SB-22-Y-B*. CPRM, Superintendência Regional de Belém (Relatório Final), 1997.

DALL'AGNOL, R., TEIXEIRA N.P., MAGALHÃES M.S. Diagnostic features of the Tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 65, n. supl. 1, p. 33-50, 1993

DALL'AGNOL, R.; SOUZA, Z. S.; ALTHOFF, F. J.; BARROS, C.E. M.; LEITE, A.A. S.; JORGE JOÃO, X. S. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 1997, Salvador. *Excursion Guide...* Salvador: ISGAM, 1997. p.135-161.

DALL'AGNOL, R.; RÄMÖ, O. T.; MAGALHÃES, M. S.; MACAMBIRA, M.J. B. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, v. 46, n. 3, p. 431–462, 1999.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D. C. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, v. 93, n. 3-4, p. 215-233, 2007

DALL'AGNOL, R.; TEIXEIRA, N. P.; RÄMÖ, O. T.; MOURA, C.A.V.; MACAMBIRA, M.J. B.; OLIVEIRA, D. C. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, v. 80, n. 1, p. 101-129, 2005.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M. A.; ALMEIDA, J.A. C.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A.A. S.; OLIVEIRA, D. C.; BARROS, C.E. M. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. In: SIMPOSIUM ON MAGMATISM, CRUSTAL EVOLUTION AND METALLOGENESIS OF THE AMAZONIAN CRATON. 2006. Belém. *Abstract Volume and Field Trips Guide...* Belém: PRONEX-UFPB/ SBG-NO, 2006. p.99-150, 2006.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D. C.; LAMARÃO, C. N. Magematismo granitoide arqueano e evolução geológica do Subdomínio de Transição da Província Carajás, sudeste do Cratón Amazônico. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi série Ciências Naturais*, v. 8, n. 3, p. 251-256, 2013.

DUTRA, C. V.; FORMOSO, M. L. L. Considerações sobre os elementos terras raras em apatitas. In: GEOCHIMICA BRASILIENSIS., 1995, Rio de Janeiro. *Anais...Rio de Janeiro: GB*, 1995. p. 185-199.

EBY, G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogeneses and tectonic implications. *Geology*, v.20 , p. 641-644, 1992.

FARACO, M.T. L.; CARVALHO, J.M. A.; KLEIN, E. L. Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós. In: COSTA, M.L.; ANGELICA, R.S. (Orgs.) *CONTRIBUIÇÕES A GEOLOGIA DA AMAZONIA*. 1997. Belém. *Contribuições à geologia da Amazônia....* Belém: SBG-Núcleo Norte, 1997, p. 423-437.

FEIO, G.R. L.; DALL'AGNOL, R. Geochemistry and petrogenesis of the granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás province, Brazil: implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, v. 154, p. 33-52, 2012

FERNANDES, C.M. D. *Estratigrafia e Petrogênese das Sequências Vulcânicas Paleoproterozoicas na região de São Félix do Xingu (Pa), Província Mineral de Carajás*. 2009. 190f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERNANDES, C.M. D. *Química Mineral da Mica Branca de Rochas Graníticas e Greisens da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. 2003. 33f. Trabalho (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

FERNANDES, C.M. D.; TEIXEIRA, N. P.; BORGES, R.M. K.; BETTENCOURT, J. S. Química mineral da muscovita de rochas graníticas e greisens da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 1, p. 26-33, 2006.

FIGUEIREDO, M.A. B.; DALL'AGNOL, R.; LAMARÃO, C. N.; OLIVEIRA, D. C. Petrologia Magnética do Granito São Jorge Antigo, Província Aurífera do Tapajós. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 33, n. 2, p.149-158, 2003.

JULIANI, C.; FERNANDES, C.M. D. Well-preserved late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Felix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 191, n. 3-4, p. 167-79, 2010.

KEMPE, U.; GÖTZE, J. Cathodoluminescence (CL) behaviour and crystal chemistry of apatite from rare-metal deposits. *Mineralogical Magazine*, v. 66, n. 1, p. 151-172, 2002.

KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L. *Projeto especial Província Mineral do Tapajós. Geologia e recursos minerais da folha Vila Riozinho (SB.21- Z-A), estado do Pará, escala 1:250.000: nota explicativa*. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2000. CD-ROM.

LAMARÃO, C. N.; DALL'AGNOL, R. Granitóides São Jorge Antigo e São Jorge Jovem: petrografia e geoquímica de magmatismo cálcio-alcálico alto-K Paleoproterozoico na Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, v. 3, p. 53-65, 2002

LAMARÃO, C. N.; DALL'AGNOL, R.; LAFON, J. M.; LIMA, E. F. Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, v. 119, p. 189-223, 2002.

LAMARÃO, C. N.; DALL'AGNOL, R.; SOLEDADE, G. L.; SILVA, J. S. Variações composicionais de zircão em granitos anarogênicos proterozóicos do Cráton Amazônico: implicações metalogenéticas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 4, p. 693-704, 2007.

LAMARÃO, C. N.; SOUZA, K. S.; DALL'AGNOL, R.; GALARZA, M. A. Granitos pórfiros da região de vila Riozinho, província aurífera do Tapajós: petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 3, p. 533-543, 2008

LAMARÃO, C. N.; PINHO, S. C. C.; JUNIOR, A. L. P.; TORO, M. A. G. Mineralogy and geochemistry of the Paleoproterozoic, tin-mineralized Bom Jardim Granite of the Velho Guilherme Suite, eastern Amazonian Craton. *Journal of South American Earth Science*, v. 38, p. 159-173, 2012.

LAMARÃO, C. N.; ROCHA, K. K. N.; MARQUES, G. T.; BORGES, R. M. K. Quartzo e zircão como marcadores da evolução magmático hidrotermal do Granito Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás. *Revista do Instituto de Geociências USP*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 4-68, 2013.

LAMARÃO, C. N.; SILVA, J. S.; BORGES, R. M. K.; DALL'AGNOL, R. Morphological and compositional variations of zircon and their metallogenetic implications: the example of the Jamon, Serra dos Carajás and Velho Guilherme suites, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 1, p. 105-120, 2014

LEITE, A. A. S.; DALL'AGNOL, R. Estratigrafia e aspectos geológicos da região de ocorrência do Granito Xinguara (Se do Pará). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. *Boletim de Resumos Expandidos...* Belém: SBG, 1994. p. 325-327.

LIU, Y.; COMODI, P. Some aspects of the crystal-chemistry of apatites. *Mineralogical Magazine*, v. 57, p. 709-719, 1993.

LUO, Y.; HUGHES, J. M.; RAKOVAN, J.; PAN, Y. M. Site preference of U and Th in Cl, F and Sr apatites. *American Mineralogist*, v. 94, p. 345-351, 2009.

MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; Síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, v. 7, p. 263-287, 1995.

MACAMBIRA, M. J. B.; RAMOS, J. F. F.; ASSIS, J. F. P.; FIGUEIRAS, A. J. M. *Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca. SEPLAN/DOCEGEO/UFPA, DNPM/DOCEGEO/UFPA. Superintendência Regional de Belém (Relatório Final)*, Belém, 1990. 150 p.

MACAMBIRA, M.J. B.; LANCELOT, J. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review*, v. 38, p. 1134-1142, 1996.

MACAMBIRA, E.M. B.; VALE, A. G. (Ed.) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Programa Grande Carajás, Folha SB-22-Y-B, São Félix do Xingú, Estado do Pará-Belém*, convênio DNPM/CPRM, 1997, 344 p.

MACAMBIRA, M.J. B.; DALL'AGNOL, R. Zircon age for the Paleoproterozoic Jamon granite, SE Carajás province, Brazil, new evidence of rocks older than 3,1 Ga in the Amazonian Craton. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 1., 1997, Campos do Jordão. *Extended Abstract...* Campos do Jordão: SIG, 1997. p 186-187.

MACAMBIRA, E.M. B.; FERREIRA-FILHO, C. F. (Ed.) *Fracionamento magmático dos corpos máficosultramáficos da Suíte Intrusiva Cateté – Sul do Pará*. In: CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA (E.L.KLEIN, M.L. VASQUEZ, M.L. e L.T. ROSA-COSTA). Belém: SBG, Núcleo Norte, 2002, v. 3, p. 105-114.

MEDEIROS, H. *Petrologia da porção leste do batólito granodiorfírico Rio Maria, sudeste do Pará*. 1987, 164f. Dissertação (mestrado em geologia e geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1987.

OLIVEIRA, D.C.; DALL'AGNOL, R.; BARROS, C.E. M.; FIGUEIREDO, M.A.B. M. (Ed.) *Petrologia magnética do Granito Paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico*. In: CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA (E.L.KLEIN, M.L. VASQUEZ, M.L. e L.T. ROSA-COSTA). Belém: Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, 2002. v. 3, p. 115-132.

OLIVEIRA, D.C.; DALL'AGNOL, R.; BARROS, C.E. M.; VALE, A. G. Geologia e petrografia do granito Paleoproterozóico Redenção, SE do cráton Amazônico. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, v. 2, n. 1, p. 139-156, 2005.

OLIVEIRA, D. C. *Modelos de evolução e colocação dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Jamon, SE do Cráton Amazônico*. 2006. Tese (doutorado em geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém 2006.

OLIVEIRA, D.C.; DALL'AGNOL, R.; BARROS, C.E. M.; OLIVEIRA, M. A.; Geology, geochemistry 749 and magmatic evolution of the Paleoproterozoic, anorogenic oxidized A-type 750 Redenção granite of the Jamon Suite, eastern Amazon Craton, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, v. 47, n. 6, p. 1441–1468. 2009a.

OLIVEIRA, M.A.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A.A. S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria granite–greenstone terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Science*, v. 27, p. 146-160, 2009b.

OLIVEIRA, D. C.; DALL'AGNOL, R.; BARROS, C.E. M.; OLIVEIRA, M. A. Geology, Geochemistry and Magmatic Evolution of the Paleoproterozoic, Anorogenic Oxidized A-type Redenção Granite of the Jamon Suite, Eastern Amazonian Craton, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, v.47, n. 6, p. 1441-1468, 2009c.

OLIVEIRA, D. C.; DALL'AGNOL, R. Geology, geochemistry and magmatic evolution of the paleoproterozoic, anorogenic oxidized A-type Redenção granite of the Jamon suite, eastern Amazonian Craton, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, v. 47, n. 11, p. 1323-1350, 2009.

PEARCE, J. A.; HARRIS, N. B. W.; TINDLE, A. G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956-983, 1984.

PEARCE, J. A. Source and setting of granitic rocks. *Episodes*, v. 19, n. 4, p. 120-125, 1996.

PIMENTEL, M. M.; MACHADO, N. Geocronologia U-Pb dos Terrenos *granito greenstone* de Rio Maria, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Camboriú, 1988. Camboriú. *Boletim de Resumos Expandidos...* Camboriú: SBG, 1994. p. 390-391.

PINHO, S. C. C. *Petrografia e geocronologia da borda ENE do Granito Serra da Queimada e da borda SE do Granito Bom Jardim, Província Estanífera do Sul do Pará*. 2005. Trabalho (Trabalho de Conclusão de Curso) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

PINHO, S. C. C.; FERNANDES, C. M. D.; TEIXEIRA, N. P.; PAIVA JR, A. L.; CRUZ, V. L.; LAMARÃO, C. N.; MOURA, C. A. V. O magmatismo paleoproterozóico da região de São Félix do Xingu, Província Estanífera do sul do Pará: petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 4, p. 724-732, 2006

PROWATKE, S.; KLEMME, S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70, n. 4, p. 513-4,527, 2006.

ROLANDO, A. P.; MACAMBIRA, M. J. B. Geocronologia dos granitóides arqueanos da região da Serra do Inajá, novas evidências sobre a formação da crosta continental no sudeste do Cráton Amazônico, SSE Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41. João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: CBG, 2002. p. 525.

ROLANDO, A. P.; MACAMBIRA, M. J. B. Archean crust formation in Inajá range área, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 4., Salvador. *Expanded, Abstracts...* Salvador: SIG, 2003. CD-ROM.

SANTOS, J. O. S. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (Ed.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, 2003.

SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; GAUDETTE, H. E.; GROVES, D. I.; MCNAUGHTON, N. J.; FLETCHER, I. R. A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, v. 3, p. 453-488, 2000.

SANTOS, J. O. S.; BREEMEN, O. B. V.; GROVES, D. I.; HARTMANN, L. A.; ALMEIDA, M. E.; MCNAUGHTON, N. J.; FLETCHER, I. R. Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U-Pb geochronology. *Precambrian Research*, v. 131, p. 73-109, 2004.

SANTOS,P.A. S.; FEIO,G.R. L.; DALL'AGNOL, R.; COSTI,H. T.; LAMARÃO,C. N.; GALARZA,M. A. Petrography, magnetic susceptibility and geochemistry of the Rio Branco Granite, Carajás Province, southeast of Pará, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*. v. 43, n. 1, p. 876-889, 2013.

SHA,L. K.; CHAPPELL,B. W. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 63, p. 3861-3881, 1999.

SOTERO, A. de M.; LAMARAO,C. N.; MARQUES, G. T.; RODRIGUES,P.R. S. Quartzo magmático e hidrotermal do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Pará: petrografia, microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência e implicações metalogenéticas. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, n. 4, p. 591-607, 2015.

SOUZA,S. Z.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF,F. J.; LEITE,A.A. S.; BARROS,C.E. M. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic constrasts on the Archean evolution of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain and the Carajás block. In: SYMPOSIUM ON ARCHEAN TERRANES OF SOUTH AMERICA PLATFORM, 1996, Brasilia. *Extended Abstracts...* Brasilia: SATSA, 1996, p.31-32.

TASSINARI,C.C. G.; MACAMBIRA,M.J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999.

TASSINARI,C.C. G.; MACAMBIRA,M.J. B. (Ed.) *Evolução tectônica do Cráton Amazônico*. In: GEOLOGIA DO CONTINENTE SUL AMERICANO: EVOLUÇÃO DA OBRA DE F.F.M. DE ALMEIDA (Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. de. (Org.)). São Paulo, 2004. p. 471-486.

TEIXEIRA,N. P.; DALL'AGNOL, R. Geologia e petrografia do Maciço Granítico Antonio Vicente. Região de São Félix do Xingu/PA. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciência da Terra*, v. 3, p. 45-73, 1991.

TEIXEIRA,N. P. *Contribuição ao estudo das rochas granitóides e mineralizações associadas da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. 1999, 508f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TEIXEIRA,N. P.; BELLO,R.M. S.; BETTENCOURT,J. S. Inclusões fluidas do maciço Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 32, n. 1, p. 135-146, 2002

TEIXEIRA,N. P.; BETTENCOURT,J. S.; DALL'AGNOL, R.; MOURA,C.A. V.; FERNANDES,C.M. D.; PINHO,S.C. C. Geoquímica dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Granítica Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 217-226, 2005

TOLEDO,M.C. M.; PEREIRA,V. P. Variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. *Revista do Instituto Geológico de São Paulo*, v. 22, n. 1-2, p.27-64, 2001.

VASQUEZ,M.L.; ROSA-COSTA,L. T.; SILVA,C. G.; RICCI, P. F.; BARBOSA, J. O.; KLEIN, E. L.; LOPES,E. S.; MACAMBIRA,E. B.; CHAVES,C. L.; CARVALHO, J. M.;

OLIVEIRA, J. G.; ANJOS, G. C.; SILVA, H. R. Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. In: M. L. VASQUEZ e L. T. ROSA-COSTA (Orgs.): Escala 1:1.000.000: 1-329. CPRM, Belém, 2008.

WHALEN, J. B.; CURRIE, K. L.; CHAPPELL, B.W. A-Type granite: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contr. Mineral. Petrol.*, v. 95, p. 407-419, 1987.