



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 567

**QUÍMICA MINERAL E CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO
DO GRANITO GRADAÚS, SUL DO PARÁ, PROVÍNCIA
CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

PAULO HIAGO DE SOUZA NERY

Orientador: Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão (UFPA)

**BELÉM
2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

N443q Nery, Paulo Hiago
Química mineral e condições de cristalização do granito Gradaús, sul do
Pará, Província Carajás /
Paulo Hiago Nery. — 2019.
xiii, 86 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Pará, Belém, 2019.

1. Petrologia. 2. Rochas ígneas. 3. Geoquímica. 4. Granito.
5. Microanálise. I. Título.

CDD 552.0098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

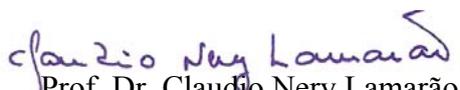
**QUÍMICA MINERAL E CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO
DO GRANITO GRADAÚS, SUL DO PARÁ, PROVÍNCIA
CARAJÁS**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
PAULO HIAGO DE SOUZA NERY**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA E GEOQUÍMICA, linha de pesquisa PETROLOGIA E EVOLUÇÃO
CRUSTAL**

Data de Aprovação: 04 / 10 / 2019

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão
Orientador – UFPA


Prof. Dr. Herbert Conceição
Membro – UFS


Prof. Dr. Hilton Túlio Costi
Membro – MPEG

AGRADECIMENTOS

- O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.
- Agradeço a Deus e aos espíritos de luz pelas bênçãos e oportunidades concedidas.
- À minha família, pelo amor e incentivo na busca de conhecimento.
- À minha companheira, que sempre esteve ao meu lado durante a produção deste trabalho, me ajudando por meio de conselhos e força.
- À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências, ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, pela infraestrutura e aprendizagem.
- Ao professor Claudio Lamarão pela dedicada orientação, confiança, paciência e conhecimento repassado ao longo desta etapa.
- Ao professor Roberto Dall’Agnol pela oportunidade de estudo que me concedeu.
- Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências, em especial aos colegas Caio Mesquita e Luan Martins, pelas ajudas, discussões e sugestões.
- Ao Laboratório de Microanálises, principalmente à Msc. Gisele Marques e a técnica Ana Paula Correa pelo suporte e organização na preparação de amostras e sessões de microsonda eletrônica.
- A todos que de alguma forma contribuíram para a confecção deste trabalho.

RESUMO

O Granito Gradaús (1882±9 Ma) é integrante do intenso magmatismo granítico anorogênico que ocorreu durante o paleoproterozóico na Província Carajás. Apresenta forma subarredondada, com cerca de 800 km² de área aflorante, e é intrusivo em metassedimentos do Grupo Rio Fresco. É composto por cinco fácies petrográficas, com conteúdos de máficos e granulação variados. Os anfibólios são cálcicos, predominantemente Fe-edenitas com razões Fe/(Fe+Mg) entre 0,77 e 0,9; hastingsitas e Fe-hornblendas ocorrem subordinadamente. A biotita é ferrosa, com composições próximas ao pólo da annita, apresentando razões Fe/(Fe+Mg) entre 0,81 e 0,96. Com base nos conteúdos de alumínio no anfibólio a pressão de colocação do plúton foi estimada em 2,4 e 3,6 kbar. Estimativas de temperatura obtidas a partir do geotermômetro de saturação em zircônio, interpretadas como próximas ao início da cristalização, variaram entre 780 e 870°C, enquanto aquelas próximas do *solidus*, obtidas por meio do geotermômetro do anfibólio, variaram de 700 a 750°C. As elevadas razões Fe/(Fe+Mg) do anfibólio, a presença de ilmenita>magnetita e a ausência de titanita magmática indicam que o plúton Gradaús cristalizou sob condições relativamente reduzidas, provavelmente entre os tampões NNO e FMQ. Suas biotitas mostram composições alcalinas-subalcalinas e plotam sempre nos campos de granitos tipo-A. Os dados comparativos de química mineral e de condições de cristalização com outros granitos anorogênicos da Província Carajás indicam, conforme estudos recentes, que o Granito Gradaús possui maiores semelhanças com os granitos da Suíte Serra dos Carajás.

Palavras-chave: Petrologia. Rochas ígneas. Granito. Microanálise.

ABSTRACT

The Gradaús Granite (1882±9 Ma) is part of the intense anorogenic granitic magmatism that occurred during the paleoproterozoic in Carajás Province. It has a rounded shape, with about 800 km² of outcrop area, and is intrusive in metasediments of the Rio Fresco Group. It is composed of five petrographic facies with varying mafic content and texture. The amphiboles are calcic, predominantly Fe-edenites with $Fe_t/(Fe_t+Mg)$ ratios between 0.77 and 0.9; hastingsites and Fe-hornblendes occurs subordinately. Biotite is ferrous, with compositions close to the annite pole, with $Fe_t/(Fe_t+Mg)$ ratios between 0.81 and 0.96. Based on the aluminum content in the amphibole the emplacement pressure of the pluton was estimated at 240 e 360 MPa. Temperature estimates obtained from the zirconium saturation geothermometer, interpreted as close to the beginning of crystallization, ranged from 780 to 870 °C, while those near the *solidus* obtained from the amphibole geothermometer ranged from 700 to 750 °C. Amphiboles with high $Fe_t/(Fe_t+Mg)$ ratios, the presence of ilmenite > magnetite and the absence of magmatic titanite indicate that Gradaús pluton crystallized under reduced conditions, probably between NNO and FMQ buffers. Biotites show alkaline-subalkaline compositions and always plot in A-type granite fields. Comparative data on mineral chemistry and crystallization conditions with other anorogenic granites from Carajás Province indicate, according to recent studies, that Gradaús Granite has greater similarities to the Serra dos Carajás Suite granites.

Keywords: Petrology. Igneous Rocks. Granite. Microanalysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

- Figura 1 - Mapa de localização do Granito Gradaús e suas as principais vias de acesso.....3
- Figura 2 - Mapa de relevo de parte do Domínio Rio Maria, Província Carajás, com a localização do Granito Gradaús e suas encaixantes. Fonte: Segundo Vasquez *et al.* (2008). Compilado de Carvalho (2017).4
- Figura 3 - Mapa esquemático mostrando a distribuição das Províncias Geocronológicas e as principais associações litológicas do Cráton Amazônico, Norte da América do Sul. Área de estudo = Domínio Rio Maria. Fonte: (Tassinari & Macambira 2004).....6
- Figura 4 - Cráton Amazônico e sua subdivisão em províncias. Limites de idades de acordo com os dados disponíveis em 2006. Fonte: (Santos *et al.* 2000, 2006).7
- Figura 5 - (a) Esboço do Cráton Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição dos granitos paleoproterozoicos anorogênicos, com destaque para o Granito Gradaús. DRM=Domínio Rio Maria. BC=Bacia Carajás. RX=Região do Xingu. Fonte: Modificado de Dall’Agnol *et al.* (2005). 15
- Figura 6 - Mapa geológico do Granito Gradaús com a distribuição das diferentes fácies. A área do Granito Gradaús indiferenciado está dentro da reserva indígena Kayapó. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; BASG=biotita-anfibólio-sienogranito; BMGP a BSGP=biotita-monzogranito a sienogranito porfirítico
Fonte: Compilado de Carvalho (2017) 18
- Figura 7 - Diagramas Q-A-P e Q-A+P-M (Streckeisen 1976) com a distribuição das rochas do Granito Gradaús. Legenda conforme Figura 6. Fonte: Compilado de Carvalho (2017). 19
- Figura 8 - Diagramas geoquímicos para as rochas do Granito Gradaús. A) $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ mol vs Al_2O_3/Na_2O+K_2O mol (Shand 1951). B) $Zr+Nb+Ce+Y$ ppm vs FeO/MgO (Whalen *et al.* 1987); campos para granitos félsicos fracionados (FG) e não fracionados tipo M, I, e S (OGT). C) $Y+Nb$ vs Rb ppm (Pearce *et al.* 1984); syn-COLG=granitos sin-colisionais; WPG=granitos intraplacas; VAG=granitos de arcos vulcânicos; ORG=granitos de cadeias oceânicas. D) $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ vs $FeO/(FeO+MgO)$ (Dall’Agnol & Oliveira 2007). Legenda conforme Figura 6. Fonte: Diagramas compilados de Carvalho (2017)20

CAPÍTULO 2

- Figura 1 - Esboço do Cráton Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição dos granitos paleoproterozoicos anorogênicos, com destaque para o Granito Gradaús. DRM=Domínio Rio Maria. BC=Bacia. . RX=Região do Xingu. Fonte: Modificado de Dall’Agnol *et al.* (2005). 26
- Figura 2 - Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de ocorrência do Granito Gradaús. Fontes: Modificado de Vasquez *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2010a), Feio *et al.* (2013), Guimarães *et al.* (2012), Santos *et al.* (2012), Santos & Oliveira (2012) e Gabriel (2012). 29
- Figura 3 - Mapa geológico do Granito Gradaús com a distribuição das diferentes fácies. A área do Granito Gradaús indiferenciado está dentro da reserva indígena Kayapó. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; BASG=biotita-anfibólio-sienogranito; BMGP a BSGP=biotita-monzogranito a sienogranito porfiríticos. Fonte: Compilado de Carvalho (2017) 32
- Figura 4 - Diagramas Q-A-P e Q-A+P-M (Streckeisen 1976) com a distribuição das rochas do Granito Gradaús. Legenda conforme Figura 3. Fonte: Compilado de Carvalho (2017). 33
- Figura 5 - Diagramas geoquímicos para as rochas do granito Gradaús. A) $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ mol vs Al_2O_3/Na_2O+K_2O mol (Shand 1951). B) $Zr+Nb+Ce+Y$ ppm vs FeO/MgO (Whalen *et al.* 1987); campos para granitos félsicos fracionados (FG) e não fracionados M, I, e S (OGT). C) $Y+Nb$ vs Rb ppm (Pearce *et al.* 1984); syn-COLG= granitos sin-colisionais; WPG= granitos intraplacas; VAG= granitos de arcos vulcânicos; ORG= granitos de cadeias oceânicas. 4) $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ vs $FeO/(FeO+MgO)$ (Dall’Agnol & Oliveira 2007). Fonte: (Carvalho 2017). 34
- Figura 6 - Imagens de cristais de anfibólio representativos dos BASG, parcialmente alterados para biotita, associados a minerais opacos e apatita. 1=anfibólio; 2=biotita; Ap=apatita; Zrn=zircão. 37
- Figura 7 - Cristais de biotita representativos das diferentes fácies do Granito Gradaús. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; PBMG=biotita-monzogranito porfirítico; PBSG= biotita-sienogranito porfirítico. Bt=biotita; Chl=clorita; Fk=álcali feldspato; Qz=quartzo; Ap=apatita; Zrn=zircão. 38

- Figura 8 - Imagens de elétrons retroespalhados em microsonda eletrônica. Cristais de anfibólios analisados na fácies BASG. Amp = Anfibólio; Ap = Apatita; Bt = Biotita; Ilm = Ilmenita; Mag = Magnetita. Pontos verdes=locais analisados. Barra branca = 100 μ m. 39
- Figura 9 - Diagrama $Mg/(Mg+Fe_{2+})$ vs ^{IV}Si (Leake *et al.* 1997) aplicado aos cristais de anfibólio do Granito Gradaús com campos de anfibólios de outros granitos anorogênicos da Província Carajás usados para comparação. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. L= leuco. S=sienogranito. AFG=álcali-feldspato granito. Fe=ferro. Edn=edenita. Hnb=hornblenda. Hast=hastingsita. Sn=estanho. 40
- Figura 10 - Imagens de elétrons retroespalhados em microsonda eletrônica. Cristais de biotita parcialmente alterados (a, b e c). Bt = Biotita; Zrn = Zircão. Pontos verdes=locais analisados. Barra branca = 100 μ m. 43
- Figura 11 - (A) Diagrama $Fe_V/(Fe_t+Mg)$ vs ^{IV}Al (Deer *et al.* 1992) mostrando a distribuição das biotitas do Granito Gradaús. Notar menores conteúdos de ^{IV}Al das biotitas provenientes da alteração dos anfibólios. (B) Diagrama $^{VI}Al+Fe^{3+}+Ti - Mg - Fe^{2+}+Mn$ (Foster 1960) mostrando o enriquecimento em Fe das biotitas do Granito Gradaús. (C) Diagrama $FeO+MnO - 10*TiO_2 - MgO$ (Nachit *et al.* 2005) mostrando a distribuição das biotitas do granito Gradaús nos campos de biotitas primárias, reequilibradas e neoformadas. Campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. P=porfirítico. AltAmph=alteração do anfibólio. BMcG=biotita microgranito. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. SG=sienogranito. L=leuco. AFG=álcali-feldspato granito. IAlt=intensamente alterado. LBLMG=biotita leucomonzogranito tardio. Fontes: Granito Jamon= Dall’Agnol *et al.* (1999, 2005); Granito Bannach= Mesquita (2018); Granito Antônio Vicente= Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Cigano= Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Gradaús=este estudo. 44

- Figura 12 - Diagrama $^{IV}Al+^{VI}Al$ vs Mg (Nachit *et al.* 1985) para as biotitas do Granito Gradaús e campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. P=porfirítico. AltAmph=alteração do anfibólio. BMcG=biotita-microgranito. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. SG=sienogranito. L=leuco. AFG=álcali feldspato granito. IAlt=intensamente alterado. LBLMG=biotita-leucomonzogranito tardio. Fontes: Granito Jamon= Dall’Agnol *et al.* (1999, 2005); Granito Bannach=Mesquita (2018); Granito Antônio Vicente=from Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Cigano=Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo. Granito Gradaús=este estudo.46
- Figura 13 - Diagramas Al_2O_3 vs MgO e $FeO - MgO - Al_2O_3$ Fonte: (Abdel-Rahman *et al.* 1994) mostrando a afinidade das biotitas do Granito Gradaús com granitos anorogênicos. Campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. Simbologia conforme Figura 12.....47
- Figura 14 - Intervalos de pressão de cristalização do Granito Gradaús e outros granitos anorogênicos da Província Carajás calculados com base nos geobarômetros de: (1) Hammarstron & Zen (1986); (2) Blundy & Holland (1994); (3) Schmidt (1992); (4) Mutch *et al.* (2016). A* Este estudo; B* Dall’Agnol *et al.* (2005); C* Mesquita (2018); D* Teixeira (1999).54
- Figura 15 - Diagrama $Fe_t/(Fe_t+Mg)$ vs ^{IV}Al (Anderson & Smith 1995) mostrando a distribuição dos anfibólios do Granito Gradaús e campos com a composição de anfibólios de granitos selecionados para comparação. BASG=biotita-anfibólio-sienogranito.57
- Figura 16 - Diagrama $\log fO_2$ vs T mostrando os possíveis intervalos de temperatura de formação e condições estimadas de fO_2 para os granitos Gradaús, Antônio Vicente, Jamon e Cigano. Curvas de estabilidade dos principais tampões e diferentes fases de Fe em função do estágio de oxidação no sistema Fe-Si-O baseado em Frost (1991). As linhas coloridas ilustram a evolução do granito Gradaús e dos demais granitos em comparação. IW = ferro-wustita; NNO = níquel-óxido de níquel; FMQ = fayalita-magnetita-quartzo; HM = magnetita-hematita. Fontes: Este estudo, Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), Carvalho (2017).....58

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Dados geocronológicos dos granitoides do Domínio Rio Maria.	12
Tabela 2 - Dados geocronológicos de granitos tipo A paleoproterozoicos da Província Carajás.	16
Tabela 3 - Relação das lâminas polidas do Granito Gradaús utilizadas para análises de microsonda eletrônica.....	23

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Dados geocronológicos de granitos tipo A paleoproterozoicos da Província Carajás.	27
Tabela 2 - Relação das amostras do Granito Gradaús utilizadas para análises com microsonda eletrônica.....	36
Tabela 3 - Composições químicas representativas dos anfibólios do Granito Gradaús.....	41
Tabela 4 - Composições químicas representativas das biotitas do Granito Gradaús....	48
Tabela 5 - Novas composições químicas representativas das biotitas dos granitos Cigano e Antônio Vicente obtidas neste trabalho.	52
Tabela 6 - Fórmulas dos geobarômetros (em kbar) utilizados para cálculos das pressões de cristalização do Granito Gradaús.	55
Tabela 7 - Geotermômetros (em °C) utilizados para cálculos das temperaturas de cristalização do Granito Gradaús.....	56
Tabela 8 - Principais parâmetros de cristalização do Granito Gradaús e de outros plutons usados para comparação.....	61

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
LISTA DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO	3
1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
1.3.1 Província Carajás	8
1.3.2 Domínio Rio Maria	9
1.4 MAGMATISMO GRANÍTICO ANOROGÊNICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS	13
1.5 GRANITO GRADAÚS: SÍNTESE DA GEOLOGIA, PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA	17
1.6 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	20
1.7 OBJETIVOS	21
1.8 MATERIAIS E MÉTODOS	22
1.8.1 Pesquisa Bibliográfica	22
1.8.2 Estudo Petrográfico	22
1.8.3 Química Mineral	23
1.8.3.1 Microsonda Eletrônica	23
CAPÍTULO 2	24
2.1 INTRODUÇÃO E LOCALIZAÇÃO	24
3 GEOLOGIA REGIONAL	28
3.1 DOMÍNIO RIO MARIA	30
4 GRANITO GRADAÚS	31
4.1 SÍNTESE DA GEOLOGIA, PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA	31
5 RESULTADOS	35
5.1 AMOSTRAGEM E TÉCNICAS ANALÍTICAS	35
5.2 ASPECTOS TEXTURAIS	36
5.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CLASSIFICAÇÃO	38
5.4 TIPOLOGIA	45
6 DISCUSSÃO	53

6.1 CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO	53
6.2 COMPARAÇÃO COM OUTROS GRANITOS TIPO A PALEOPROTEROZOICOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS.....	59
6.3 COMPARAÇÃO COM GRANITOS TIPO A DE OUTRAS PROVÍNCIAS.	61
7 CONCLUSÕES.....	63
CAPÍTULO 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS	75

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Nos domínios da Província Geocronológica Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004) ou Carajás (Santos *et al.* 2000), no Cráton Amazônico, afloram granitos anorogênicos paleoproterozoicos, com dimensões variando de batolíticas a pequenos stocks, intrusivos em rochas do embasamento arqueano. Com base em estudos petrográficos, geoquímicos, de química mineral, geocronológicos e de suscetibilidade magnética, Dall’Agnol *et al.* (2005) dividiram esses granitos em três grandes suítes: (1) **Suíte Jamon**, de caráter predominantemente oxidado e similar aos granitos da série magnetita (Ishihara 1981); é formada pelos plútons Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999a,c), Musa (Gastal 1987), Redenção (Oliveira *et al.* 2008, 2009, 2010), Bannach (Almeida *et al.* 2006, Mesquita 2018), Marajoara (Rocha Jr. *et al.* 2004, Santos 2017) e Manda Saia (Leite 2001). (2) **Suíte Intrusiva Velho Guilherme**, formada em condições redutoras, contendo mineralizações de Sn-W e similar aos granitos da série ilmenita (Ishihara 1981); é constituída pelos granitos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita, Serra da Queimada, Ubim/Sul e Bom Jardim (Abreu & Ramos 1974, Dall’Agnol *et al.* 1993, Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2012, Melo & Lamarão 2017). (3) **Suíte Serra dos Carajás**, de caráter intermediário entre os anteriores citados, é representada pelos granitos Cigano, Pojuca e Central ou Serra dos Carajás (Dall’Agnol 2005, Javier Rios *et al.* 1995a, b, Villas 1999).

O Granito Gradaús (Carvalho 2017), juntamente com os granitos Seringa (Paiva Jr. *et al.* 2011, Teixeira *et al.* 2018), São João (Lima *et al.* 2014, Teixeira *et al.* 2018) e Rio Branco (Santos *et al.* 2013) (Figura 2) fazem parte deste importante magmatismo anorogênico da Província Carajás, porém ainda não foram incluídos em nenhuma das três suítes e permanecem como granitos indiferenciados. Dados petrográficos, geoquímicos, geocronológicos e de suscetibilidade magnética (SM) indicam maior afinidade desses quatro corpos com as rochas da Suíte Serra dos Carajás.

A química mineral é uma ferramenta muito utilizada em estudos de tipologia de granitos (Nachit *et al.* 1985, 2005, Deer *et al.* 1992, Abdel-Rahman 1994, Abdel-Fattah & Abdel-Rahman 1996, Lamarão & Dall’Agnol 2004, Cunha *et al.* 2016, Gao *et al.* 2016, Mesquita 2018) e para estimar parâmetros intensivos na cristalização de magmas graníticos (Wones & Eugster 1965, Hammarstron & Zen 1986, Hollister *et al.* 1987, Schmidt 1992, Anderson &

Smith 1995, Dall’Agnol *et al.* 1999b, 1999c, 2005, 2017, Lamarão & Dall’Agnol 2004, Anderson *et al.* 2008, Ridolfi *et al.* 2010, Erdmann *et al.* 2014, Papoutsas & Pe-Piper 2014, Cunha *et al.* 2016, Mutch *et al.* 2016, Mesquita 2018).

Na Província Carajás, estudos de química mineral nos granitos anorogênicos estão restritos aos corpos Jamon e Bannach (Suíte Jamon), Antônio Vicente (Suíte Velho Guilherme) e Cigano (Suíte Serra dos Carajás); os demais granitos anorogênicos ainda carecem deste tipo de estudo.

Neste trabalho são descritos e interpretados os dados de química mineral de anfibólios e biotitas, obtidos por microsonda eletrônica, nas diferentes fácies do Granito Gradaús, com o objetivo de determinar suas composições e estimar os parâmetros intensivos (P, T, fO_2) reinantes durante a cristalização deste corpo. É feito ainda um estudo comparativo com outros granitos anorogênicos da Província Carajás e de outros crátons. Pretende-se, portanto, contribuir para o avanço da caracterização mineralógica deste plúton e do magmatismo anorogênico do Cráton Amazônico.

Esta dissertação é apresentada na forma capítulos, onde no Capítulo I (introdutório) constam os dados de localização, contexto geológico regional, com destaque para o Domínio Rio Maria e granitos anorogênicos da Província Carajás, justificativa do trabalho, objetivos da pesquisa e procedimentos metodológicos. O Capítulo II contém os resultados que serão submetidos à revista *Brazilian Journal of Geology* após as correções da banca examinadora. E, por último, o Capítulo III inclui as conclusões da dissertação, bem como as referências bibliográficas utilizadas.

1.2 LOCALIZAÇÃO

As principais vias terrestres de acesso à área de ocorrência do Granito Gradaús são as Rodovias PA-150 (Belém-Marabá-Redenção) e PA-287 (Redenção-Cumaru do Norte). A Figura 1 mostra o mapa de localização e acesso ao Granito Gradaús.

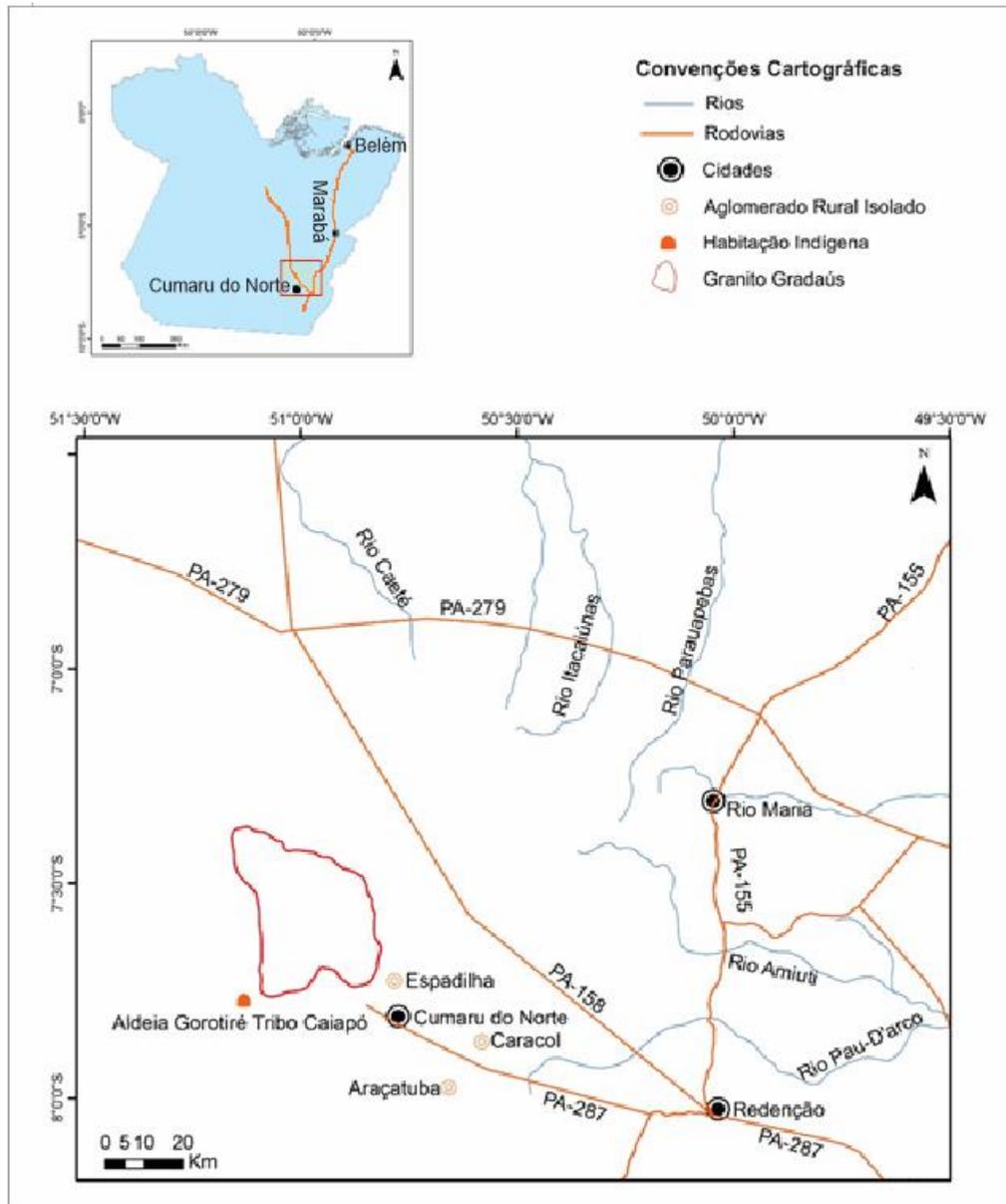


Figura 1 - Mapa de localização do Granito Gradaús e suas principais vias de acesso.

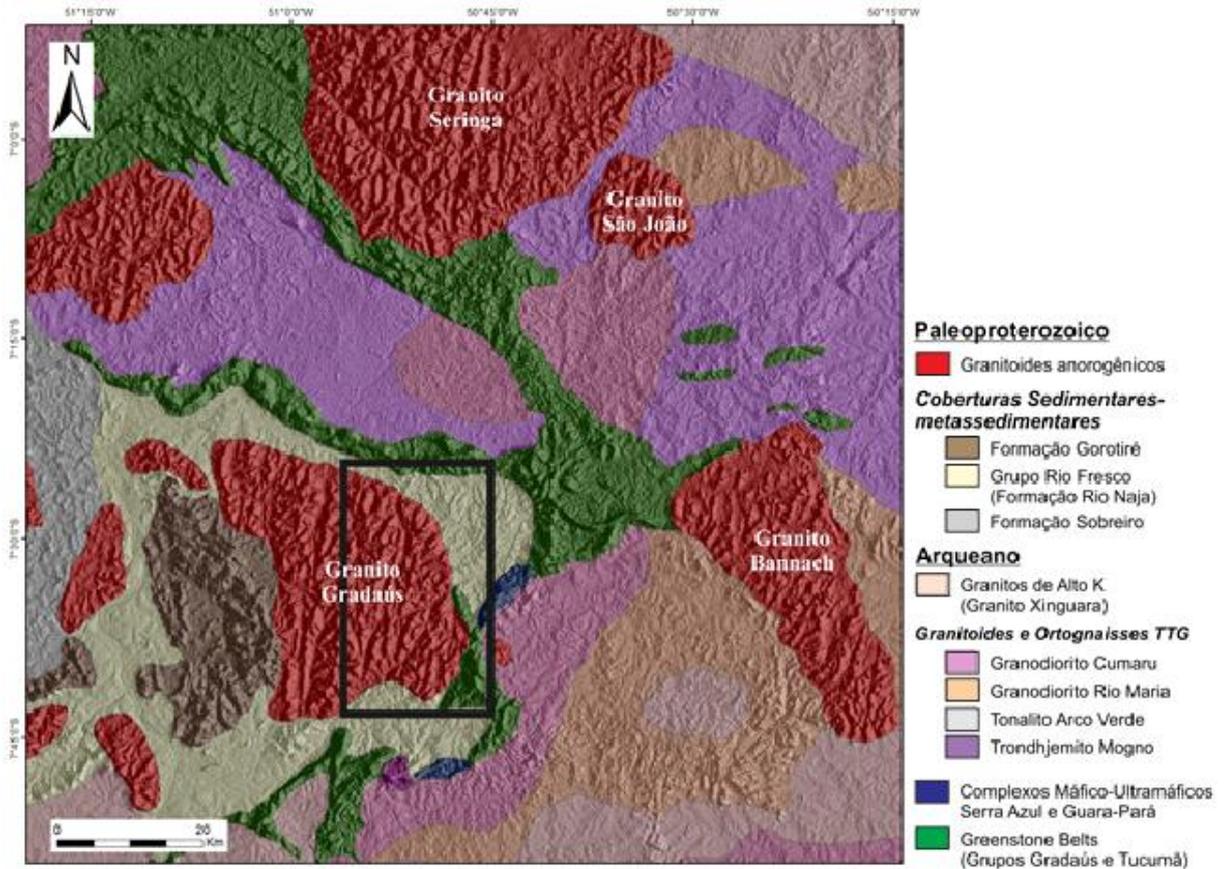


Figura 2 - Mapa de relevo de parte do Domínio Rio Maria, Província Carajás, com a localização do Granito Gradaús e suas encaixantes. Fonte: Segundo Vasquez *et al.* (2008). Compilado de Carvalho (2017).

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico (CA), localizado no norte da América do Sul, é uma das maiores áreas cratônicas no mundo. É subdividido em seis províncias geocronológicas com base em idades geocronológicas, *trends* estruturais, assembleias litológicas, evidências geofísicas e histórias geológicas particulares e distintas em relação às províncias adjacentes (Tassinari & Macambira 1999, 2004, Teixeira *et al.* 1989, Santos *et al.* 2000, Santos 2003, Santos *et al.* 2006).

Ao longo da evolução dos conhecimentos geológicos da região Amazônica, várias propostas sobre a tectônica do Cráton foram elaboradas por diversos autores. A linha de pensamento mais antiga e atualmente pouco utilizada, visto o avanço do conhecimento geológico e do acervo geocronológico disponível, é tipificada por autores como Amaral (1974), Almeida (1978), Issler (1977), Hasui *et al.* (1984) e Costa & Hasui (1997), os quais propuseram que a tectônica pré-cambriana do Cráton é caracterizada por processos de reativação de plataforma e formação de blocos continentais ou paleoplacas por meio de retrabalhamento de crosta continental no Arqueano e Paleoproterozoico. Durante o

Mesoproterozoico, segundo essa concepção, teriam ocorrido apenas processos de reativação e/ou retrabalhamento de rochas preexistentes. A linha de modelo tectônico mais atual proposta por Cordani *et al.* (1979), seguida e modificada por Tassinari (1981), Cordani & Brito Neves (1982), Teixeira *et al.* (1989) e Tassinari (1996), é baseada nos conceitos das orogenias modernas, nas quais, durante o Arqueano, o Paleo e o Mesoproterozoico, teria ocorrido uma sucessão de arcos magmáticos envolvendo a formação de material juvenil derivado do manto, como também processos subordinados de retrabalhamento crustal.

Dentre os trabalhos que apoiam essa hipótese mobilista existem os de Tassinari & Macambira (1999), Tassinari *et al.* (2000) e Santos *et al.* (2000), sendo que este último difere dos outros dois, essencialmente nos limites das províncias geocronológicas e dos intervalos temporais das orogenias. Tassinari & 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, propuseram mudanças cartográficas e evolutivas, admitindo o bloco Carajás como uma província independente formada durante o arqueano e com extensão até o Amapá.

Seguindo a concepção de Tassinari & Macambira (1999, 2004), o CA é dividido em seis províncias geocronológicas (Figura 3), resultado de retrabalhamento e acresção crustal durante o Paleo e o Mesoproterozoico ao longo de cinturões móveis, as quais compreendem: Província Amazônia Central (>2,5 Ga); Província Maroni-Itacaiúnas (2,25-2,0 Ga); Província Ventuari-Tapajós (1,95-1,8 Ga); Província Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga); Província Rondoniana-San Ignácio (1,55-1,3 Ga) e Província Sunsás (1,3-1,0 Ga). O CA é limitado por faixas móveis neoproterozoicas e tem permanecido estável desde o Neoproterozoico. Em relação a sua área aflorante, é dividido em: Escudo Brasil-central e Escudo das Guianas, ambos separados pelas rochas sedimentares da Bacia do Amazonas (Dall'Agnol *et al.* 1999, Tassinari & Macambira 1999, 2004).

O Granito Gradaús está localizado na Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004), que representa a porção mais antiga do CA, com idade superior a 2,5 Ga não afetada pela orogenia Transamazônica. Essa província foi gerada, reativada e tectonicamente estabilizada no Arqueano; somente no Paleoproterozoico foi afetada por eventos distensivos acompanhados por intrusões graníticas anorogênicas e diques associados (Tassinari & Macambira 2004). Esses mesmos autores, juntamente com Dall'Agnol *et al.* (1999) dividiram essa província em dois domínios principais: um formado por áreas com

embasamento arqueano - a Província Carajás, no sudeste do Cráton, e o outro formado pela faixa de direção SE-NW que vai da região a oeste da Província Carajás ao Estado de Roraima, sendo parcialmente coberta pela bacia do Amazonas.

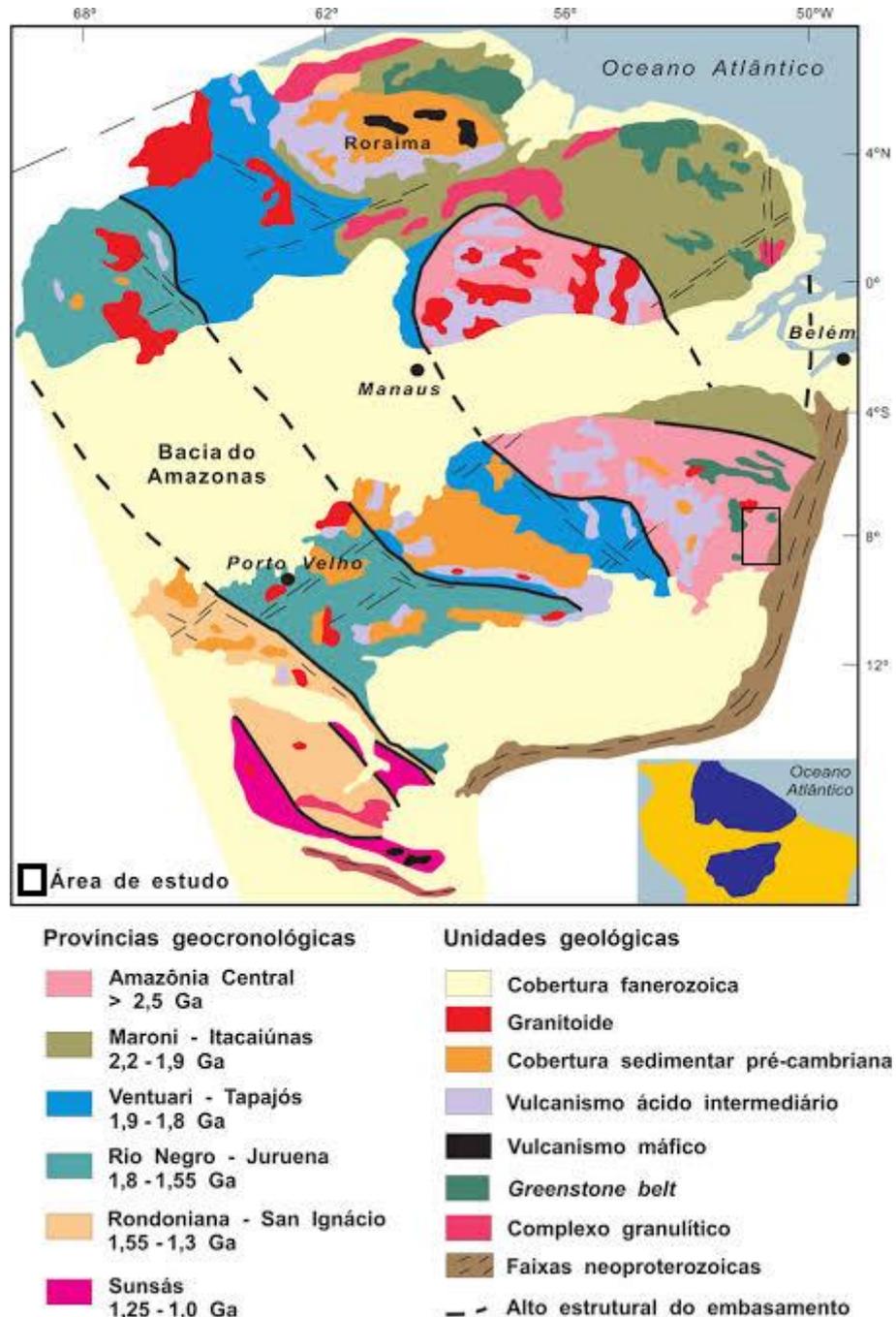
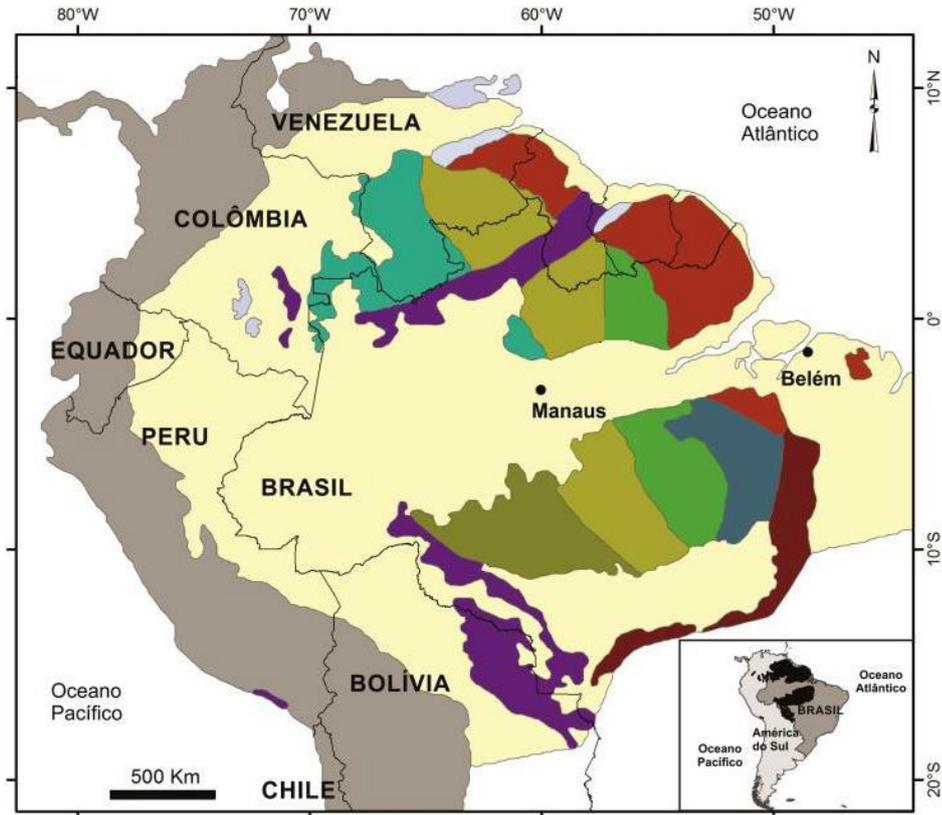


Figura 3 - Mapa esquemático mostrando a distribuição das Províncias Geocronológicas e as principais associações litológicas do Cráton Amazônico, Norte da América do Sul. Área de estudo = Domínio Rio Maria. Fonte: (Tassinari & Macambira 2004).

Dados de mapeamentos geológicos regionais mais atualizados, em conjunto com dados aerogeofísicos e, principalmente, novos dados isotópicos, permitem que o conhecimento do Cráton Amazônico e os limites entre suas províncias geológicas sejam

continuamente aprimorados (Santos *et al.* 2006). A partir disso, Santos *et al.* (2006) propuseram uma nova subdivisão ao Cráton Amazônico em sete províncias geológicas e um cinturão de cisalhamento: Carajás (3,0-2,5 Ga), Amazônia Central (supostamente arqueana), Transamazonas (2,26-2,01 Ga), Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga), Rio Negro (1,82-1,52 Ga), Rondônia-Juruena (1,82-1,54 Ga) e Sunsás e K'Mudku (1,45-1,10 Ga).



- Carajás (3,0-2,5 Ga)
- Amazônia Central (supostamente Arqueana)
- Transamazonas (2,26-2,01 Ga)
(Imataca e Bakhuis)
- Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga)
- Rio Negro (1,82-1,52 Ga)
- Rondônia-Juruena (1,82-1,54 Ga)
- Sunsás e K'Mudku (1,45-1,10 Ga)
- Faixa orogênica Andes
- Faixa orogênica Araguaia
- Cobertura sedimentar fanerozoica e proterozoica

Figura 4 - Cráton Amazônico e sua subdivisão em províncias. Limites de idades de acordo com os dados disponíveis em 2006. Fonte: (Santos *et al.* 2000, 2006).

No modelo de Santos *et al.* (2000, 2006), a combinação de dados U-Pb e Sm-Nd indicaram que as províncias Carajás, Transamazonas, Tapajós-Parima e Rondônia-Juruena representariam crosta juvenil, ao passo que as províncias Rio Negro e Sunsás estariam relacionadas a processos colisionais. A Província Amazônia Central seria fruto de retrabalhamento de crosta arqueana preexistente. A Figura 4 mostra a divisão proposta por Santos *et al.* (2000, 2006).

1.3.1 Província Carajás

A Província Carajás (PC), situada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), é considerada como um núcleo central preservado e estável desde o final do Arqueano (2,5 Ga) e que faz parte da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999, 2004), ou alternativamente, sendo considerada como uma Província independente (Santos 2003). Inicialmente, Souza *et al.* (1996) subdividiram tectonicamente a PC em Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (TGGRM) a sul, e Bloco Carajás a norte. O primeiro compreende as rochas mais antigas e com características ígneas bem preservadas, enquanto a porção norte manteria um embasamento mesoarqueano, afetado por eventos tectonotermiais de idade neoarqueana, representado por uma vasta sequência vulcanossedimentar e intrusões granitoides sintectônicas. Posteriormente, Dall'Agnol *et al.* (2006) denominaram o segmento de crosta situado entre o TGGRM e a Bacia Carajás como Domínio de Transição, interpretado como uma extensão do TGGRM afetado pelos eventos neoarqueanos que deram origem à Bacia Carajás. Vasquez *et al.* (2008), nesse mesmo contexto, seguiram a proposta de Santos (2003) e dividiram a Província em dois domínios tectônicos distintos: Domínio Rio Maria, de idade mesoarqueana (3,0-2,87 Ga), e Domínio Carajás, formado por rochas meso e neoarqueanas (3,0-2,76 Ga). Essa nova configuração fez com que Feio & Dall'Agnol (2012) redefiniram o Domínio de Transição como Subdomínio de Transição. Mais recentemente, a proposta de Dall'Agnol *et al.* (2013) desconsideraram o termo Subdomínio da Transição e dividiram a área nos domínios Sapucaia, ao sul, e Canaã dos Carajás, ao norte.

Considerando que o Granito Gradaús, objeto deste estudo, está localizado no Domínio Rio Maria, será feito a seguir uma descrição apenas das principais unidades presentes neste domínio (Figura 5).

1.3.2 Domínio Rio Maria

O Domínio Rio Maria (DRM) é caracterizado pela ocorrência de sequências metavulcanossedimentares tipo *greenstone-belts* e granitoides tonalítico-trondhjemítico-granodioríticos (TTG), granitoides arqueanos com alto Mg (Suíte Sanukitoide Rio Maria), leucogranodioritos-granitos ricos em Ba-Sr pertencentes à Suíte Guarantã e leucogranitos potássicos de afinidade cálcico-alcálica (Xinguara e Mata Surrão). Essas unidades são cobertas por metassedimentos do Grupo Rio Fresco, também de idade arqueana.

Desta forma, a sequência de eventos do DRM se dá por: 1- Série TTG mais antiga representada pelo Tonalito Arco Verde, Trondhjemito Mogno, Tonalito Caracol e Tonalito Mariazinha, todos oriundos da fusão de metabasaltos, previamente transformados em granada-anfibolitos (Leite 2001); 2- Suíte Sanukitoide Rio Maria, constituída por granitoides predominantemente granodioríticos com alto Cr, Ni e Mg, além de rochas intermediárias e máficas associadas; 3- Suíte Guarantã e granitos similares, compostos por leucogranodioritos e leucomonzogranitos cálcio-alcálicos enriquecidos em Ba e Sr; 4- Série TTG mais jovem representada pelo Trondhjemito Água Fria, e 5- leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcálica, definidos pelos granitos Xinguara e Mata Surrão. As diversas unidades citadas possuem idades arqueanas de 2,97 a 2,86 Ga (Macambira & Lafon 1995, Pimentel & Machado 1994, Dall'Agnol *et al.* 1997, Leite *et al.* 1999, Leite 2001, Leite *et al.* 2004, Dall'Agnol *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2009, Guimarães *et al.* 2010; Almeida *et al.* 2010, 2011, Santos & Oliveira 2016).

Os *Greenstone-belts* são formados por sequências vulcanossedimentares (Sapucaia, Identidade, Lagoa Seca, Babaçu, Seringa, Pedra Preta) metamorfizadas em condições de fácies xisto-verde a anfibolito (Souza *et al.* 1997, 2001) e agrupadas no Supergrupo Andorinhas (Huhn *et al.* 1988, DOCEGEO 1988). Vasquez *et al.* (2008) dividem os *greenstone belts* em seis grupos: Gradaús, Serra do Inajá, Lagoa Seca, Babaçu, Sapucaia e Tucumã, além da Formação Quixadá. São compostos por rochas metaultramáficas com os peridotitos e komatiitos que tem textura *spinifex* e metamáficas com estruturas *pillow* em metabasaltos, além de metavulcânicas intermediárias e ácidas intercalados com rochas metassedimentares clásticas e químicas, pertencentes ao Supergrupo Andorinhas de 3,0 a 2,9 Ga (Macambira & Lancelot 1991, Pimentel & Machado 1994, Avelar 1996, Souza *et al.* 2001, Lafon *et al.* 2000, Rolando & Macambira 2003) e ao Grupo Tucumã (Araújo & Maia 1991).

O Tonalito Arco Verde (2,96 Ga; Rolando & Macambira 2003; Almeida *et al.* 2011). Apresenta forte foliação definida pela alternância do bandamento composicional, granulação média, possuindo caráter tonalítico a trondhjemítico onde a biotita é a fase ferromagnésiana dominante (Althoff *et al.* 2000).

O Trodhjemito Mogno (2,95 Ga e 2,92 Ga; Macambira 1992, Macambira & Lafon 1995, Almeida *et al.* 2011) ocorre ao sul de Xinguara e se estende até o norte de Bannach. Consiste de um extenso batólito de composição trondhjemítica, contendo enclaves máficos, interpretados como metabasaltos do Supergrupo Andorinhas (Souza 1994).

O Complexo Tonalítico Caracol (2,94 Ga; Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011) ocorre a noroeste da cidade de Xinguara e foi individualizado por Leite (2001) a partir do Complexo Xingu. É caracterizado por apresentar rochas com bandamento composicional de ocorrência regular e geralmente mostram-se muito deformadas (Leite *et al.* 2004). São rochas de composição tonalítica e trondhjemítica seccionadas pelo Granito arqueano Xinguara. Apresenta contato não exposto com o *greenstone belt* de Sapucaia (Leite *et al.* 1997, 2004). Contém enclaves e megaenclaves de rochas similares aos metabasaltos dos *greenstone belts*.

O Tonalito Mariazinha apresenta idades em torno de 2,92 Ga (Pb/Pb em zircão e LA-MC-ICP-MS em zircão), sendo interpretadas como representativas da idade de cristalização da unidade (Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011). Possui foliação NE-SW discordante do *trend* regional NW-SE. Contém enclaves máficos e é cortado pelo Granodiorito Grotão e veios de leucogranitos.

Almeida *et al.* (2011) defendem que estes TTGs derivaram de fontes similares aos metabasaltos do Supergrupo Andorinhas, e os diferenciam em três grupos: (1) grupo com altas razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta, que foram gerados a partir de fusão de rochas máficas em profundidades elevadas (>1,5 GPa), cujas fontes possuíam granada e anfibólio residual; (2) grupo com razões La/Yb, Sr/Y, Nb/Ta moderadas, formados em pressões intermediárias (~1,0-1,5 GPa), mas ainda no campo de estabilidade da granada; (3) grupo com baixas razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta, cristalizados de magmas gerados a baixas pressões (1,0 GPa) a partir de uma fonte anfibolítica com plagioclásio residual.

A Suíte Sanukitoide Rio Maria (2,87 Ga; Leite & Dall'Agnol 1994, Oliveira *et al.* 2009, 2010) é constituída predominantemente por granodioritos, subordinadamente monzogranitos e quartzo-dioritos ou quartzo monzodiorito, além de rochas acamadadas e enclaves máficos. São intrusivas nos *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas, nos tonalitos Arco Verde, Mariazinha e Caracol, e no Trodhjemito Mogno, enquanto que os

leucogranitos potássicos de afinidade cálcio alcalina e o Trondhjemito Água Fria são intrusivos na Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.* 2009).

A Suíte Guarantã é composta pelos plútons graníticos Guarantã, Azulona e Trairão localizados na região de Pau D'arco; são constituídos predominantemente por biotita-leucogranodioritos e biotita-leucomonzogranitos porfiríticos fortemente deformados (Althoff 1996). Geoquimicamente apresentam razão $K_2O/Na_2O < 1$ e altos conteúdos de Ba e Sr, grau variável de fracionamento de ETR pesados e anomalias de Eu ausentes ou pouco marcantes (Dias 2009, Almeida *et al.* 2010). Almeida *et al.* (2010) assumem que estas rochas foram geradas a partir da mistura em diferentes proporções de magmas de composição trondhjemítica com magmas leucograníticos ricos em Ba e Sr, originados a partir do fracionamento de magmas sanukitoides.

Os leucogranitos potássicos de afinidade cálcico-alcalina são representados pelos granitos Xinguara (2,86 Ga; Macambira 1992, Leite *et al.* 2004) e Mata Surrão (2,87 Ga, Pb-Pb em rocha total; Gibbs *et al.* 1986), localizado na parte sul da região de Redenção e intrusivo no Tonalito Arco Verde. Ambos são recobertos por sedimentos do Grupo Rio Fresco (DOCEGEO 1988).

O Grupo Rio Fresco é representado por rochas sedimentares das formações Tocandeira e Rio Naja (Santos & Pena Filho 2000). É composto por sedimentos clásticos grossos a finos, químicos e formação ferrífera bandada, anquimetamorfisados (Hirata *et al.* 1982, DOCEGEO 1988).

No DRM, o extenso magmatismo granítico anorogênico que afetou o Cráton Amazônico durante o Paleoproterozoico secciona todas as unidades anteriores. São agrupados nas suítes Jamon, Serra dos Carajás e Velho Guilherme, compostas por batólitos e stocks graníticos com idades entre 1,88 e 1,86 Ga (Dall'Agnol *et al.* 2005). São granitos isotrópicos, com contatos bruscos e enclaves das rochas encaixantes arqueanas (Dall'Agnol *et al.* 1994, 1999, 2005). De modo geral, os contrastes entre as suítes são ocasionados provavelmente pela natureza distinta de suas fontes, bem como pela temperatura de fusão, conteúdo de água e fugacidade de oxigênio dos seus respectivos magmas (Dall'Agnol *et al.* 2005).

A Tabela 1 apresenta os dados geocronológicos das rochas arqueanas do Domínio Rio Maria.

Tabela 1 - Dados geocronológicos dos granitoides do Domínio Rio Maria.

Unidades Estratigráficas	Rocha	Método	Material analisado	Idade (Ma)
Leucogranitos Potássicos				
Granito Mata Surrão	Leucogranito	Pb-Pb	Rocha Total	2872±10 (1)
	Leucogranito	Pb-Pb	Zircão	2875±11 (7)
	Leucogranito	Pb-Pb	Zircão	2881±2 (7)
Granito Xinguara	Leucogranito	Pb-Pb	Zircão	2865±1 (8)
Leucogranodiorito-granitos				
Suíte Guarantã	Granodiorito	Pb-Pb	Zircão	2868±5 (9)
	Leucogranito	Pb-Pb	Zircão	2864±8 (13)
	Leucogranito	Pb-Pb	Zircão	2870±5 (5)
Séries TTGs Jovens				
Trondhjemitó Água Fria	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2864±21 (8)
Suíte Sanukitoide Rio Maria				
Granodiorito Rio Maria e rochas relacionadas	Granodiorito	U-Pb	Zircão	2874+9/-10 (3)
	Granodiorito	U-Pb	Zircão, Titanita	2872±5 (2)
	Quartzo-diorito	Pb-Pb	Zircão	2878±4 (4)
	Diorito	Pb-Pb	Zircão	2880±4 (7)
	Granodiorito	Pb-Pb	Zircão	2877±6 (7)
Tonalito Parazônia	Quartzo-diorito	Pb-Pb	Zircão	2876±2 (11)
	Tonalito	U-Pb	Titanita	2858 (2)
Séries TTGs Antigas				
Tonalito Caracol (Tonalito Mariazinha)	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2948±5 (8)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2936±3 (8)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2924±2 (12)
Trondhjemitó Mogno	Trondhjemitó	U-Pb	Zircão	2871±7 (2)
	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2857±13 (6)
	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2900±21 (6)
	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2962±8 (12)
	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2968±2 (12)
	Trondhjemitó	Pb-Pb	Zircão	2959±2 (12)
Tonalito Arco Verde	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2964±4 (10)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2948±7 (7)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2981±8 (7)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2988±5 (7)
	Tonalito	Pb-Pb	Zircão	2952±2 (12)
	Tonalito	U-Pb	Zircão	2948±2 (12)
Greenstone Belts				
Supergrupo Andorinhas	Metavulcânica félsica	U-Pb	Zircão	2904+29-22 (3)
	Metagrauvaca	U-Pb	Zircão	2971±18 (3)
	Metavulcânica félsica	U-Pb	Zircão	2972±5 (2)

Fontes: (1) Lafon *et al.* (1994), (2) Pimentel & Machado (1994), (3) Macambira & Lancelot (1996), (4) Dall'Agnol *et al.* (1999), (5) Althoff *et al.* (2000), (6) Macambira *et al.* (2000), (7) Rolando & Macambira (2003), (8) Leite *et al.* (2004), (9) Almeida *et al.* (2008), (10) Vasquez *et al.* (2008), (11) Guimarães *et al.* (2010), (12) Almeida *et al.* (2011), (13) Almeida *et al.* (2013). Fonte: Segundo (Carvalho 2017).

1.4 MAGMATISMO GRANÍTICO ANOROGÊNICO DA PROVÍNCIA CARAJÁS

O evento magmático relacionado à geração dos granitos anorogênicos do DRM se constitui em um dos mais importantes registrados no Cráton Amazônico (Dall'Agnol *et al.* 1994, 2005). Estes granitos formam batólitos ou *stocks* com formas subcirculares, possuem representação em toda a Província Carajás e estão divididos, com base em suas características geológicas, petroquímicas, de suscetibilidade magnética (SM), geocronológicas, isotópicas e aspectos morfológicos e composicionais de zircão em três suítes graníticas (Dall'Agnol *et al.* 2005): **1- Suíte Jamon (SJ)**, representada pelos plútons Jamon, Musa, Redenção, Bannach, Marajoara e Manda Saia; é formada por rochas isotrópicas, de nível crustal elevado, afinidades intraplaca, tendo sido colocados em uma crosta rígida, cortando discordantemente suas rochas arqueanas encaixantes; xenólitos das encaixantes, assim como efeitos de metamorfismo de contato da fácies hornblenda-hornfels nas mesmas são comuns (Dall'Agnol *et al.* 1985). Dominam monzogranitos com ocorrência subordinada de sienogranitos. As principais fases acessórias presentes são apatita, zircão, allanita, magnetita e ilmenita, com fluorita aparecendo apenas em fácies mais evoluídas (Dall'Agnol *et al.* 1999, Oliveira *et al.* 2009). Apresentam zoneamento de fácies aproximadamente concêntrico, com as fácies mais evoluídas tendendo para a porção central dos corpos. São metaluminosos a peraluminosos e possuem afinidades com os granitos tipo A (Whalen *et al.* 1987), do subtipo A2 (Eby 1992). **2- Suíte Serra dos Carajás (SSC)**, localizada na Bacia Carajás, é representada pelos granitos Central, Cigano e Pojuca. As principais rochas nestes corpos são monzogranitos e sienogranitos com conteúdo moderado de minerais máficos ($M < 15\%$); as fases acessórias são similares às da SJ, no entanto titanita está geralmente ausente e fluorita e topázio são comuns (Villas 1999). **3- Suíte Intrusiva Velho Guilherme (SIVG)**, ocorre na Região do Xingu e é representada pelos granitos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Serra da Queimada, Bom Jardim, Rio Xingu, Benedita, Ubim Norte e Ubim Sul. Na SIVG sienogranitos são dominantes sobre os monzogranitos, e álcali feldspato-granitos e *greisens* mineralizados em cassiterita e wolframita ocorrem associados com as rochas mais evoluídas. Monazita, torita, zircão, xenotímio, fluorita e columbita são acessórios comuns (Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2007, 2012).

De acordo com Dall'Agnol *et al.* (2005), as três suítes exibem características geoquímicas de granitos tipo A, com conteúdos de $\text{SiO}_2 > 65\%$ e razões $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ entre 1,0 e 2,0, com os maiores valores no sentido SJ-SIVG-SSC. As rochas que formam as suítes são metaluminosas a fracamente peraluminosas, com razões $\text{FeO}_t/(\text{MgO}+\text{FeO}_t)$ sempre maiores

que 0,8 e crescentes na mesma direção que as razões K_2O/Na_2O ; dentro de uma mesma suíte, crescem das variedades menos para as mais evoluídas. Os padrões de elementos terras raras (ETR) mostram anomalia de Eu moderada a forte. As idades TDM das três suítes variam de 3,35 a 2,60 Ga, e os valores de ϵNd das SJ e SSC são similares (-10,5 a -8,1 e -9,7 a -7,9, respectivamente) e maiores que os encontrados na SIVG (-12,1 a -12,2), consistentes com a geração de magmas a partir de uma fonte crustal Arqueana (Rämö *et al.* 2002). Os valores de SM são maiores nos plútons da SJ, comparativamente menores nos da SIVG e intermediários nas rochas da SSC (Magalhães *et al.* 1994, Oliveira 2001, Lima *et al.* 2014, Carvalho 2017).

Além dessas três suítes, existem os granitos Seringa (Paiva Jr. *et al.* 2011, Teixeira *et al.* 2018), São João (Lima *et al.* 2014, Teixeira *et al.* 2018), Gradaús (Carvalho 2017) e Rio Branco (Santos *et al.* 2013) que fazem parte deste importante magmatismo anorogênico da Província Carajás, porém ainda não foram incluídos em nenhuma das três suítes e permanecem como granitos indiferenciados (Figura 5). Entretanto, dados petrográficos, geoquímicos, geocronológicos e de suscetibilidade magnética indicam maior afinidade desses quatro corpos com as rochas da Suíte Serra dos Carajás.

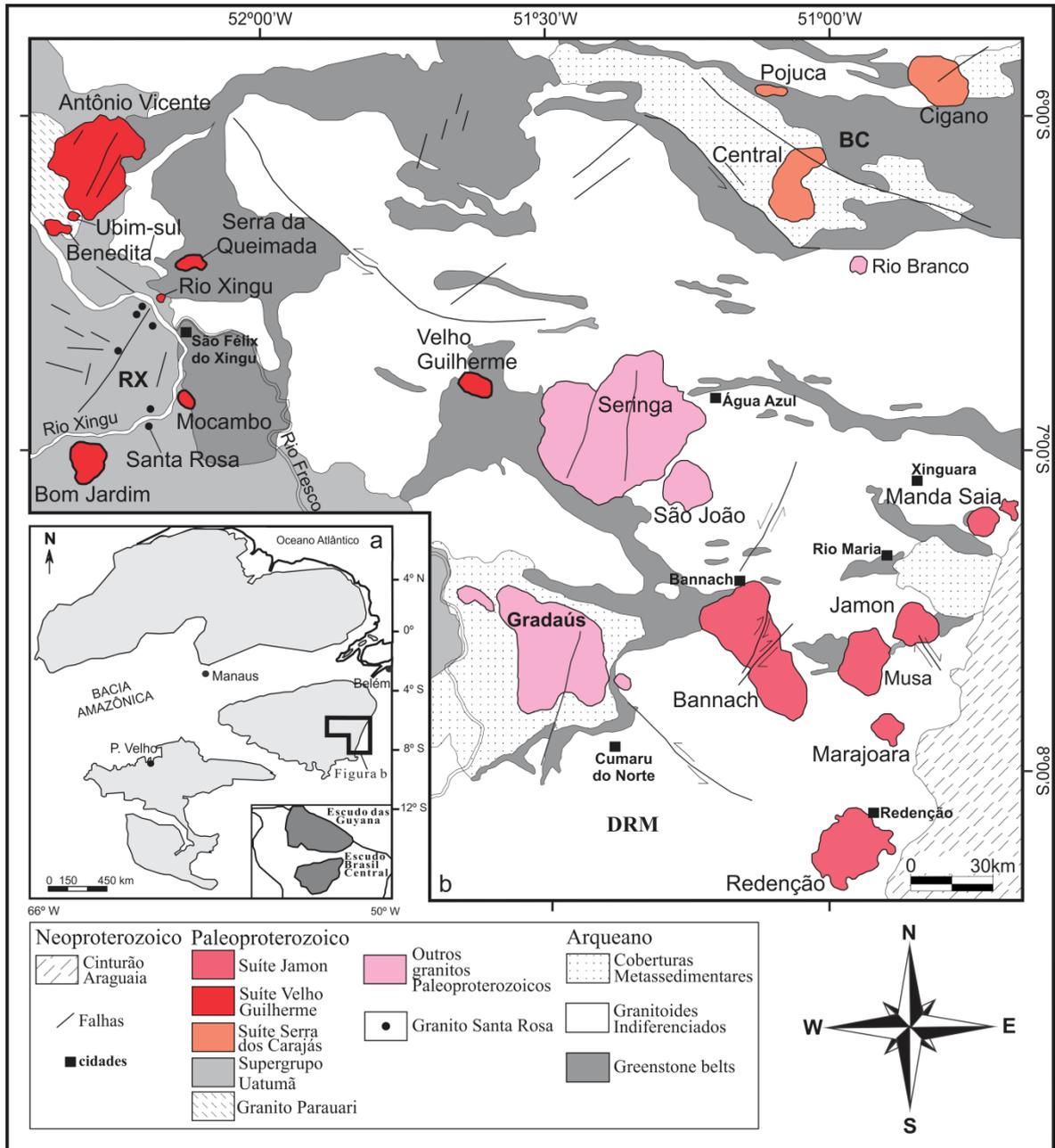


Figura 5 - (a) Esboço do Crátão Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição dos granitos paleoproterozoicos anorogênicos, com destaque para o Granito Gradaús. DRM=Domínio Rio Maria. BC=Bacia Carajás. RX=Região do Xingu. Fonte: Modificado de Dall'Agnol *et al.* (2005).

Tabela 2 - Dados geocronológicos de granitos tipo A paleoproterozoicos da Província Carajás.

Plúton	Método	Material Analisado	Idade (Ma)
Suíte Serra dos Carajás			
Cigano	U-Pb	Zircão	1883±2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1884±4 (11)
Central	U-Pb	Zircão	1880±2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1882±10 (11)
Pojuca	U-Pb	Zircão	1874±2 (1)
Suíte Jamon			
Jamon	Pb-Pb	Zircão	1885±32 (5)
	SHRIMP	Zircão	1870±18 (11)
Musa	U-Pb	Zircão	1883+5/-2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1871±4 (11)
	SHRIMP	Zircão	1876±13 (11)
	SHRIMP	Zircão	1882±4 (11)
	SHRIMP	Titanita	1883±31 (11)
	SHRIMP	Titanita	1892±14 (11)
	SHRIMP	Titanita	1878±9 (11)
Redenção	Pb-Pb	Rocha total	1870±68 (4)
	SHRIMP	Zircão	1865±6 (11)
	SHRIMP	Zircão	1871±5 (11)
Bannach	SHRIMP	Zircão	1874±6 (11)
Marajoara	Rb-Sr	Rocha total	1724±50 (2)
Suíte Velho Guilherme			
Velho Guilherme	Pb-Pb	Rocha total	1873±13 (3)
	SHRIMP	U-Pb	1882±6 (11)
Antonio Vicente	Pb-Pb	Zircão	1867±4 (6)
	SHRIMP	Zircão	1873±6.7 (11)
	SHRIMP	Zircão	1882±15 (11)
	SHRIMP	Zircão	1724±14 (11)
Mocambo	Pb-Pb	Zircão	1865±2 (6)
Rio Xingu	Pb-Pb	Zircão	1866±2 (6)
Serra da Queimada	Pb-Pb	Zircão	1882±12 (7)
Bom Jardim	Pb-Pb	Zircão	1884±4 (7)
Granitos Indiferenciados			
Seringa	Pb-Pb	Zircão	1895±1 (8)
	SHRIMP	Zircão	1880±7 (11)
	SHRIMP	Zircão	1875±6 (11)
	SHRIMP	Zircão	1889±8 (11)
São João	Pb-Pb	Zircão	1890±2 (9)
	SHRIMP	Zircão	1876±12 (11)
	SHRIMP	Zircão	1880±3 (11)
	SHRIMP	Zircão	1891±5 (11)
Gradaús	Pb-Pb	Zircão	1882±9 (10)

Fontes: (1) Machado *et al.* (1991), (2) Macambira (1992), (3) Rodrigues *et al.* (1992), (4) Barbosa *et al.* (1995), (5) Dall'Agnol *et al.* (1999b), (6) Teixeira (1999), (7) Pinho (2009), (8) Paiva Jr. *et al.* (2011), (9) Lima *et al.* (2014), (10) Abrantes Jr. (2011), (11) Teixeira *et al.* (2018)

1.5 GRANITO GRADAÚS: SÍNTESE DA GEOLOGIA, PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA

Informações geológicas, petrográficas, geoquímicas e de suscetibilidade magnética do Granito Gradaús estão disponíveis na dissertação de mestrado de Carvalho (2017). O Granito Gradaús está localizado a sudoeste da cidade de Bannach e a noroeste da cidade de Cumaru do Norte, Província Carajás (Figura 1). Apresenta forma subcircular e área em torno de 900 km². É constituído por um conjunto de morros e serras de encostas suaves (80 a 200 m de altura) alinhadas aproximadamente na direção N-S. É intrusivo em rochas sedimentares e metassedimentares das Formações Rio Naja (Grupo Rio Fresco) e Gorotire (Cunha *et al.* 1984). Sua porção centro-oeste, aproximadamente metade do corpo, se encontra dentro da reserva indígena Kayapó e permanece ainda sem estudos. Datações Pb-Pb em zircão forneceram idade de 1882±9 Ma, interpretada como idade de cristalização (Abrantes Jr. 2011).

O Granito Gradaús é formado por rochas monzograníticas a sienograníticas isotrópicas, hololeucocráticas, de granulação fina a média dominante, localmente grossa, e coloração rosa-acinzentada, que afloram na forma de lajedos e blocos métricos. Anfibólio e biotita, alterados em diferentes intensidades, são as fases máficas presentes, com a biotita sendo o máfico dominante. Ortoclásio pertítico e plagioclásio ocorrem intensamente alterados para argilominerais e sericita, respectivamente. Os acessórios são zircão, ilmenita, magnetita, allanita, apatita, além de fluorita nas rochas sienograníticas. Com base no conteúdo modal e análises texturais foram definidas quatro fácies petrográficas (Carvalho 2017): (1) Biotita-anfibólio-sienogranitos (BASG), representam as rochas menos evoluídas e ocupam uma pequena área na porção NW do corpo (Figura 6); (2) Biotita-monzogranitos (BMG), correspondem às rochas dominantes; apresentam granulação fina a média e textura hipidiomórfica equigranular; a biotita, máfico dominante, forma lamelas anédricas a subédricas intensamente corroídas e alteradas para clorita; (3) Biotita-sienogranito (BSG), afloram em uma grande área na porção centro-norte do granito; possuem granulação média, localmente fina, e textura hipidiomórfica equigranular; intercrescimentos granofírico, micrográfico e mirmequítico são comuns; (4) Biotita-monzogranito a sienogranito porfiríticos (BMGP-BSGP), ocorrem como pequenos afloramentos em diversas áreas do granito seccionando os BMG e BSG (Figura 6); são rochas mineralogicamente similares diferindo principalmente nos conteúdos de álcali feldspato e plagioclásio; cristais hipidiomórficos de quartzo e álcali-feldspato intensamente argilizados (≤ 7 mm) aparecem dispersos em matriz felsítica fina.

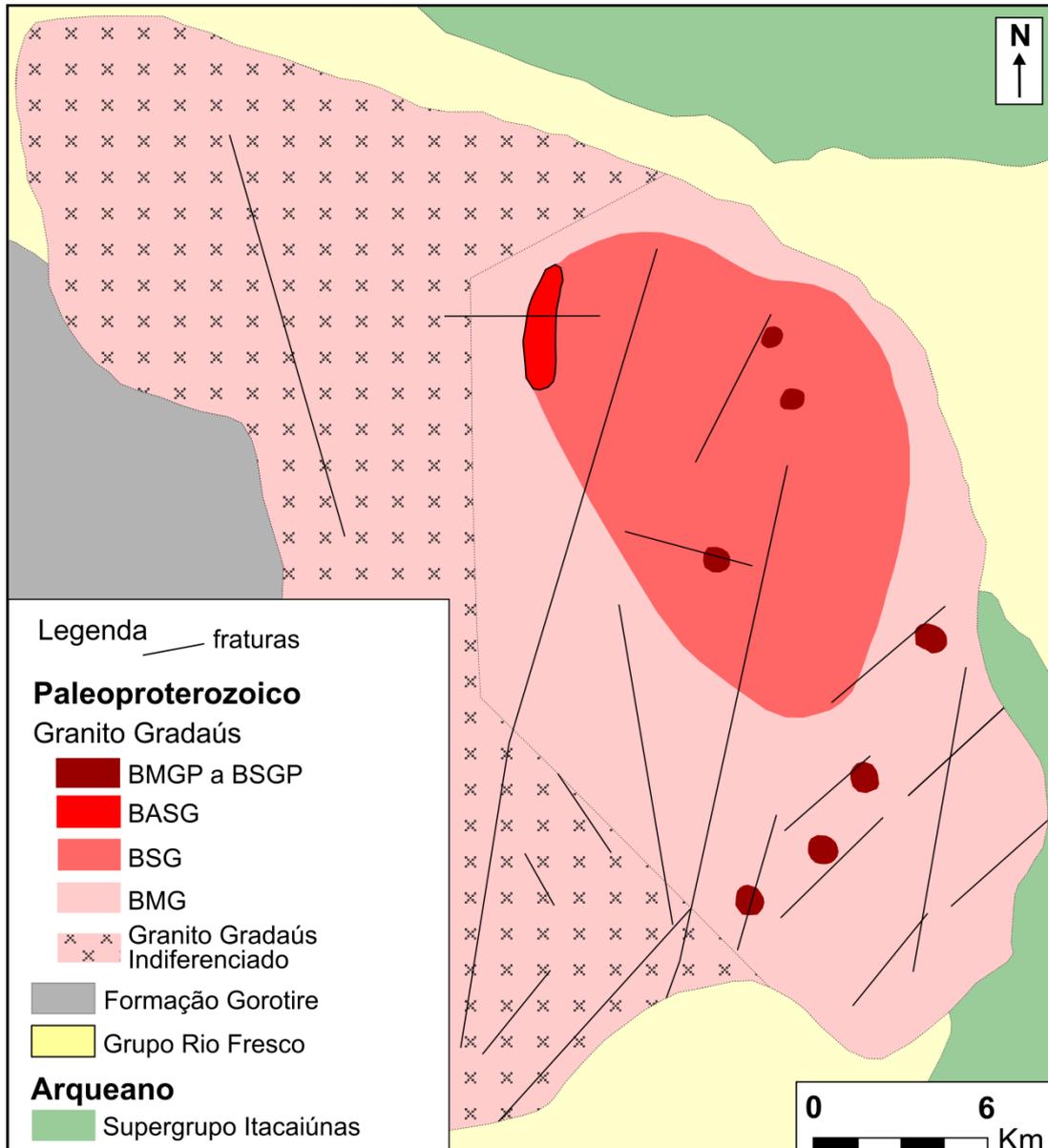


Figura 6 - Mapa geológico do Granito Gradaús com a distribuição das diferentes fácies. A área do Granito Gradaús indiferenciado está dentro da reserva indígena Kayapó. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; BASG=biotita-anfibólio-sienogranito; BMGP a BSGP=biotita-monzogranito a sienogranito porfirítico. Fonte: Compilado de Carvalho (2017).

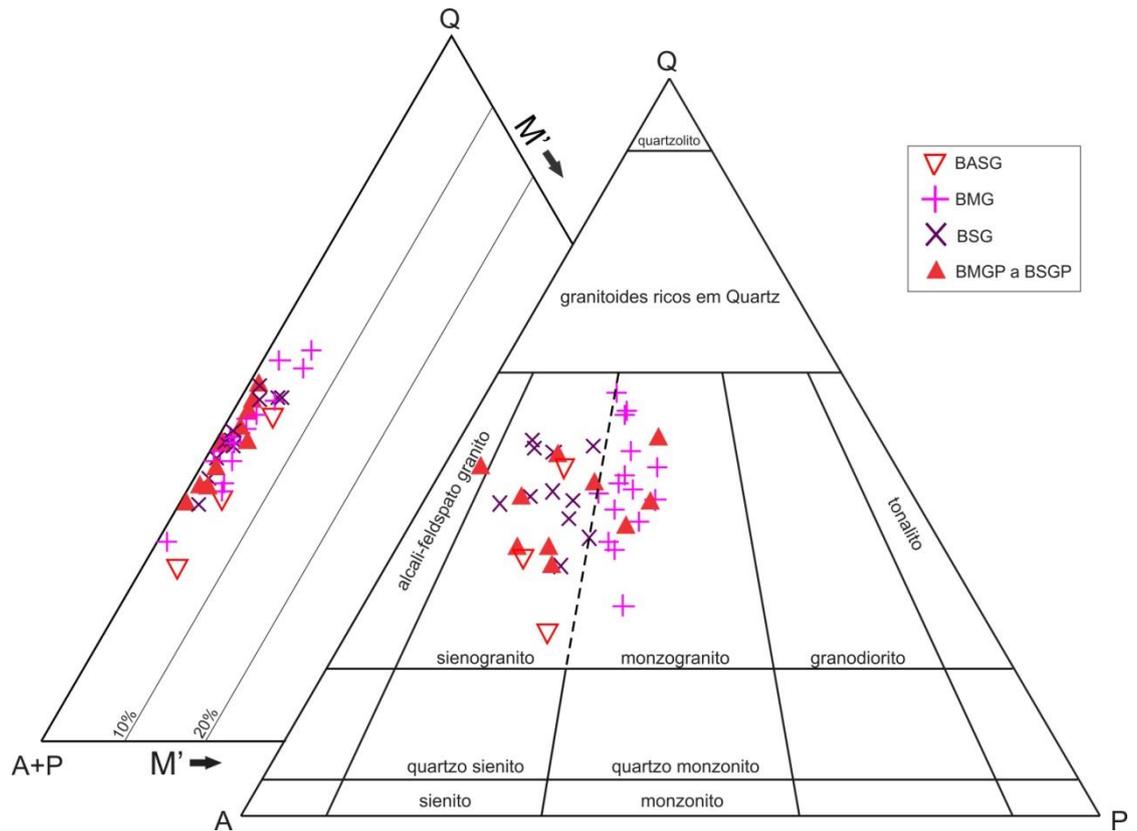


Figura 7 - Diagramas Q-A-P e Q-A-P-M (Streckeisen 1976) com a distribuição das rochas do Granito Gradaús. Legenda conforme Figura 6. Fonte: Compilado de Carvalho (2017).

Geoquimicamente as rochas do Granito Gradaús apresentam conteúdos elevados de SiO_2 (76,1-86,4%), $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (7,5-8,9%), $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (0,95-1,0), Rb (176-369 ppm), Zr (131-714 ppm), Nb (8,9-24,6 ppm), Y (34,8-105,0 ppm), Ga (19,0-26,6 ppm) e ETR (exceto Eu), e baixos de CaO (0,34-0,89%), Al_2O_3 (11,30-12,90%), MgO (0,03-0,12%), TiO_2 (0,09-0,24%) e Sr (7,30-102,50%). São rochas predominantemente peraluminosas a fracamente metaluminosas, se assemelhando a granitos intraplaca tipo A (Pearce *et al.* 1984; Whalen *et al.* 1987; Eby 1992). No diagrama $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$ vs $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ de Dall'Agnol & Oliveira (2007), plotam no campo dos granitos tipo A reduzidos (Figura 8).

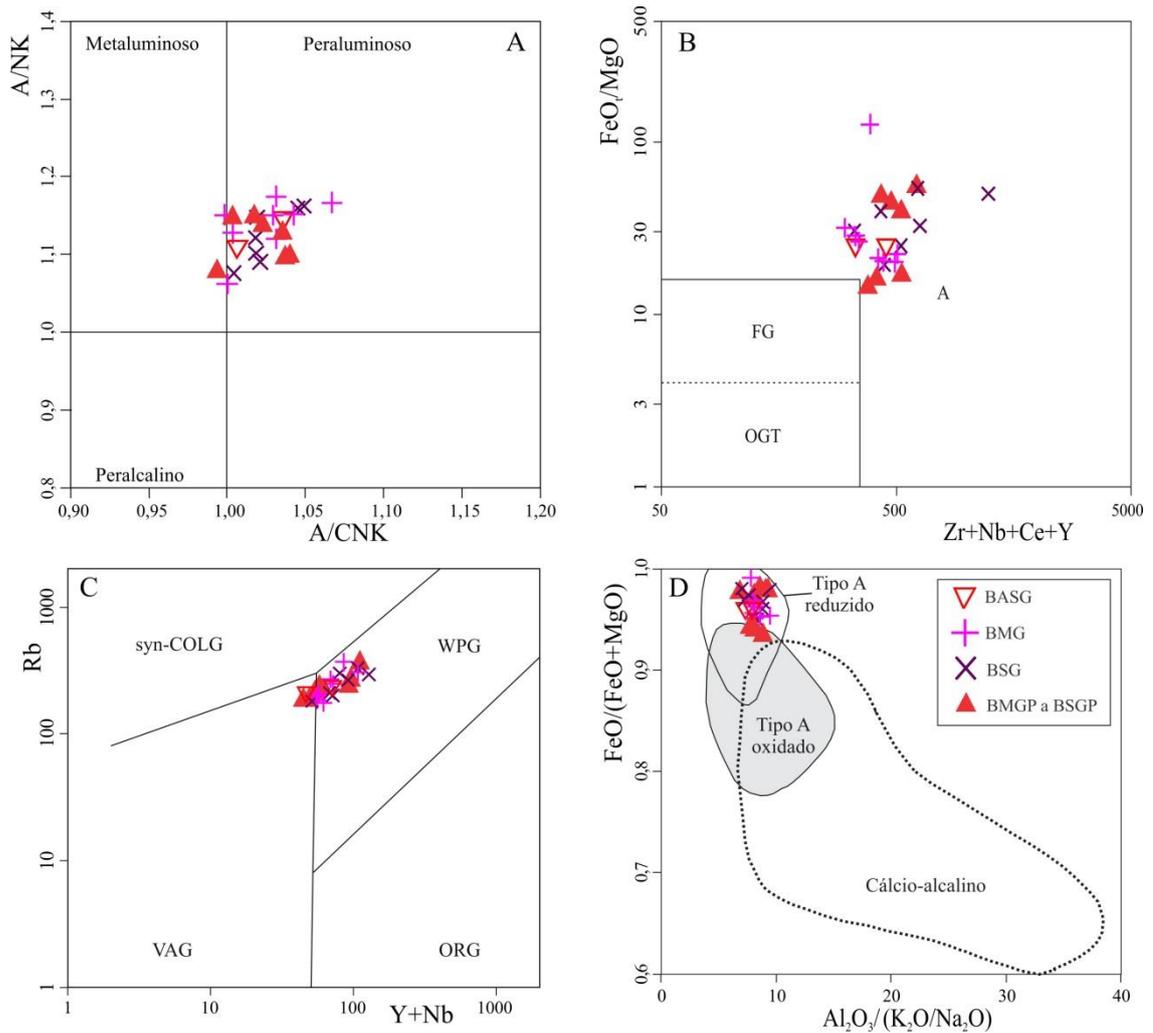


Figura 8 - Diagramas geoquímicos para as rochas do Granito Gradaús. A) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ mol vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ mol (Shand 1951). B) $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ ppm vs FeO/MgO (Whalen *et al.* 1987); campos para granitos félsicos fracionados (FG) e não fracionados tipo M, I, e S (OGT). C) $\text{Y}+\text{Nb}$ vs Rb ppm (Pearce *et al.* 1984); syn-COLG=granitos sin-colisionais; WPG=granitos intraplacas; VAG=granitos de arcos vulcânicos; ORG=granitos de cadeias oceânicas. D) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ vs $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (Dall'Agnol & Oliveira 2007). Legenda conforme Figura 6. Fonte: Diagramas compilados de Carvalho (2017).

1.6 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Dall'Agnol *et al.* (2005) inseriram preliminarmente os granitos São João, Seringa e Gradaús na SJ. Os granitos Seringa (Paiva Jr. *et al.* 2011) e São João (Lima *et al.* 2014) mostraram, entretanto, maiores afinidades com as rochas da SSC, tanto em termos petrográficos, de suscetibilidade magnética quanto geoquímicos.

O Granito Gradaús foi estudado preliminarmente em termos geológicos, petrográficos e geocronológicos por Abrantes Jr. & Lamarão (2011). Carvalho (2017) desenvolveu estudos

geológicos, petrográficos, geoquímicos e de SM detalhados nas diferentes fácies deste corpo, confirmando as maiores similaridades dele com os granitos que formam a SSC.

Apesar dos avanços no conhecimento geológico, petrográfico e geoquímico do Granito Gradaús, estudos de química mineral em minerais como anfibólio (Blundy & Holland 1990; Frost 1991; Anderson & Smith 1995), biotita (Foster 1960, Wones & Eugster 1965, Nachit 1986, Nachit *et al.* 2005, Abdel-Rahman 1994) e zircão (Belousova *et al.* 2002, Lamarão *et al.* 2007, 2012, 2014) podem contribuir para o melhor entendimento da evolução e metalogênese deste importante corpo magmático, mas ainda não foram realizados. Tal fato impede um estudo comparativo mais preciso deste com outros granitos anorogênicos paleoproterozoicos do Cráton Amazônico.

1.7 OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo contribuir para o avanço do conhecimento geológico do Granito Gradaús através de estudos de química mineral de anfibólio e biotita que possam contribuir para inseri-lo em uma das três suítes graníticas existentes. Como objetivos específicos têm-se:

- Determinar as composições químicas quantitativas de anfibólio e biotita presentes nas diferentes fácies do Granito Gradaús;
- Classificar esses minerais em diagramas geoquímicos específicos (cf. Nockolds 1947, Foster 1960, Nachit *et al.* 1985, 2005, Nachit 1986, Deer *et al.* 1992, Abdel-Rahman 1994, Abdel-Fattah & Abdel-Rahman 1996, Anderson & Smith 1995, Leake *et al.* 1997, 2003);
- Estimar a fugacidade de oxigênio atuante durante a cristalização do Granito Gradaús com base no conteúdo de Al^{IV} e da razão Fe/Mg dos anfibólios (cf. Anderson & Smith 1995) e nos conteúdos de Fe^{2+} , Fe^{3+} e Mg das biotitas (cf. Wones & Eugster 1965);
- Estimar a pressão de cristalização do Granito Gradaús com base no conteúdo de Al_I e da razão Fe/Mg de seus anfibólios (cf. Anderson & Smith 1995);
- Avaliar o grau de equilíbrio químico entre anfibólios e biotitas durante a cristalização do Granito Gradaús com base nas razões Fe/Mg desses minerais;

- Avaliar o estado de oxidação-redução do magma que deu origem ao Granito Gradaús, bem como a natureza de seu granito hospedeiro (tipologia) com base na composição de suas biotitas (cf. Cerny & Burt 1984, Speer 1984, Nachit *et al.* 1985, 2005, Abdel-Rahman 1994);
- Comparar os dados obtidos com os de outros granitos paleoproterozoicos que integram as suítes Jamon, Velho Guilherme e Serra dos Carajás.

1.8 MATERIAIS E MÉTODOS

1.8.1 Pesquisa Bibliográfica

Consistiu no levantamento bibliográfico referente à geologia da região enfocada neste estudo, à evolução e origem de granitos anorogênicos paleoproterozoicos, em particular os da região do DRM. Esta etapa foi continuamente atualizada à medida que novos dados foram publicados. Foram consultados, ainda, artigos e livros sobre microsonda eletrônica (p. ex. Friel 2003, Reed 1996), além de estudos envolvendo química mineral de anfibólio (p. ex. Anderson & Smith 1995, Leake *et al.* 1997, 2003) e biotita (p. ex. Nachit *et al.* 1985, 2005, Deer *et al.* 1992, Abdel-Rahman 1994, Abdel-Fattah & Abdel-Rahman 1996).

1.8.2 Estudo Petrográfico

Nesta etapa realizou-se uma revisão macroscópica das amostras, seguida de uma revisão em microscópio petrográfico por luz transmitida, envolvendo identificação de minerais (Kerr 1959, Deer *et al.* 1992), descrição sistemática, estudo de texturas (Bard 1980, Mackenzie *et al.* 1982, Hibbard 1995), análise da ordem de cristalização dos minerais (Dall'Agnol 1982, Hibbard 1995, Oliveira 2001) e classificação das rochas conforme estabelecido pela IUGS (Streckeisen 1976, Le Maitre *et al.* 2002). O trabalho não contou com viagem de campo, haja vista que as amostras e lâminas polidas necessárias se encontravam no acervo do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG-IG-UFGA).

1.8.3 Química Mineral

1.8.3.1 Microsonda Eletrônica

Foi utilizada uma microsonda eletrônica JEOL, modelo JXA-8230, do Laboratório de Microanálises do IG-UFGA, sob as seguintes condições de operação: voltagem de aceleração 15 kV, corrente elétrica 20 nA, diâmetro do feixe 10µm. O tempo de análise foi de 20s ou 40s, a depender do mineral e elementos analisados. O efeito de matriz foi corrigido pelo método ZAF (Armstrong 1988). Os cristais usados nas análises foram TAP para Si, Al, Mg e Na; PETJ para Cr, Ca, K, Sr; LIF para Ni, Fe, Mn, Ba e Ti; PETH para Cl e V; e LDE1 para F. Os padrões utilizados para os diferentes elementos foram: ortoclásio (Si e K), anortita (Al), wollastonita (Ca), Fe₃O₄ (Fe), diopsídio (Mg), sodalita (Na e Cl), rutilo (Ti), rodonita (Mn), vanádio (V), Cr₂O₃ (Cr), biotita (F). Os dados obtidos foram tratados em planilhas do Excel e os diagramas geoquímicos no programa GCDkit 4.3 (Janoušek *et al.* 2006) e editados no CorelDrawX5.

As análises de WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) de anfibólios e biotitas foram realizadas em nove lâminas polidas representativas das quatro fácies do Granito Gradaús, totalizando 266 análises, sendo: 81 de anfibólios dos BASG, 40 de biotitas dos BMG, 36 dos BSG, 98 dos BMGP-BSGP e 11 análises de biotitas provenientes da alteração dos anfibólios dos BASG (Tabela 3). Todas as lâminas polidas foram recobertas por carbono (*carbon-coated*).

Tabela 3 - Relação das lâminas polidas do Granito Gradaús utilizadas para análises de microsonda eletrônica.

Lâmina	Fácies	Mineral analisado	Cristais analisados	Nº análises
TL-19	BASG	Anfibólio	10	49
TL-21	BASG	Anfibólio	5	32
		Biotita	2	11
FC-13	BMG	Biotita	6	31
FC-18	BMG	Biotita	2	9
FC-14	BSG	Biotita	6	25
FC-10	BSG	Biotita	3	11
FC-05	PBMG	Biotita	12	50
TL-29	PBMG	Biotita	5	20
TL-16A	PBSG	Biotita	6	28

CAPÍTULO 2

2.1 INTRODUÇÃO E LOCALIZAÇÃO

Nos domínios da Província Geocronológica Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004) ou Carajás (Santos *et al.* 2000), Cráton Amazônico, afloram granitos anorogênicos paleoproterozoicos, com dimensões variando de batolíticas a pequenos *stocks* e intrusivos em rochas do embasamento arqueano. Com base em estudos petrográficos, geoquímicos, de química mineral, geocronológicos e de suscetibilidade magnética, Dall’Agnol *et al.* (2005) enquadraram esses granitos em três grandes suítes (Figura 1): (1) **Suíte Jamon**, de caráter predominantemente oxidado e similar aos granitos da série magnetita (Ishihara 1981), aflora na porção sudeste do Cráton Amazônico e é formada pelos plútons Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999), Musa (Gastal 1987), Redenção (Oliveira *et al.* 2008, 2009, 2010), Bannach (Almeida *et al.* 2006, Mesquita 2018), Marajoara (Rocha Jr. *et al.* 2004, Santos 2017) e Manda Saia (Leite 2001). (2) **Suíte Intrusiva Velho Guilherme**, formada em condições redutoras, contém mineralizações de Sn-W e é similar aos granitos da série ilmenita (Ishihara 1981); ocorre predominantemente na região do Xingu, porção noroeste do Cráton Amazônico; é constituída pelos granitos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Benedita, Serra da Queimada, Ubim/Sul e Bom Jardim (Abreu & Ramos 1974, Dall’Agnol *et al.* 1993, Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2002, 2005; Lamarão *et al.* 2012, Melo & Lamarão 2017). (3) **Suíte Serra dos Carajás**, de caráter intermediário às anteriores, localiza-se nos domínios da Bacia Carajás e é representada pelos granitos Cigano, Pojuca e Central (Barros *et al.* 1995, Javier Rios *et al.* 1995a, b, Villas 1999).

Além dessas três suítes, existem os granitos Seringa (Paiva Jr. *et al.* 2011, Teixeira *et al.* 2018), São João (Lima *et al.* 2014, Teixeira *et al.* 2018), Gradaús (Carvalho 2017) e Rio Branco (Santos *et al.* 2013) que fazem parte deste importante magmatismo anorogênico da Província Carajás, porém ainda não foram incluídos em nenhuma das três suítes e permanecem como granitos indiferenciados (Figura 1; Tabela 1). Entretanto, dados petrográficos, geoquímicos, geocronológicos e de suscetibilidade magnética indicam maior afinidade desses quatro corpos com as rochas da Suíte Serra dos Carajás.

A química mineral é uma ferramenta muito utilizada em estudos de tipologia de granitos (Foster 1960, Wones & Eugster 1965, Nachit *et al.* 1985, 2005, Deer *et al.* 1992, Abdel-Rahman 1994, Abdel-Fattah & Abdel-Rahman 1996, Lamarão & Dall’Agnol 2004, Cunha *et al.* 2016, Gao *et al.* 2016, Mesquita 2018) e para estimar parâmetros de cristalização

de magmas granitoides (Wones & Eugster 1965, Hammarstron & Zen 1986, Hollister *et al.* 1987, Schmidt 1992, Anderson & Smith 1995, Dall'Agnol *et al.* 1999b, 1999c, 2005, 2017, Lamarão & Dall'Agnol 2004, Anderson *et al.* 2008, Ridolfi *et al.* 2010, Erdmann *et al.* 2014, Papoutsas & Pe-Piper 2014, Cunha *et al.* 2016, Mutch *et al.* 2016, Mesquita 2018).

Na Província Carajás (Figuras 5), estudos de química mineral nos granitos anorogênicos estão restritos aos corpos Jamon e Bannach (Suíte Jamon), Antônio Vicente (Suíte Velho Guilherme) e Cigano (Suíte Serra dos Carajás); os demais granitos anorogênicos ainda carecem deste tipo de estudo.

Neste trabalho são descritos e interpretados os dados de química mineral de anfibólios e biotitas obtidos por microsonda eletrônica nas diferentes fácies do Granito Gradaús, com o objetivo de determinar suas composições e estimar os parâmetros de cristalização (P, T, fO_2) reinantes durante a cristalização deste corpo. É feito, ainda, um estudo comparativo com outros granitos anorogênicos da Província Carajás e de outros crátons. Pretende-se, portanto, contribuir para o avanço da caracterização mineralógica deste plúton e do magmatismo anorogênico do Cráton Amazônico.

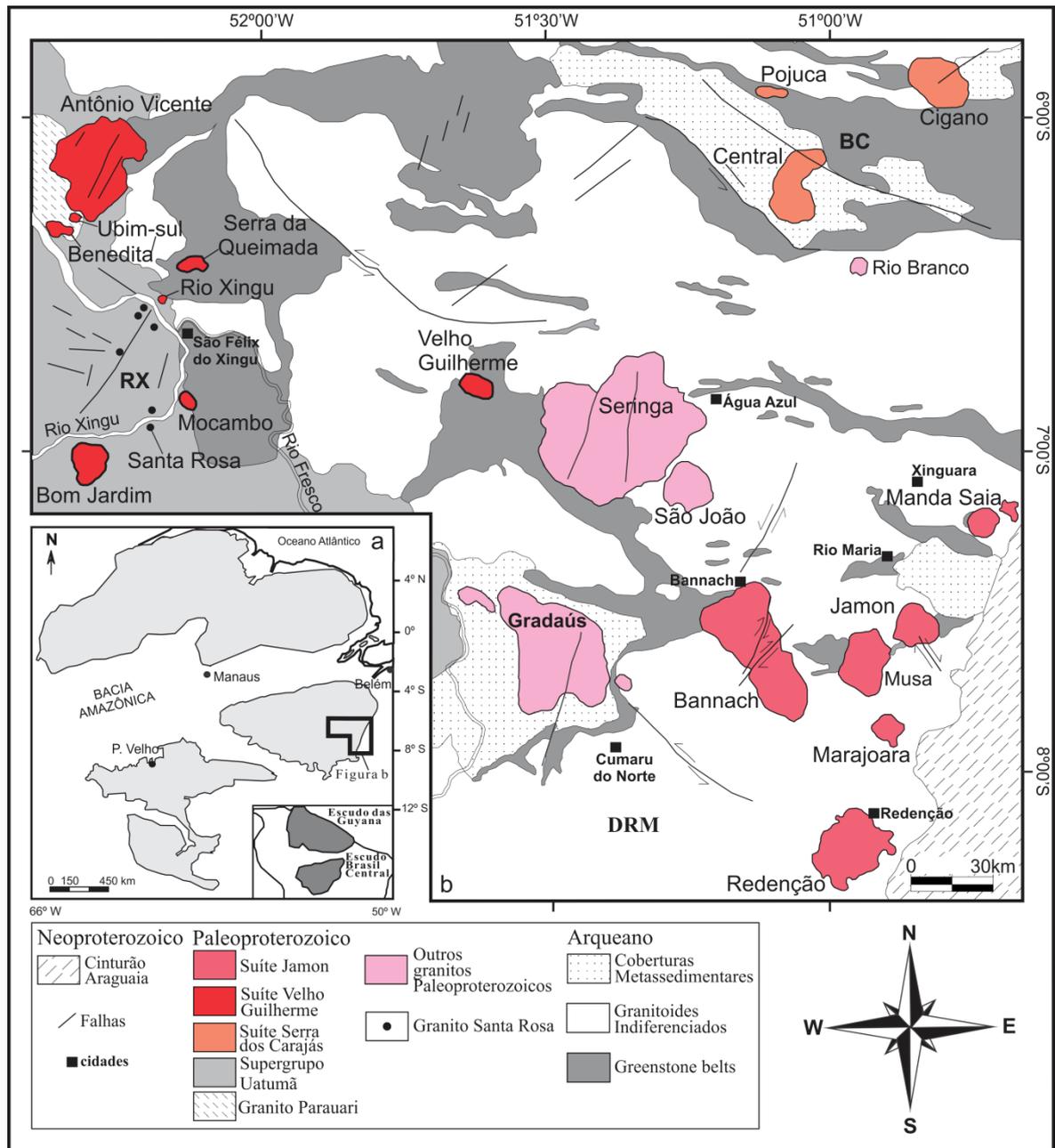


Figura 1 - Esboço do Cráton Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição dos granitos paleoproterozoicos anorogênicos, com destaque para o Granito Gradaús. DRM=Domínio Rio Maria. BC=Bacia. . RX=Região do Xingu. Fonte: Modificado de Dall'Agnol *et al.* (2005).

Tabela 1 - Dados geocronológicos de granitos tipo A paleoproterozoicos da Província Carajás.

Plúton	Método	Material Analisado	Idade (Ma)
Suíte Serra dos Carajás			
Cigano	U-Pb	Zircão	1883±2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1884±4 (11)
Central	U-Pb	Zircão	1880±2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1882±10 (11)
Pojuca	U-Pb	Zircão	1874±2 (1)
Suíte Jamon			
Jamon	Pb-Pb	Zircão	1885±32 (5)
	SHRIMP	Zircão	1870±18 (11)
Musa	U-Pb	Zircão	1883+5/-2 (1)
	SHRIMP	Zircão	1871±4 (11)
	SHRIMP	Zircão	1876±13 (11)
	SHRIMP	Zircão	1882±4 (11)
	SHRIMP	Titanita	1883±31 (11)
	SHRIMP	Titanita	1892±14 (11)
	SHRIMP	Titanita	1878±9 (11)
Redenção	Pb-Pb	Rocha total	1870±68 (4)
	SHRIMP	Zircão	1865±6 (11)
	SHRIMP	Zircão	1871±5 (11)
Bannach	SHRIMP	Zircão	1874±6 (11)
Marajoara	Rb-Sr	Rocha total	1724±50 (2)
Suíte Velho Guilherme			
Velho Guilherme	Pb-Pb	Rocha total	1873±13 (3)
	SHRIMP	U-Pb	1882±6 (11)
Antonio Vicente	Pb-Pb	Zircão	1867±4 (6)
	SHRIMP	Zircão	1873±6.7 (11)
	SHRIMP	Zircão	1882±15 (11)
	SHRIMP	Zircão	1724±14 (11)
Mocambo	Pb-Pb	Zircão	1865±2 (6)
Rio Xingu	Pb-Pb	Zircão	1866±2 (6)
Serra da Queimada	Pb-Pb	Zircão	1882±12 (7)
Bom Jardim	Pb-Pb	Zircão	1884±4 (7)
Granitos Indiferenciados			
Seringa	Pb-Pb	Zircão	1895±1 (8)
	SHRIMP	Zircão	1880±7 (11)
	SHRIMP	Zircão	1875±6 (11)
	SHRIMP	Zircão	1889±8 (11)
São João	Pb-Pb	Zircão	1890±2 (9)
	SHRIMP	Zircão	1876±12 (11)
	SHRIMP	Zircão	1880±3 (11)
	SHRIMP	Zircão	1891±5 (11)
Gradaús	Pb-Pb	Zircão	1882±9 (10)

Fontes: (1) Machado *et al.* (1991), (2) Macambira (1992), (3) Rodrigues *et al.* (1992), (4) Barbosa *et al.* (1995), (5) Dall'Agnol *et al.* (1999b), (6) Teixeira (1999), (7) Pinho (2009), (8) Paiva Jr. *et al.* (2011), (9) Lima *et al.* (2014), (10) Abrantes Jr. (2011), (11) Teixeira *et al.* (2018).

3. GEOLOGIA REGIONAL

A Província Carajás, principal e mais bem preservado núcleo arqueano do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), faz parte da Província Geocronológica Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999, 2004) ou é considerada como uma província geocronológica independente (Santos *et al.* 2006). Souza *et al.* (1996) subdividiram a Província Carajás em Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (TGGRM) a sul, e Bloco Carajás a norte. O primeiro compreenderia as rochas mais antigas e de características ígneas bem preservadas, enquanto a porção norte manteria um embasamento mesoarqueano, afetado por eventos tectonotermiais de idade neoarqueana, representado por uma vasta sequência vulcanossedimentar e intrusões granitoides sintectônicas. Posteriormente, Dall’Agnol *et al.* (2006) interpretaram o segmento de crosta situado entre o TGGRM e a Bacia Carajás como uma extensão do TGGRM afetado pelos eventos neoarqueanos que deram origem à Bacia Carajás, passando a chamá-lo de Domínio de Transição. Vasquez *et al.* (2008), em revisão à geologia do Estado do Pará e seguindo a proposta de Santos (2003), dividiram a Província Carajás em dois domínios tectônicos distintos: Domínio Rio Maria, de idade mesoarqueana (3,0-2,87 Ga) a sul, e Domínio Carajás, formado por rochas meso e neoarqueanas (3,0-2,76 Ga) a norte. Essa nova configuração fez com que Feio & Dall’Agnol (2012) redefiniram o Domínio de Transição como Subdomínio de Transição (Figura 2). Em uma nova reinterpretação da região situada entre a Bacia Carajás, a norte, e o Domínio Rio Maria, a sul, Dall’Agnol *et al.* (2013) propuseram a criação dos domínios Canaã dos Carajás, localizado mais a oeste, e Sapucaia, mais a leste. Esses dois domínios são limitados por grandes discontinuidades regionais de direção E-W e apresentam diferenças significativas em sua evolução geológica.

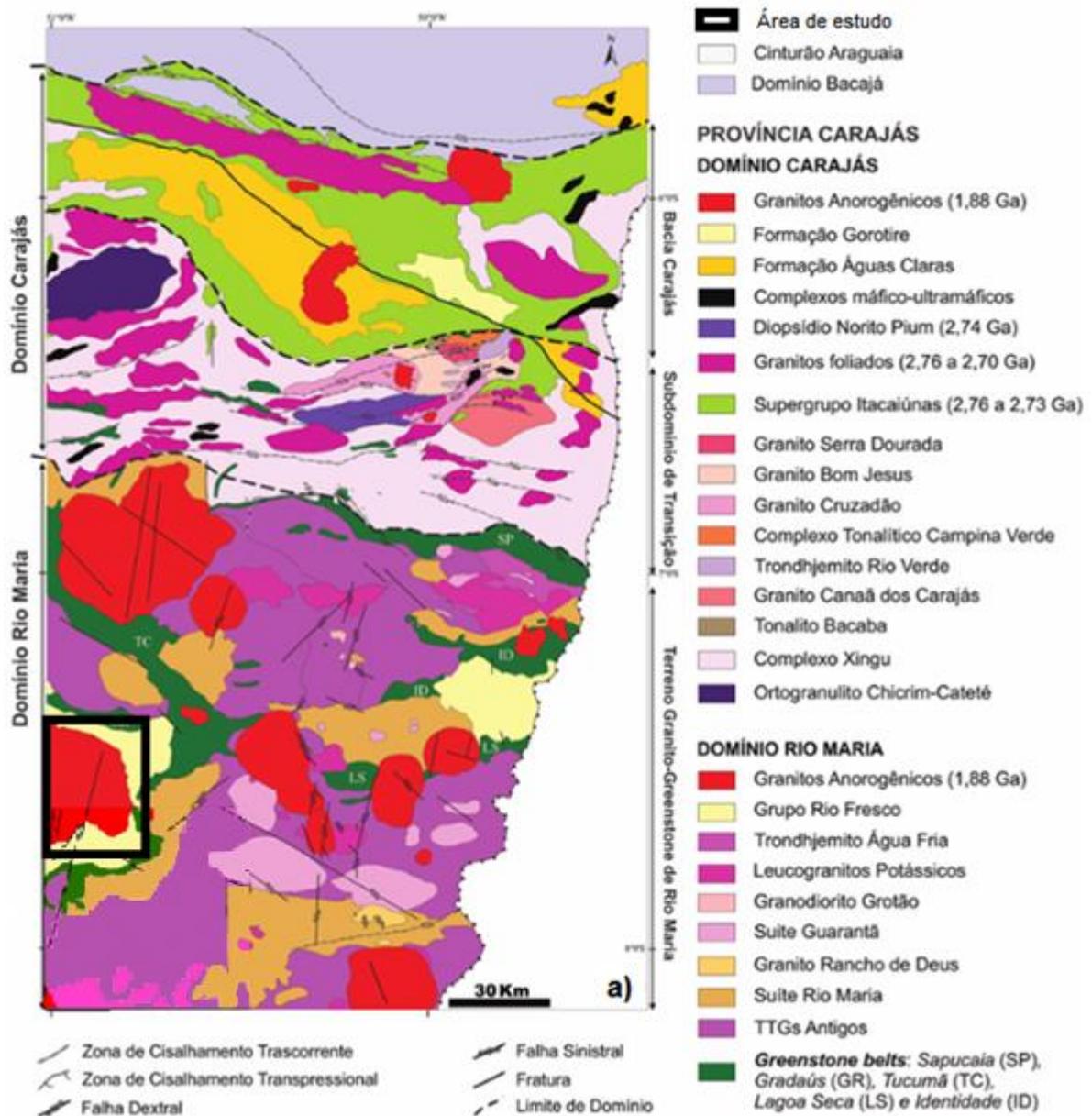


Figura 2 - Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de ocorrência do Granito Gradaús. Fontes: Modificado de Vasquez *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2010a), Feio *et al.* (2013), Guimarães *et al.* (2012), Santos *et al.* (2012), Santos & Oliveira (2012) e Gabriel (2012).

3.1 DOMÍNIO RIO MARIA

O Domínio Rio Maria 41 (Vasquez *et al.* 2008, 2017, Dall’Agnol *et al.* 2013) é caracterizado pela ocorrência de *greenstone-belts*, sequências de rochas TTG (Guimarães *et al.* 2010; Almeida *et al.* 2011), granitoides com alto Mg, Cr e Ni inseridos na Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.* 2009, 2010, Santos & Oliveira 2015), leucogranodioritos-granitos com alto Ba-Sr (Suíte Guarantã e correlatos; Almeida *et al.* 2010, Santos & Oliveira 2012) e leucogranitos potássicos (Xinguara e Mata-Surrão; Leite *et al.* 1999, 2004, Almeida *et al.* 2013) de idades arqueanas, cobertos por metassedimentos arqueanos do Grupo Rio Fresco.

O extenso magmatismo granítico anorogênico que afetou o Cráton Amazônico durante o Paleoproterozoico secciona todas as unidades arqueanas anteriores. Tais granitos foram agrupados nas suítes Jamon, Serra dos Carajás e Velho Guilherme, compostas por batólitos e stocks graníticos com idades entre 1,88 e 1,86 Ga (Machado *et al.* 1991, Barbosa *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 1999, 2005, Teixeira *et al.* 2002, Oliveira *et al.* 2005, 2009, Almeida *et al.* 2006, Pinho *et al.* 2006, Lamarão *et al.* 2012, Teixeira *et al.* 2018). São granitos isotrópicos, com contatos bruscos e enclaves das rochas encaixantes arqueanas. De modo geral, os contrastes entre as suítes são ocasionados provavelmente pela natureza distinta de suas fontes, bem como pela temperatura de fusão, conteúdo de água e fugacidade de oxigênio dos seus respectivos magmas (Dall’Agnol *et al.* 1994, 1999c, 2005).

4. GRANITO GRADAÚS

4.1 SÍNTESE DA GEOLOGIA, PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA

Informações geológicas, petrográficas, geoquímicas e de suscetibilidade magnética do Granito Gradaús podem ser encontradas na dissertação de mestrado de Carvalho (2017). O Granito Gradaús está localizado a sudoeste da cidade de Bannach e a noroeste da cidade de Cumaru do Norte, Província Carajás (Figura 1). Apresenta forma subcircular e área em torno de 900 km². É constituído por um conjunto de morros e serras de encostas com alturas entre 80 e 200m alinhadas aproximadamente na direção N-S. É intrusivo em rochas sedimentares e metassedimentares das Formações Rio Naja (Grupo Rio Fresco) e Gorotire (Cunha *et al.* 1984). Sua porção centro-oeste, aproximadamente metade do corpo, se encontra dentro da reserva indígena Kayapó (Figura 3) e permanece ainda sem estudos. Datações Pb-Pb em zircão forneceram idade de 1882±9 Ma, interpretada como sua idade de cristalização (Abrantes Jr & Lamarão 2011).

O Granito Gradaús é formado por rochas monzograníticas a sienograníticas isotrópicas, hololeucocráticas, de granulação fina a média dominante, localmente grossa, e coloração rosa-acinzentada, que afloram na forma de lajedos e blocos métricos. Anfibólio e biotita, alterados em diferentes intensidades, são as fases máficas presentes, com a biotita sendo o máfico dominante. Ortoclásio pertítico e plagioclásio ocorrem intensamente alterados para argilominerais e sericita, respectivamente. Os acessórios são zircão, ilmenita, magnetita, apatita e allanita, além de fluorita nas rochas sienograníticas. Com base no conteúdo modal e análises texturais foram definidas quatro fácies petrográficas (Carvalho 2017): (1) Biotita-anfibólio-sienogranitos (BASG), representam as rochas menos evoluídas e ocupam uma pequena área na porção NW do corpo (Figura 3); (2) Biotita-monzogranitos (BMG), correspondem às rochas dominantes; apresentam granulação fina a média e textura hipidiomórfica equigranular; a biotita, máfico dominante, forma lamelas anédricas a subédricas intensamente corroídas e alteradas para clorita; (3) Biotita-sienogranito (BSG), afloram em uma grande área na porção centro-norte do granito; possuem granulação média, localmente fina, e textura hipidiomórfica equigranular; intercrescimentos granofírico, micrográfico e mirmequítico são comuns; (4) Biotita-monzogranito a sienogranito porfiríticos (BMGP-BSGP), ocorrem como pequenos afloramentos em diversas áreas do granito seccionando os BMG e BSG (Figura 3); são rochas mineralogicamente similares diferindo principalmente nos conteúdos de álcali feldspato e plagioclásio; cristais hipidiomórficos de

quartzo e álcali-feldspato intensamente argilizados (≤ 7 mm) aparecem dispersos em matriz felsítica fina. A Figura (4) mostra a distribuição das rochas do Granito Gradaús nos diagramas QAP e Q-A+P-M.

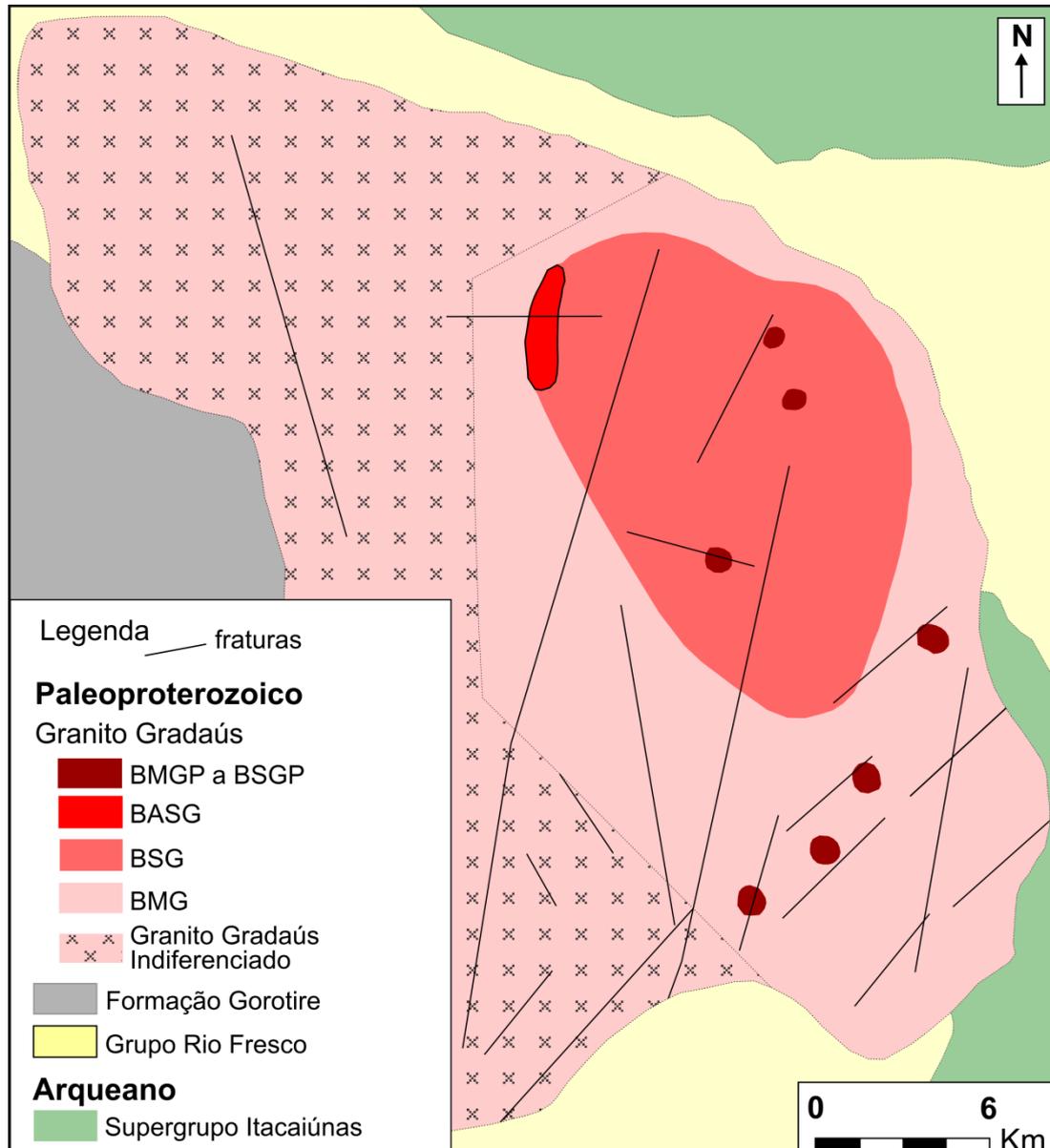


Figura 3 - Mapa geológico do Granito Gradaús com a distribuição das diferentes fácies. A área do Granito Gradaús indiferenciado está dentro da reserva indígena Kayapó. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; BASG=biotita-anfibólio-sienogranito; BMGP a BSGP=biotita-monzogranito a sienogranito porfíricos. Fonte: Compilado de Carvalho (2017).

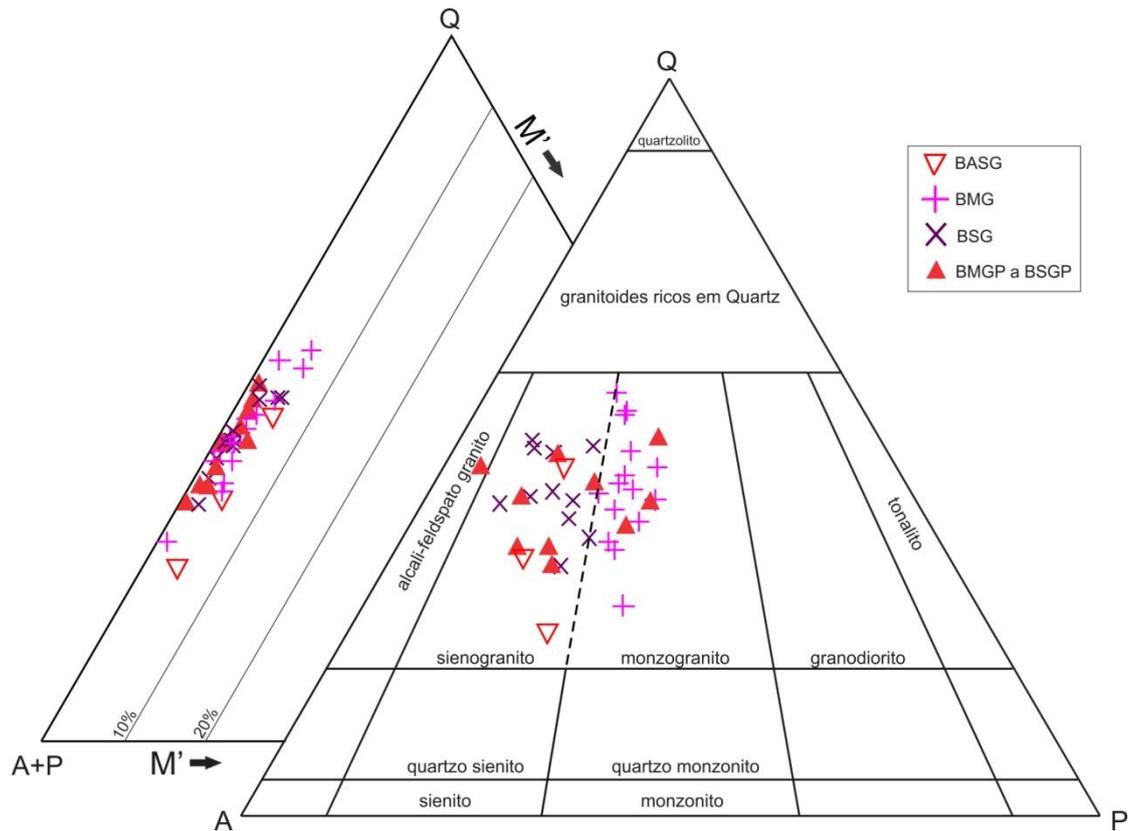


Figura 4 - Diagramas Q-A-P e Q-A-P-M (Streckeisen 1976) com a distribuição das rochas do Granito Gradaús. Legenda conforme Figura 3. Fonte: Compilado de Carvalho (2017).

Geoquimicamente as rochas do Granito Gradaús apresentam conteúdos elevados de SiO_2 (76,1-86,4%), $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (7,5-8,9%), $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (0,95-1,0), Rb (176-369 ppm), Zr (131-714 ppm), Nb (8,9-24,6 ppm), Y (34,8-105,0 ppm), Ga (19,0-26,6 ppm) e ETR (exceto Eu), e baixos de CaO (0,34-0,89%), Al_2O_3 (11,30-12,90%), MgO (0,03-0,12%), TiO_2 (0,09-0,24%) e Sr (7,30-102,50%). São rochas predominantemente peraluminosas a fracamente metaluminosas, se assemelhando a granitos intraplaca tipo A (Pearce *et al.* 1984, Whalen *et al.* 1987, Eby 1992). No diagrama $\text{FeO}_t/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$ vs $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ de Dall'Agnol & Oliveira (2007), plotam no campo dos granitos tipo A reduzidos (Figura 5).

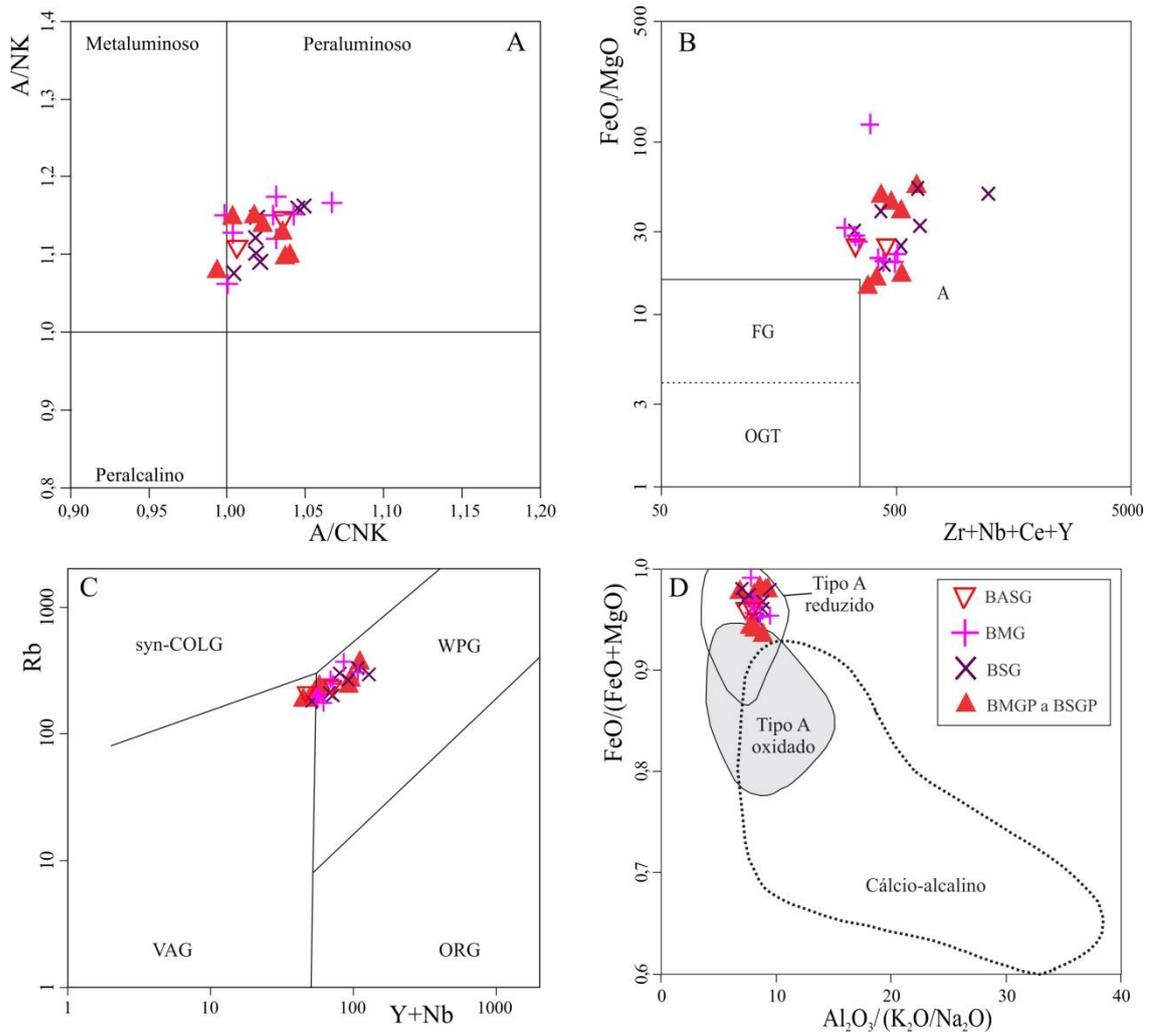


Figura 5 - Diagramas geoquímicos para as rochas do granito Gradaús. A) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ mol vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ mol (Shand 1951). B) $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ ppm vs FeO/MgO (Whalen *et al.* 1987); campos para granitos félsicos fracionados (FG) e não fracionados M, I, e S (OGT). C) $\text{Y}+\text{Nb}$ vs Rb ppm (Pearce *et al.* 1984); syn-COLG= granitos sin-colisionais; WPG= granitos intraplacas; VAG= granitos de arcos vulcânicos; ORG= granitos de cadeias oceânicas. 4) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ vs $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ (Dall'Agnol & Oliveira 2007). Fonte: (Carvalho 2017).

5. RESULTADOS

5.1 AMOSTRAGEM E TÉCNICAS ANALÍTICAS

Foi feita uma revisão petrográfica em 51 lâminas representativas por luz transmitida com auxílio de um microscópio petrográfico LEICA, modelo DM4500 P LED, equipado com câmera fotográfica. O estudo envolveu a identificação e descrição das fases minerais presentes nas quatro fácies do Granito Gradaús, com ênfase em anfibólios e biotitas. As lâminas polidas utilizadas neste estudo pertencem ao acervo do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFGPA).

Foi utilizada uma microsonda eletrônica JEOL, modelo JXA-8230, do Laboratório de Microanálises da UFGPA, sob as seguintes condições de operação: voltagem de aceleração 15 kV, corrente elétrica 20 nA, diâmetro do feixe 10 μ m. O tempo de análise foi de 20s ou 40s, a depender do mineral e elementos analisados. O efeito de matriz foi corrigido pelo método ZAF (Armstrong 1988). Os analisadores nos espectrômetros foram TAP para Si, Al, Mg e Na; PETJ para Cr, Ca, K, Sr; LIF para Ni, Fe, Mn, Ba e Ti; PETH para Cl e V; e LDE1 para F. Os padrões utilizados para os diferentes elementos foram: ortoclásio (Si e K), anortita (Al), wollastonita (Ca), FeO₃O₄ (Fe), diopsídio (Mg), sodalita (Na e Cl), rutilo (Ti), rodonita (Mn), vanádio (V), Cr₂O₃ (Cr), biotita (F). Os dados obtidos foram tratados em planilhas do Excel e os diagramas geoquímicos foram elaborados utilizando-se do programa GCDkit 4.3 (Janoušek *et al.* 2006) e editados no CorelDrawX5.

As análises com WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) de anfibólios e biotitas foram realizadas em nove lâminas polidas representativas das quatro fácies do Granito Gradaús, totalizando 266 análises, sendo: 81 de anfibólios dos BASG, 40 de biotitas dos BMG, 36 dos BSG, 98 dos BMGP-BSGP e 11 análises de biotitas provenientes da alteração dos anfibólios dos BASG (Tabela 2). Todas as lâminas polidas foram recobertas por carbono (*carbon-coated*).

Tabela 2 - Relação das amostras do Granito Gradaús utilizadas para análises com microsonda eletrônica.

Lâmina Polida	Fácies	Mineral analisado	Cristais analisados	Nº análises
TL-19	BASG	Anfibólio	10	49
TL-21	BASG	Anfibólio	5	32
		Biotita	2	11
FC-13	BMG	Biotita	6	31
FC-18	BMG	Biotita	2	9
FC-14	BSG	Biotita	6	25
FC-10	BSG	Biotita	3	11
FC-05	PBMG	Biotita	12	50
TL-29	PBMG	Biotita	5	20
TL-16A	PBSG	Biotita	6	28

5.2 ASPECTOS TEXTURAIIS

Anfibólio

A presença de anfibólio é restrita aos BASG, que ocorrem na porção NW do corpo (Figura 3). Forma cristais subédricos e anédricos com pleocroísmo castanho-claro a verde-escuro, comumente associados ou contendo inclusões subédricas de ilmenita e, secundariamente, de magnetita e apatita. Cristais mais desenvolvidos apresentam incipiente substituição por epidoto, clorita e biotita (Figura 6).

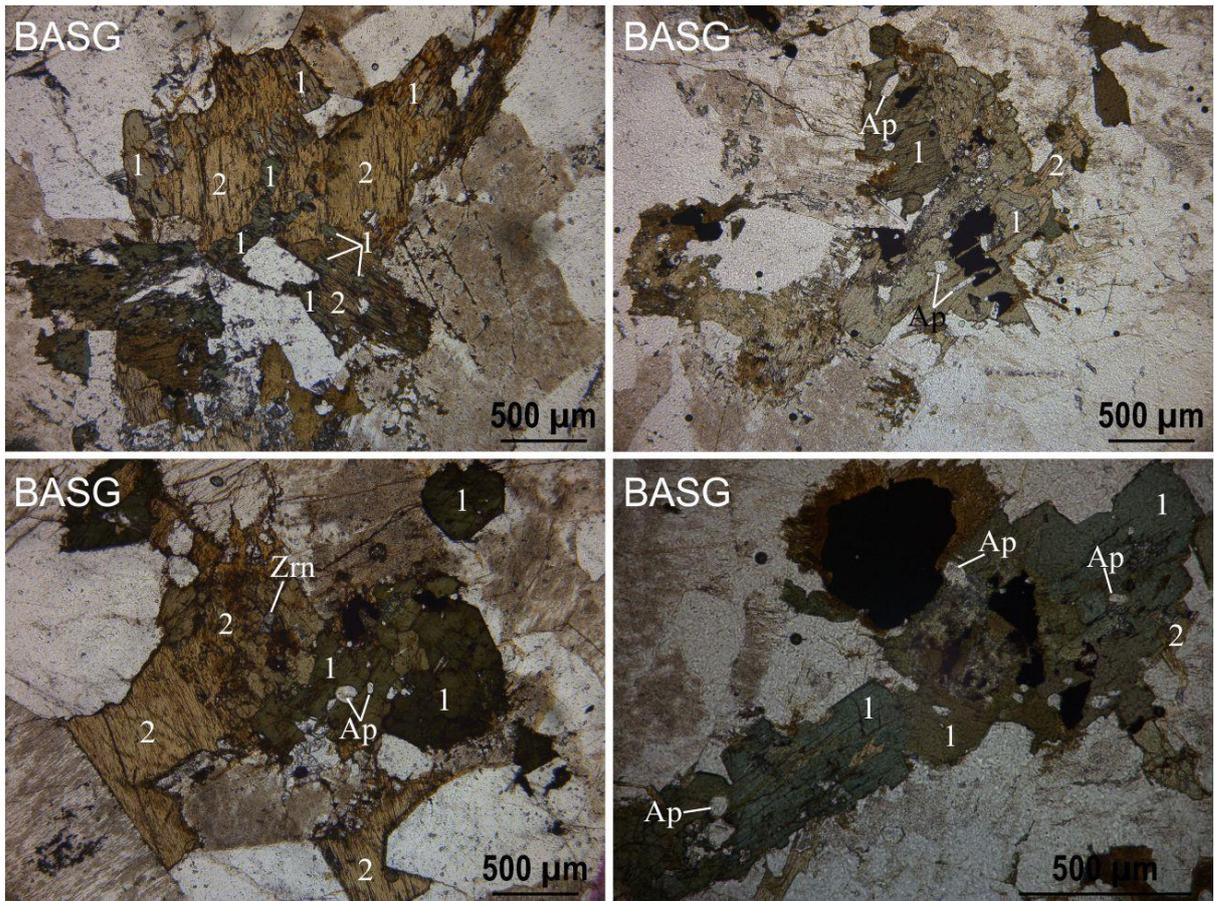


Figura 6 - Imagens de cristais de anfibólio representativos dos BASG, parcialmente alterados parabiotita, associados a minerais opacos e apatita. 1=anfibólio; 2=biotita; Ap=apatita; Zrn=zircão.

Biotita

Está presente nos BMG, BSG e PBMG a PBSG e também como produto de alteração dos anfibólios nos BASG (Figura 6). Ocorre como lamelas milimétricas intersticiais, anédricas e subédricas, distribuídas entre cristais de quartzo e álcali feldspato peritítico, corroídas e alteradas em diferentes intensidades para clorita, óxido de Fe e titanita. Inclusões da apatita são comuns (Figura 7).

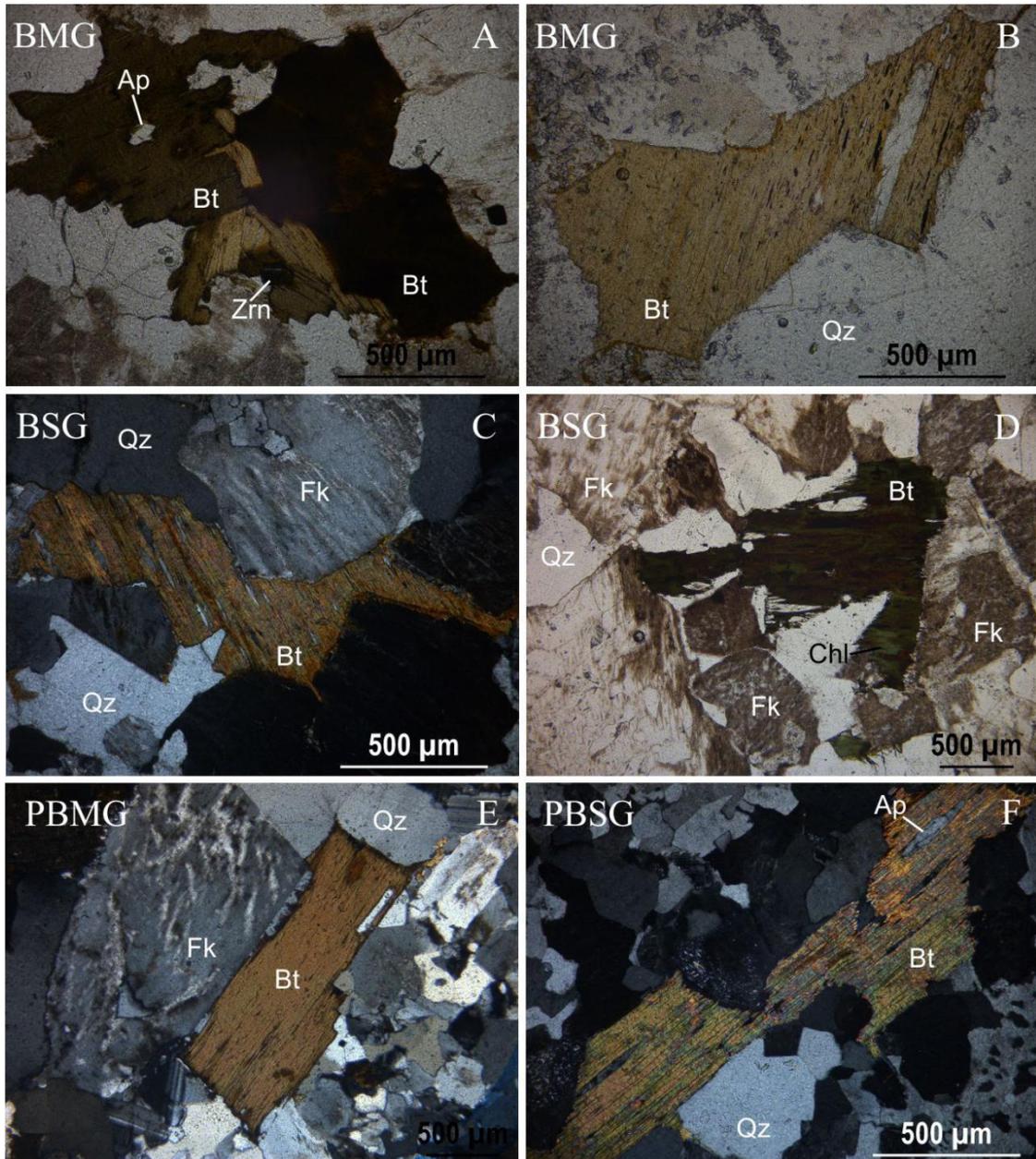


Figura 7 - Cristais de biotita representativos das diferentes fácies do Granito Gradaús. BMG=biotita-monzogranito; BSG=biotita-sienogranito; PBMG=biotita-monzogranito porfirítico; PBSG= biotita-sienogranito porfirítico. Bt=biotita; Chl=clorita; Fk=álcali feldspato; Qz=quartzo; Ap=apatita; Zrn=zircão.

5.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CLASSIFICAÇÃO

Anfibólios

Composição química e fórmula mineral de cristais de anfibólios (Imagens de anfibólios por ERE na Figura 8) representativos do Granito Gradaús são apresentadas na Tabela 3. As fórmulas estruturais foram calculadas com base em 23 átomos de oxigênio, utilizando o fator de normalização 13 cátions, excluindo Ca, Na e K, que se mostrou preciso para anfibólios cálcicos (Leake *et al.* 1997). A classificação seguiu os critérios estabelecidos

pela IMA (*International Mineralogical Association*). Os valores de Fe^{+2} e Fe^{+3} foram estimados com base no balanço de carga proposto por Schumacher (1997). Todos os anfibólios possuem $\text{Ca}^{+IV}\text{Al} > 2,5$ (Tabela 3), indicando que são primários (cf. Giret *et al.* 1980). Composicionalmente são anfibólios cálcicos ($(\text{Ca}+\text{Na})_B \geq 1,00$ e $\text{Na}_B < 0,50$, Leake *et al.* 1997; $(^B\text{Ca}/^B(\text{Ca}+\text{Na})) \geq 0,75$, Hawthorne *et al.* 2012), representados predominantemente por Fe-edenitas com razões Mg/Fe ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$) entre 0,12 e 0,27 e conteúdos de ^{IV}Si entre 6,5 e 6,84 apfu. Fe-hornblendas e hastingsitas, com razões Mg/Fe similares e ^{IV}Si levemente $< 6,5$ apfu, ocorrem secundariamente (Figura 9).

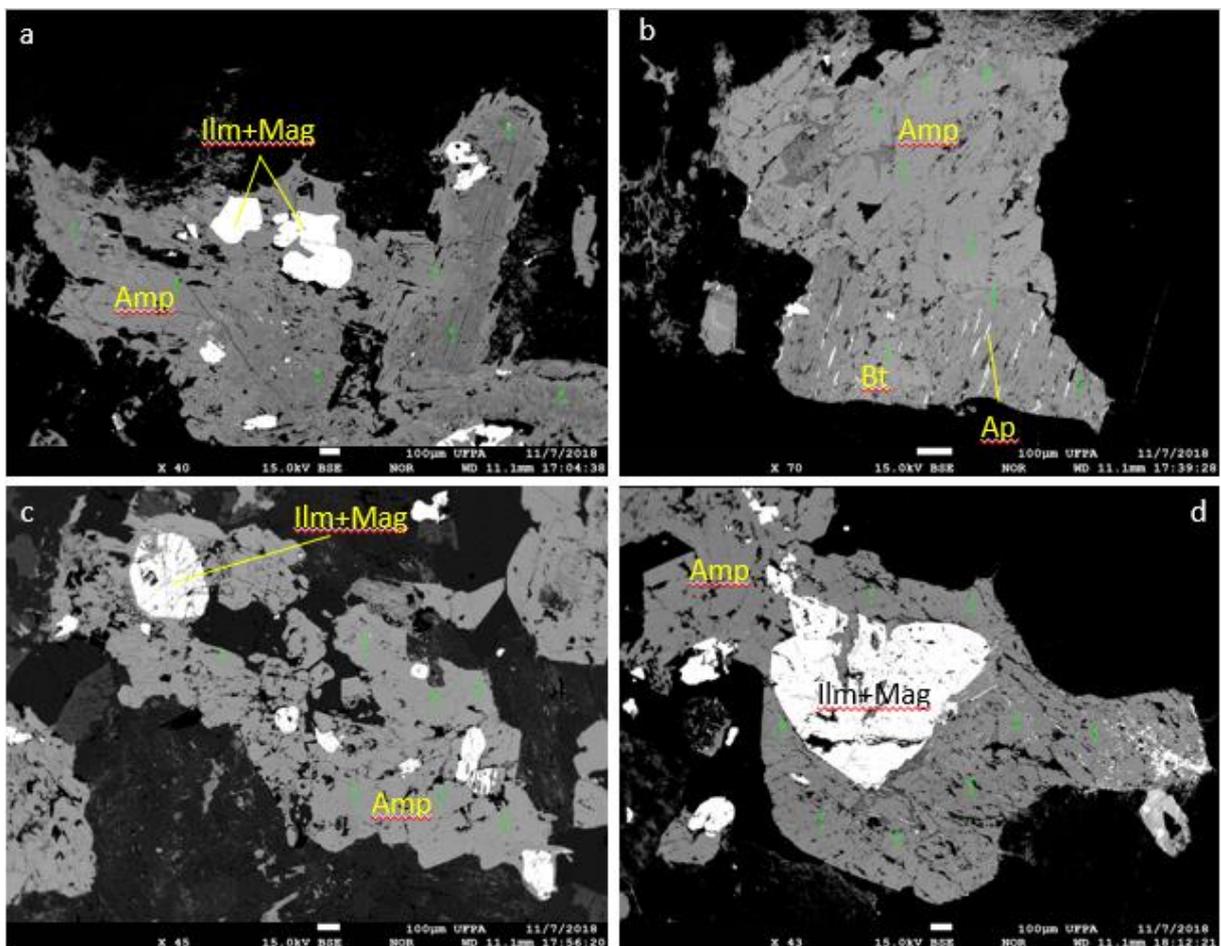


Figura 8 - Imagens de elétrons retroespalhados em microsonda eletrônica. Cristais de anfibólios analisados na fácies BASG. Amp = Anfibólio; Ap = Apatita; Bt = Biotita; Ilm = Ilmenita; Mag = Magnetita. Pontos verdes=locais analisados. Barra branca = 100µm.

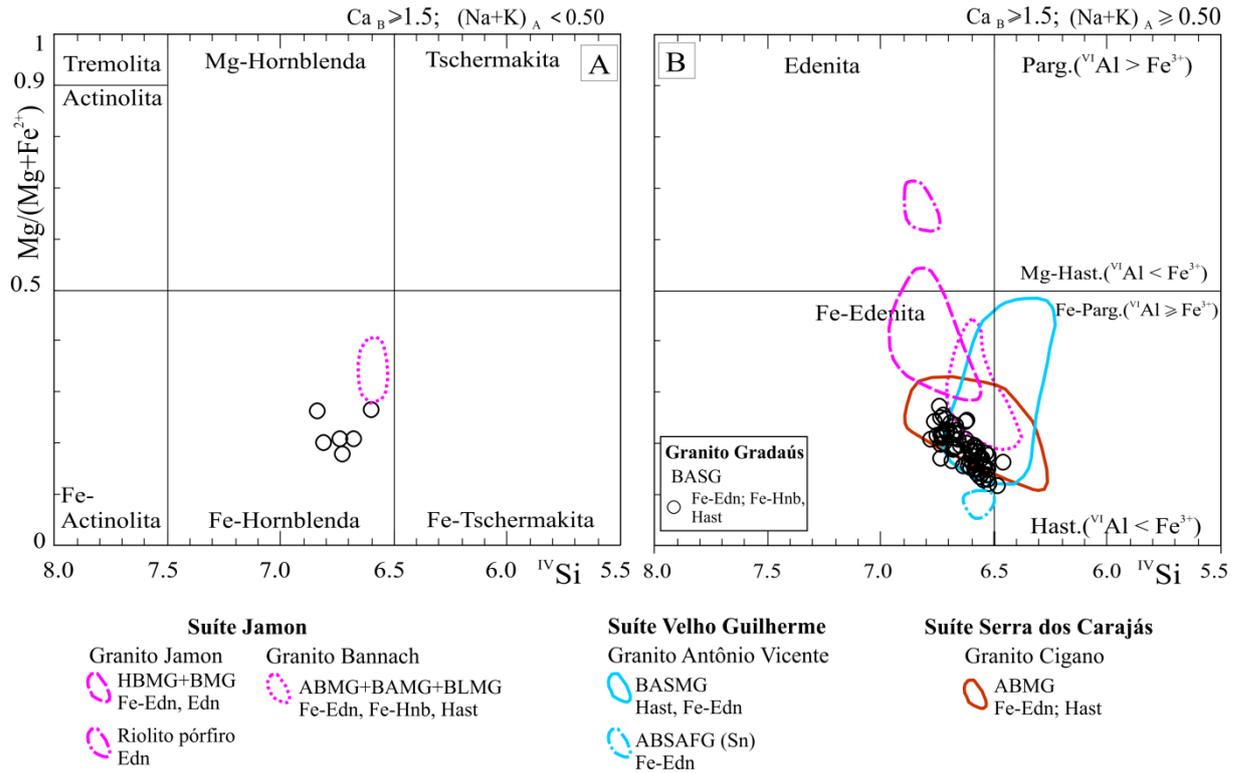


Figura 9 - Diagrama $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ vs ^{IV}Si (Leake *et al.* 1997) aplicado aos cristais de anfibólio do Granito Gradaús com campos de anfibólios de outros granitos anorogênicos da Província Carajás usados para comparação. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. L= leuco. S=sienogranito. AFG=álcali-feldspato granito. Fe=ferro. Edn=edenita. Hnb=hornblenda. Hast=hastingsita. Sn=estanho.

Tabela 3 - Composições químicas representativas dos anfibólios do Granito Gradaús.

Fácies Amostra	TL-19											BASG									
	Fe-Ed	Fe-Hb	Fe-Ed	Fe-Ed	Fe-Ed	Fe-Ed	Fe-Ed	Fe-Ed	Fe-Hb	Fe-Hb	Hast										
SiO ₂	41,70	42,38	42,35	42,24	40,71	42,65	41,09	40,50	41,71	42,23	42,69	41,29	41,87	42,29	42,36	40,94	40,53	42,14	41,70	40,23	40,46
TiO ₂	1,45	0,75	1,74	0,57	1,45	1,10	1,31	1,75	1,73	1,63	0,72	1,78	1,75	1,47	1,46	2,11	1,73	1,34	1,52	1,13	1,76
Al ₂ O ₃	7,74	7,42	7,05	7,16	8,14	6,92	7,98	8,24	7,40	7,17	6,61	7,50	7,36	7,25	7,10	7,89	8,05	6,81	7,52	8,51	8,20
FeO*	28,57	29,05	28,58	29,67	30,18	29,35	29,53	30,24	28,88	28,49	29,76	30,24	29,41	29,24	29,01	29,61	30,55	30,29	28,29	31,22	30,71
MgO	3,58	3,63	3,74	3,71	2,33	3,57	2,95	2,12	3,27	3,86	3,37	2,55	3,19	3,39	3,63	2,82	2,30	2,95	4,35	1,91	2,58
MnO	0,39	0,54	0,46	0,52	0,51	0,41	0,48	0,55	0,53	0,48	0,64	0,59	0,50	0,48	0,53	0,48	0,48	0,64	0,32	0,66	0,54
CaO	10,15	9,97	9,96	9,97	9,93	10,02	10,05	9,89	10,08	10,11	9,98	10,12	10,15	10,04	10,02	10,07	10,05	9,69	9,72	9,95	9,73
Na ₂ O	1,98	1,90	1,98	1,96	2,01	1,97	2,05	1,98	2,02	2,06	1,86	1,98	1,98	1,94	1,90	2,03	1,95	1,97	2,02	2,01	2,05
K ₂ O	1,16	1,07	1,03	1,07	1,16	1,01	1,20	1,18	1,12	1,06	0,94	1,08	1,11	1,04	1,06	1,22	1,22	0,98	1,10	1,21	1,19
F	0,89	0,88	0,72	1,00	0,84	0,94	0,83	0,76	0,87	1,01	0,75	0,86	0,95	0,94	0,75	0,81	0,84	0,79	1,18	0,79	0,68
Cl	0,26	0,24	0,22	0,22	0,33	0,23	0,32	0,33	0,25	0,21	0,22	0,25	0,24	0,23	0,23	0,27	0,32	0,23	0,22	0,37	0,36
OH-	2,57	2,55	2,51	2,24	2,83	2,07	2,64	2,84	2,51	2,04	2,83	2,18	1,76	2,13	2,16	2,16	2,34	2,44	2,61	2,28	2,10
TOTAL	100,4	100,4	100,3	100,3	100,4	100,2	100,4	100,3	100,4	100,3	100,4	100,4	100,5	100,4	100,2	100,4	100,5	100,3	100,5	100,5	100,5
Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 23 átomos de oxigênio																					
Si	6,65	6,73	6,73	6,71	6,57	6,78	6,60	6,55	6,68	6,70	6,81	6,62	6,67	6,72	6,72	6,56	6,53	6,73	6,60	6,49	6,46
^{IV} Al	1,35	1,27	1,27	1,29	1,43	1,22	1,40	1,45	1,32	1,30	1,19	1,38	1,33	1,28	1,28	1,44	1,47	1,27	1,40	1,51	1,54
Soma T	8,00																				
^{VI} Al	0,11	0,12	0,05	0,05	0,12	0,07	0,11	0,12	0,07	0,05	0,06	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04	0,06	0,01	0,00	0,10	0,00
Ti	0,17	0,09	0,21	0,07	0,18	0,13	0,16	0,21	0,21	0,19	0,09	0,21	0,21	0,18	0,17	0,25	0,21	0,16	0,18	0,14	0,21
Fe ³⁺	0,57	0,77	0,60	0,91	0,66	0,67	0,64	0,63	0,52	0,58	0,78	0,59	0,56	0,63	0,68	0,56	0,67	0,82	0,89	0,82	0,91
Mn	0,05	0,07	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,07	0,07	0,06	0,09	0,08	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,09	0,04	0,09	0,07
Mg	0,85	0,86	0,89	0,88	0,56	0,84	0,71	0,51	0,78	0,91	0,80	0,61	0,76	0,80	0,86	0,67	0,55	0,70	1,03	0,46	0,61
Fe ²⁺	3,24	3,08	3,19	3,03	3,42	3,23	3,32	3,46	3,35	3,20	3,19	3,46	3,35	3,25	3,17	3,41	3,45	3,22	2,86	3,39	3,19
Soma C	5,00																				
Ca	1,73	1,70	1,69	1,70	1,72	1,70	1,73	1,71	1,73	1,72	1,71	1,74	1,73	1,71	1,70	1,73	1,73	1,66	1,65	1,72	1,66
Na	0,27	0,30	0,31	0,30	0,28	0,30	0,27	0,29	0,27	0,28	0,29	0,26	0,27	0,29	0,30	0,27	0,27	0,34	0,35	0,28	0,34
Soma B	2,00																				
Na	0,35	0,28	0,30	0,30	0,35	0,31	0,37	0,33	0,36	0,35	0,28	0,35	0,34	0,31	0,29	0,36	0,34	0,27	0,27	0,35	0,30
K	0,24	0,22	0,21	0,22	0,24	0,21	0,24	0,24	0,23	0,21	0,19	0,22	0,22	0,21	0,21	0,25	0,25	0,20	0,22	0,25	0,24
Soma A	0,58	0,50	0,51	0,51	0,59	0,52	0,61	0,58	0,58	0,57	0,47	0,58	0,57	0,52	0,50	0,61	0,59	0,47	0,49	0,60	0,54
Total	15,58	15,50	15,51	15,51	15,59	15,52	15,61	15,58	15,58	15,57	15,47	15,58	15,57	15,52	15,50	15,61	15,59	15,47	15,49	15,60	15,54
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,21	0,22	0,22	0,22	0,14	0,21	0,18	0,13	0,19	0,22	0,20	0,15	0,18	0,20	0,21	0,16	0,14	0,18	0,26	0,12	0,16
Al total	1,45	1,39	1,32	1,34	1,55	1,30	1,51	1,57	1,40	1,34	1,24	1,42	1,38	1,36	1,33	1,49	1,53	1,28	1,40	1,62	1,54
Fe _t /(Fe _t +Mg)	0,82	0,82	0,81	0,82	0,88	0,82	0,85	0,89	0,83	0,81	0,83	0,87	0,84	0,83	0,82	0,85	0,88	0,85	0,78	0,90	0,87

Biotitas

Composições químicas representativas das biotitas estudadas (Figura 10) constam nas Tabelas (4 e 5). As fórmulas estruturais foram calculadas com base em 22 átomos de oxigênio equivalentes em base anidra, assumindo-se todo o ferro presente como Fe^{2+} (Dymek 1983). Todas as biotitas do Granito Gradaús são enriquecidas em Fe (Figura 11), com razões $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ entre 0,81 a 0,96 e se aproximam do polo annita-siderofilita (Rieder *et al.* 1998). Nas biotitas dos BASG+BMG+PBMG+PBSG o TiO_2 varia de 1,90 a 4,90 Wt.% e o Al_2O_3 de 11,48 a 15,12 Wt.%, enquanto nas biotitas dos BSG variam de 0,76 a 4,41 Wt.% e de 13,79 a 17,39 Wt.%, respectivamente (Tabela 4). As biotitas provenientes da alteração dos anfibólios são comparativamente mais empobrecidas em Fe_t e $^{\text{IV}}\text{Al}$ (Figura 11A). Na Figura 11B, as biotitas do Granito Gradaús confirmam seu enriquecimento em Fe e plotam predominantemente no campo das siderofilitas, com as biotitas dos BSG mostrando comportamento mais aluminoso.

Biotitas de rochas plutônicas são comumente afetadas por reequilíbrio pós-magmático (Speer 1984). No diagrama $\text{FeO}+\text{MnO} - 10*\text{TiO}_2 - \text{MgO}$ (Figura 11C), as biotitas do Granito Gradaús formam um *trend* que vai do campo das biotitas primárias (dominante) para o das biotitas reequilibradas e, raramente, atingem o campo das biotitas neoformadas (BSG). As biotitas provenientes da alteração dos anfibólios plotam predominantemente no campo das biotitas reequilibradas.

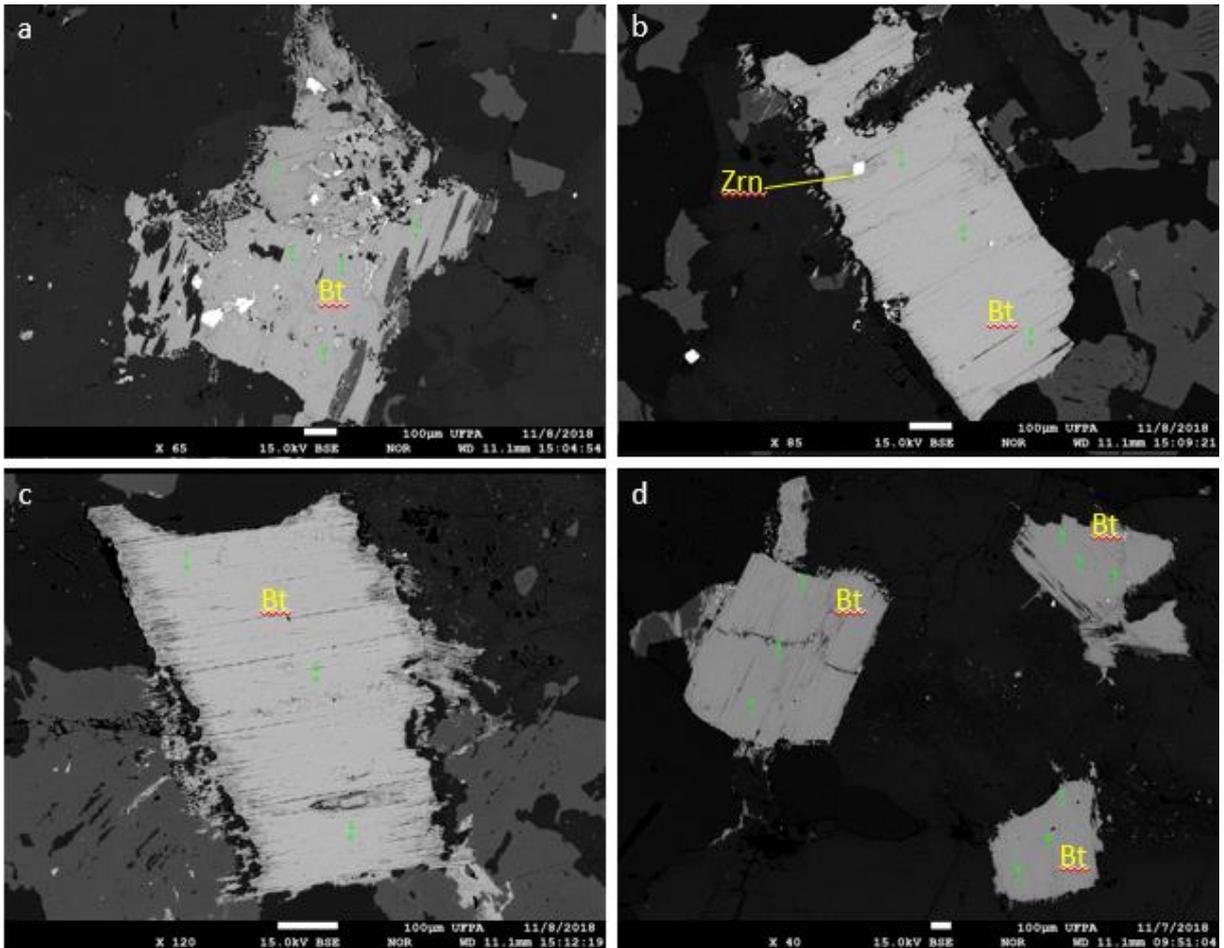


Figura 10 - Imagens de elétrons retroespalhados em microsonda eletrônica. Cristais de biotita parcialmente alterados (a, b e c). Bt = Biotita; Zrn = Zircão. Pontos verdes=locais analisados. Barra branca = 100µm.

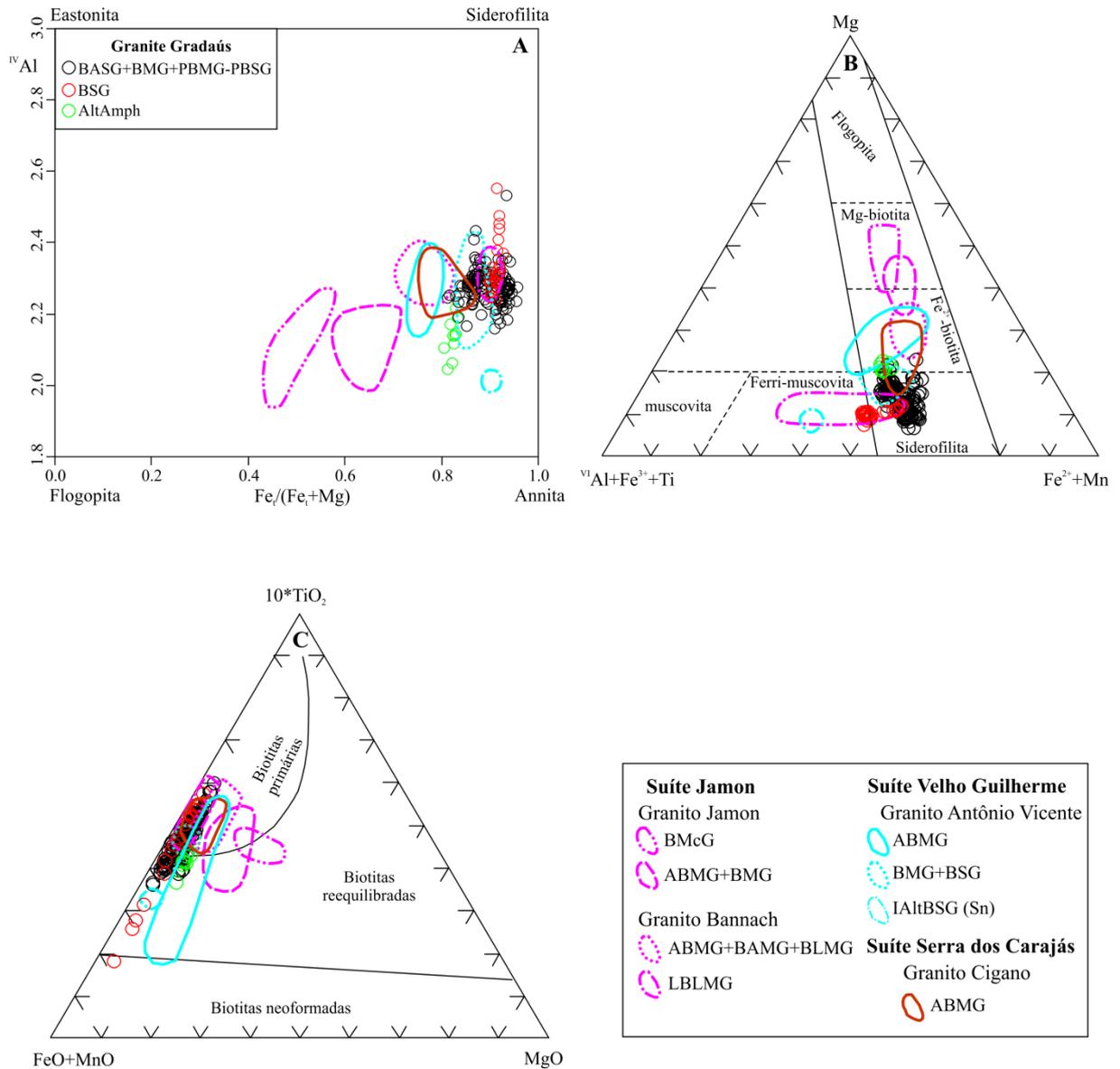


Figura 11 - (A) Diagrama $Fe_v/(Fe_v+Mg)$ vs ^{IV}Al (Deer *et al.* 1992) mostrando a distribuição das biotitas do Granito Gradaús. Notar menores conteúdos de ^{IV}Al das biotitas provenientes da alteração dos anfibólios. (B) Diagrama $^{VI}Al+Fe^{3+}+Ti - Mg - Fe^{2+}+Mn$ (Foster 1960) mostrando o enriquecimento em Fe das biotitas do Granito Gradaús. (C) Diagrama $FeO+MnO - 10*TiO_2 - MgO$ (Nachit *et al.* 2005) mostrando a distribuição das biotitas do granito Gradaús nos campos de biotitas primárias, reequilibradas e neoformadas. Campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. P=porfírico. AltAmph=alteração do anfibólio. BMcG=biotita microgranito. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. SG=sienogranito. L=leuco. AFG=álcali-feldspato granito. IAIt=intensamente alterado. LBLMG=biotita leucomonzogranito tardio. Fontes: Granito Jamon= Dall’Agnol *et al.* (1999, 2005); Granito Bannach= Mesquita (2018); Granito Antônio Vicente= Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Cigano= Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Gradaús=este estudo.

5.4 TIPOLOGIA

Biotitas de rochas plutônicas têm sido utilizadas como bons indicadores das condições físico-químicas e da natureza e ambiente tectônico de cristalização de seu magma hospedeiro (Nachit *et al.* 1985, 2005, Abdel-Rahman *et al.* 1994, Abdel-Fattah & Abdel-Rahman 1996, Lalonde *et al.* 1996, Bónová *et al.* 2010, Gao *et al.* 2016). No diagrama $^{IV}Al+^{VI}Al$ vs Mg (Figura 12) as biotitas do Granito Gradaús plotam predominantemente no campo alcalino, com parte das análises dos PBMG e a grande maioria dos BSG, mais enriquecidas em Al, se posicionando no campo subalcalino. As biotitas resultantes da alteração dos anfibólios plotam no limite entre esses dois campos.

Nos diagramas Al_2O_3 vs MgO e $FeO - MgO - Al_2O_3$ (Figura 13), as biotitas do Granito Gradaús plotam no campo dos granitos anorogênicos, comportamento consistente com as análises de rocha total (Figura 8; Tabela 4); as biotitas mais aluminosas dos BSG formam um *trend* vertical do campo anorogênico para o dos granitos peraluminosos.

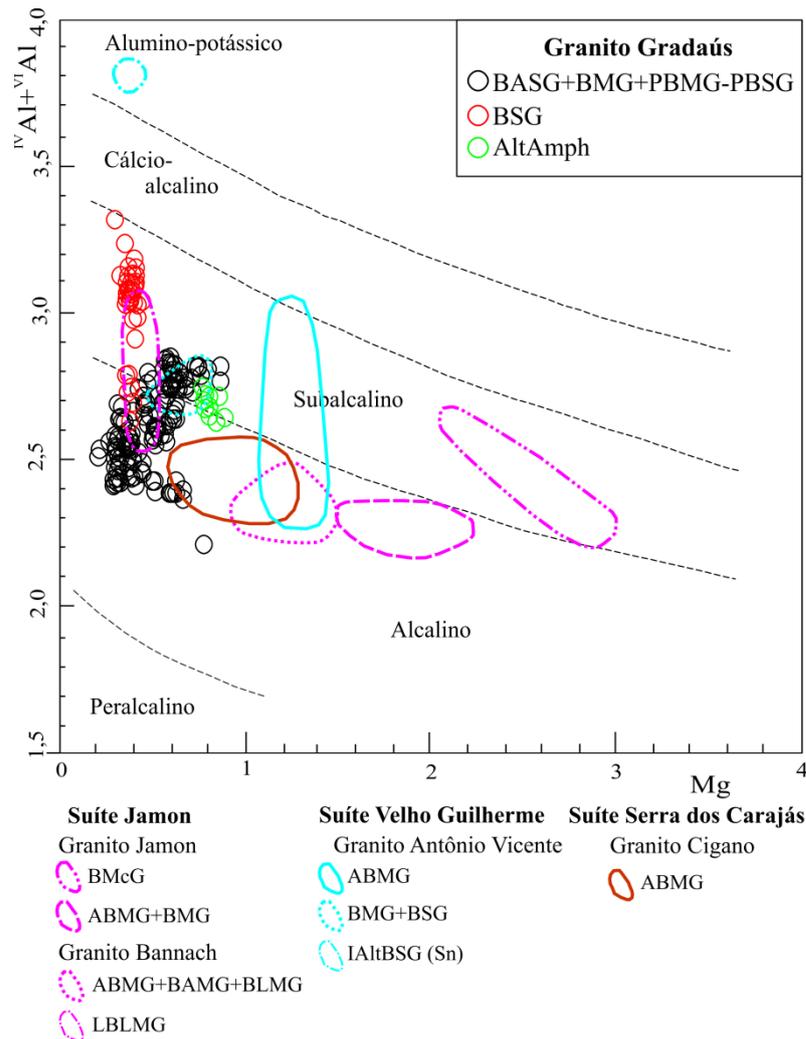


Figura 12 - Diagrama $^{IV}Al+^{VI}Al$ vs Mg (Nachit *et al.* 1985) para as biotitas do Granito Gradaús e campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. P=porfírico. AltAmph=alteração do anfibólio. BMcG=biotita-microgranito. A=anfibólio. B=biotita. MG=monzogranito. SG=sienogranito. L=leuco. AFG=álcali feldspato granito. IAlt=intensamente alterado. LBLMG=biotita-leucomonzogranito tardio. Fontes: Granito Jamon= Dall’Agnol *et al.* (1999, 2005); Granito Bannach=Mesquita (2018); Granito Antônio Vicente=from Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo; Granito Cigano=Dall’Agnol *et al.* (2005), este estudo. Granito Gradaús=este estudo.

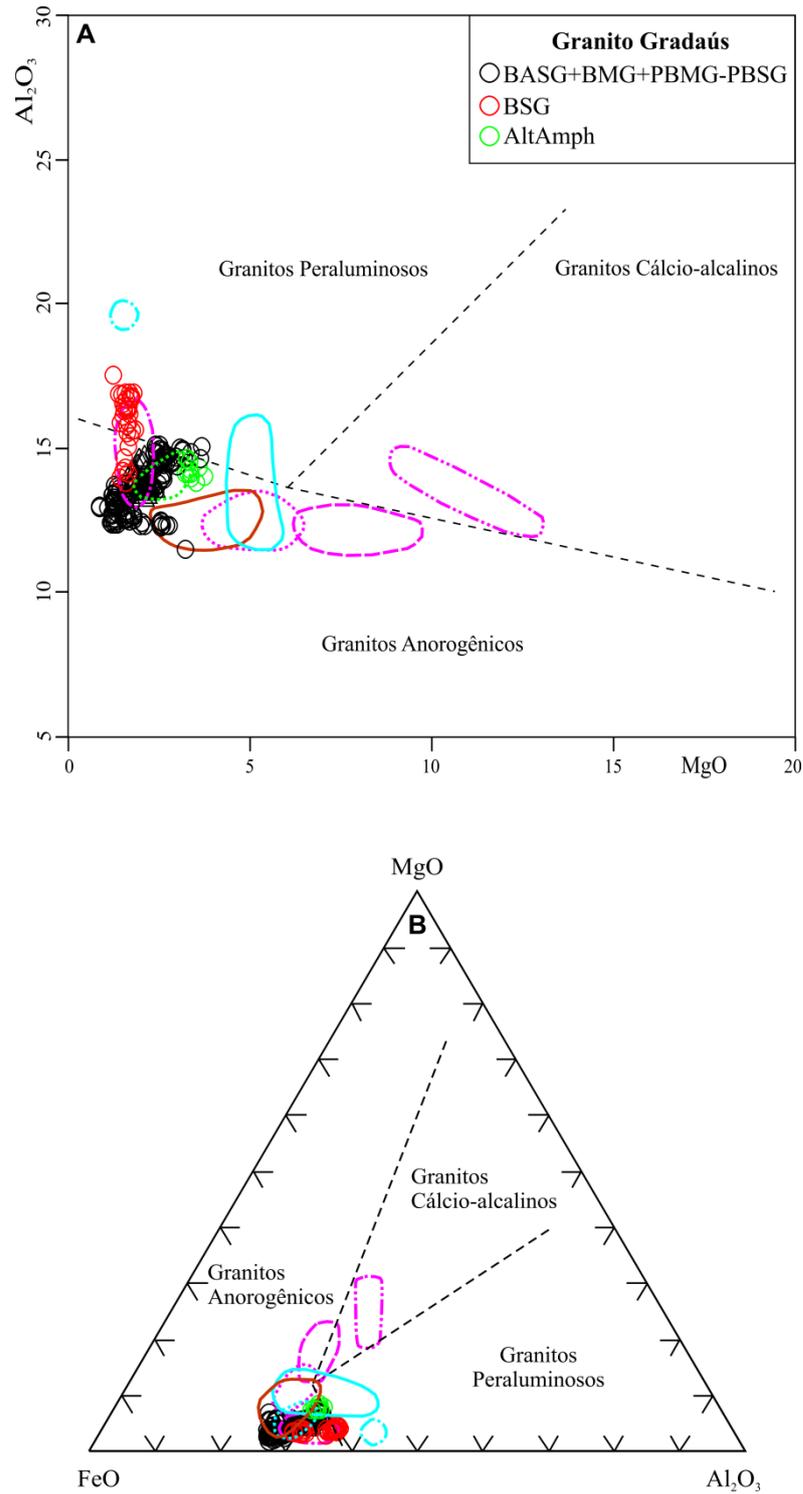


Figura 13 - Diagramas Al₂O₃ vs MgO e FeO – MgO – Al₂O₃ (Abdel-Rahman *et al.* 1994) mostrando a afinidade das biotitas do Granito Gradaús com granitos anorogênicos. Campos com a composição de biotitas de granitos selecionados para comparação. Simbologia conforme Figura 12.

Tabela 4 - Composições químicas representativas das biotitas do Granito Gradaús.

Continua...

Facies	PBMG																PBSG								
	Amostra	FC-05								TL-29								TL-16A							
		Análise nº	1-1	1-3	1-4	1-5	4-2	4-3	4-4	4-5	1-2	1-3	2-3	4-2	4-4	4-6	4-7	5-1	1-1	1-2	1-4	1-5	2-1	2-2	
SiO ₂	36,91	36,45	35,95	36,07	35,47	34,71	35,20	35,49	34,81	35,48	35,14	35,03	34,39	35,13	34,42	35,01	34,45	34,21	34,63	34,38	34,57	34,60			
TiO ₂	2,20	2,35	2,09	2,36	3,32	3,56	2,71	2,64	2,00	3,15	2,52	3,15	3,74	3,54	3,96	3,80	3,53	4,03	3,47	3,54	3,36	3,53			
Al ₂ O ₃	13,82	14,64	14,64	14,97	14,79	13,12	13,19	14,94	13,46	14,37	13,38	13,12	13,20	13,76	12,95	13,39	12,37	12,40	12,39	12,36	12,48	12,51			
FeO	27,16	28,87	28,29	28,62	29,32	32,37	33,06	29,91	33,52	28,79	32,90	32,25	31,96	29,98	32,92	32,05	34,08	34,22	33,63	33,81	33,77	34,15			
MgO	3,50	3,25	3,18	3,15	2,44	1,52	1,57	2,50	1,38	2,99	1,60	1,47	1,42	2,45	1,51	1,56	1,20	1,18	1,33	1,26	1,29	1,23			
MnO	0,58	0,51	0,51	0,53	0,63	0,44	0,45	0,52	0,33	0,49	0,44	0,45	0,49	0,61	0,48	0,41	0,44	0,47	0,42	0,43	0,45	0,42			
CaO	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00	0,05	0,02	0,06	0,08	0,05	0,05			
Na ₂ O	0,13	0,08	0,15	0,11	0,12	0,06	0,05	0,08	0,03	0,06	0,05	0,06	0,05	0,18	0,08	0,03	0,18	0,22	0,16	0,15	0,15	0,09			
K ₂ O	9,02	9,05	9,02	9,07	9,08	8,89	8,84	9,04	8,81	9,11	8,93	8,85	8,88	8,95	8,93	8,91	8,50	8,45	8,43	8,33	8,33	8,34			
F	0,63	0,47	0,71	0,69	0,93	0,32	0,31	0,56	0,25	0,56	0,32	0,31	0,26	0,67	0,23	0,29	0,03	0,11	0,03	0,01	0,18	0,05			
Cl	0,19	0,21	0,19	0,18	0,30	0,40	0,33	0,25	0,49	0,19	0,31	0,44	0,37	0,33	0,35	0,36	0,30	0,30	0,31	0,29	0,31	0,29			
H ₂ O	5,86	4,17	5,46	4,48	3,94	4,69	4,33	4,22	4,87	5,06	4,58	4,92	5,20	4,57	4,25	4,16	4,91	4,25	5,05	5,32	5,04	4,78			
Subtotal	100,04	100,06	100,23	100,25	100,36	100,07	100,05	100,15	99,95	100,27	100,18	100,06	99,98	100,20	100,08	99,98	100,05	99,87	99,90	99,95	99,98	100,04			
O=F,Cl	0,31	0,24	0,34	0,33	0,46	0,22	0,21	0,29	0,22	0,28	0,21	0,23	0,19	0,36	0,17	0,20	0,08	0,11	0,08	0,07	0,14	0,08			
Total	99,73	99,82	99,89	99,92	99,90	99,85	99,84	99,86	99,73	99,99	99,97	99,83	99,79	99,84	99,91	99,78	99,97	99,76	99,82	99,88	99,84	99,96			
Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 22 átomos de oxigênio																									
Si	5,95	5,81	5,81	5,77	5,69	5,71	5,77	5,71	5,77	5,72	5,76	5,77	5,68	5,70	5,65	5,71	5,71	5,65	5,74	5,72	5,73	5,72			
^{IV} Al	2,05	2,19	2,19	2,23	2,31	2,29	2,23	2,29	2,23	2,28	2,24	2,23	2,32	2,30	2,35	2,29	2,29	2,35	2,26	2,28	2,27	2,28			
Soma T	8,00																								
^{VI} Al	0,58	0,56	0,60	0,59	0,48	0,25	0,32	0,54	0,40	0,46	0,35	0,31	0,26	0,34	0,16	0,28	0,13	0,07	0,16	0,14	0,17	0,15			
Ti	0,27	0,28	0,25	0,28	0,40	0,44	0,33	0,32	0,25	0,38	0,31	0,39	0,46	0,43	0,49	0,47	0,44	0,50	0,43	0,44	0,42	0,44			
Fe total	3,66	3,85	3,82	3,83	3,93	4,45	4,53	4,02	4,64	3,88	4,51	4,44	4,42	4,07	4,52	4,37	4,72	4,73	4,66	4,70	4,68	4,72			
Mg	0,84	0,77	0,77	0,75	0,58	0,37	0,38	0,60	0,34	0,72	0,39	0,36	0,35	0,59	0,37	0,38	0,30	0,29	0,33	0,31	0,32	0,30			
Mn	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,06	0,06	0,07	0,05	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06			
Soma O	5,44	5,53	5,51	5,52	5,48	5,57	5,63	5,55	5,67	5,51	5,62	5,57	5,55	5,51	5,60	5,55	5,65	5,65	5,64	5,66	5,66	5,67			
Ca	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01			
Na	0,04	0,02	0,05	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,06	0,02	0,01	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03			
K	1,86	1,84	1,86	1,85	1,86	1,86	1,85	1,85	1,86	1,87	1,87	1,86	1,87	1,85	1,87	1,85	1,80	1,78	1,78	1,77	1,76	1,76			
Soma A	1,90	1,87	1,91	1,89	1,90	1,89	1,86	1,88	1,87	1,90	1,89	1,88	1,89	1,92	1,90	1,86	1,87	1,86	1,84	1,83	1,82	1,80			
F	0,32	0,23	0,36	0,35	0,47	0,17	0,16	0,28	0,13	0,29	0,17	0,16	0,13	0,34	0,12	0,15	0,02	0,06	0,02	0,00	0,09	0,02			
OH	6,30	4,44	5,88	4,77	4,21	5,15	4,73	4,53	5,38	5,45	5,01	5,40	5,73	4,95	4,65	4,52	5,43	4,68	5,58	5,90	5,58	5,27			
Cl	0,05	0,06	0,05	0,05	0,08	0,11	0,09	0,07	0,14	0,05	0,09	0,12	0,10	0,09	0,10	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08			
Mg/(Mg+Fe)	0,19	0,17	0,17	0,16	0,13	0,08	0,08	0,13	0,07	0,16	0,08	0,08	0,07	0,13	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06			
Al total	2,63	2,75	2,79	2,82	2,80	2,54	2,55	2,83	2,63	2,73	2,59	2,55	2,57	2,63	2,50	2,57	2,42	2,41	2,42	2,42	2,44	2,44			
Fe/(Fe+Mg)	0,81	0,83	0,83	0,84	0,87	0,92	0,92	0,87	0,93	0,84	0,92	0,92	0,93	0,87	0,92	0,92	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94			

Tabela 4 - Composições químicas representativas das biotitas do Granito Gradaús.

Continuação

Facies	BMG																					
	Amostra	FC-13										FC-18										
		Análise nº	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-7	2-8	2-10	2-11	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
	SiO ₂	34,55	34,79	34,56	35,45	35,48	35,19	35,40	34,43	34,99	35,75	35,20	34,93	34,75	34,89	35,15	34,87	34,87	35,36	34,94	31,65	31,19
	TiO ₂	2,46	2,78	2,77	2,62	3,29	3,01	2,84	3,23	3,86	2,44	3,37	3,45	3,55	3,35	3,04	3,22	3,35	3,27	3,32	2,13	2,73
	Al ₂ O ₃	13,84	13,65	13,47	14,54	13,90	14,32	14,60	13,72	13,44	13,67	13,37	12,91	13,01	13,11	13,39	13,32	13,15	13,25	13,06	15,05	14,73
	FeO	31,37	31,18	31,44	29,73	29,92	30,11	30,59	30,79	30,86	30,89	33,44	32,64	32,92	33,28	33,37	33,12	33,68	33,47	33,28	36,90	36,98
	MgO	1,99	1,99	1,96	1,96	2,01	1,91	2,11	2,14	2,09	2,32	1,28	1,28	1,24	1,25	1,28	1,21	1,24	1,24	1,22	1,52	1,57
	MnO	0,56	0,61	0,58	0,48	0,47	0,50	0,54	0,54	0,50	0,56	0,44	0,48	0,45	0,45	0,39	0,37	0,35	0,34	0,38	0,31	0,30
	CaO	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,02	0,02	0,21	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,00	0,08
	Na ₂ O	0,10	0,15	0,10	0,15	0,14	0,10	0,10	0,11	0,14	0,08	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,11	0,08	0,13	0,13	0,02	0,09
	K ₂ O	8,90	8,84	8,89	8,89	9,08	9,03	9,03	8,81	8,94	8,92	8,89	8,86	8,88	8,86	8,87	8,68	8,78	8,81	8,85	5,54	5,37
	F	1,23	1,10	1,15	0,99	0,71	0,69	1,35	1,42	1,20	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cl	0,29	0,31	0,33	0,34	0,27	0,26	0,29	0,29	0,28	0,30	0,48	0,48	0,48	0,49	0,48	0,46	0,47	0,48	0,48	0,29	0,28
	H ₂ O	5,23	5,02	5,15	5,28	4,85	4,92	3,52	4,98	4,19	4,17	3,44	5,00	4,57	4,26	4,03	4,69	4,07	3,57	4,43	6,66	6,66
	Subtotal	100,52	100,42	100,39	100,45	100,15	100,05	100,39	100,66	100,51	100,68	99,99	100,11	99,96	100,04	100,08	100,04	100,05	99,95	100,11	100,07	99,99
	O=F,Cl	0,58	0,53	0,56	0,49	0,36	0,35	0,63	0,66	0,57	0,73	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,06	0,06
	Total	99,94	99,89	99,83	99,96	99,79	99,70	99,76	100,00	99,94	99,95	99,88	100,00	99,85	99,93	99,97	99,94	99,94	99,84	100,00	100,01	99,93
	Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 22 átomos de oxigênio																					
	Si	5,70	5,72	5,71	5,77	5,77	5,73	5,70	5,66	5,69	5,81	5,72	5,75	5,72	5,72	5,74	5,73	5,71	5,75	5,73	5,35	5,28
	^{IV} Al	2,30	2,28	2,29	2,23	2,23	2,27	2,30	2,34	2,31	2,19	2,28	2,25	2,28	2,28	2,26	2,27	2,29	2,25	2,27	2,65	2,72
	Soma T	8,00																				
	^{VI} Al	0,40	0,37	0,34	0,56	0,43	0,49	0,48	0,31	0,26	0,42	0,28	0,26	0,24	0,26	0,32	0,31	0,25	0,29	0,26	0,34	0,22
	Ti	0,31	0,34	0,34	0,32	0,40	0,37	0,34	0,40	0,47	0,30	0,41	0,43	0,44	0,41	0,37	0,40	0,41	0,40	0,41	0,27	0,35
	Fe total	4,33	4,29	4,35	4,05	4,07	4,10	4,12	4,23	4,20	4,19	4,54	4,50	4,53	4,56	4,56	4,55	4,61	4,55	4,57	5,21	5,24
	Mg	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,46	0,51	0,52	0,51	0,56	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,38	0,40
	Mn	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
	Soma O	5,60	5,57	5,59	5,48	5,45	5,49	5,53	5,54	5,51	5,55	5,60	5,57	5,58	5,60	5,61	5,60	5,62	5,59	5,59	6,25	6,25
	Ca	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
	Na	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04	0,04	0,01	0,03
	K	1,87	1,85	1,87	1,85	1,88	1,88	1,86	1,85	1,85	1,85	1,84	1,86	1,86	1,85	1,85	1,82	1,83	1,83	1,85	1,19	1,16
	Soma A	1,91	1,90	1,91	1,90	1,93	1,91	1,89	1,92	1,90	1,87	1,87	1,89	1,90	1,88	1,87	1,86	1,86	1,87	1,90	1,20	1,21
	F	0,64	0,57	0,60	0,51	0,37	0,35	0,69	0,74	0,62	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	OH	5,76	5,50	5,68	5,73	5,26	5,35	3,78	5,46	4,54	4,52	3,72	5,49	5,02	4,66	4,39	5,14	4,44	3,88	4,85	7,50	7,52
	Cl	0,08	0,09	0,09	0,09	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,08	0,08
	Mg/(Mg+Fe)	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
	Al total	2,69	2,65	2,62	2,79	2,66	2,75	2,77	2,66	2,58	2,62	2,56	2,51	2,52	2,53	2,58	2,58	2,54	2,54	2,53	3,00	2,94
	Fe/(Fe+Mg)	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93

Tabela 4 - Composições químicas representativas das biotitas do Granito Gradaús.

Continuação

Facies	BSG																			
	Amostra	FC-10									FC-14									
Análise nº	1-1	1-2	1-4	1-6	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-1	1-2	1-3
SiO ₂	34,75	34,12	33,51	33,56	34,97	35,20	35,22	33,61	34,86	35,26	34,23	35,17	36,15	35,75	35,71	36,03	36,12	35,85	36,02	36,17
TiO ₂	1,22	0,76	2,97	1,58	3,84	4,41	3,92	2,85	3,99	3,43	2,73	2,84	3,11	2,86	2,96	3,37	3,21	3,29	3,36	2,97
Al ₂ O ₃	15,50	15,60	15,40	15,79	14,26	13,79	14,12	14,92	14,16	14,63	16,80	16,72	16,36	16,76	16,29	16,40	16,58	16,40	16,31	16,46
FeO	33,20	33,67	33,37	33,07	30,23	31,10	30,94	32,42	30,68	31,08	28,15	28,67	28,02	27,98	28,17	27,20	27,86	28,52	28,15	27,99
MgO	1,62	1,72	1,78	1,62	1,57	1,59	1,65	1,64	1,50	1,54	1,45	1,67	1,62	1,74	1,69	1,68	1,71	1,59	1,62	1,70
MnO	0,32	0,29	0,32	0,24	0,51	0,52	0,50	0,35	0,41	0,30	0,33	0,37	0,35	0,33	0,36	0,43	0,46	0,51	0,50	0,49
CaO	0,00	0,00	0,09	0,06	0,09	0,07	0,04	0,10	0,01	0,04	0,12	0,02	0,04	0,03	0,01	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02
Na ₂ O	0,03	0,05	0,10	0,15	0,09	0,09	0,08	0,04	0,05	0,03	0,19	0,12	0,12	0,08	0,07	0,08	0,07	0,04	0,06	0,05
K ₂ O	8,50	8,10	6,78	7,70	8,60	8,59	8,49	7,40	8,52	8,34	8,13	8,58	9,36	8,92	9,05	9,29	9,30	9,16	9,31	9,18
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,42	0,46	0,47	0,47	0,54	0,53	0,43	0,61	0,50	0,51
Cl	0,49	0,51	0,24	0,24	0,30	0,28	0,29	0,26	0,34	0,28	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,18	0,19
H ₂ O	4,43	5,24	5,48	5,87	5,52	4,26	4,62	6,34	4,58	5,01	7,44	5,28	4,43	5,05	4,93	5,03	4,03	4,04	4,25	4,47
Subtotal	100,05	100,05	100,02	99,88	99,97	99,96	99,88	99,95	99,09	99,95	100,14	100,08	100,19	100,14	99,96	100,25	99,97	100,19	100,25	100,18
O=F,Cl	0,11	0,11	0,05	0,05	0,07	0,09	0,07	0,06	0,08	0,06	0,22	0,23	0,24	0,24	0,27	0,26	0,22	0,29	0,25	0,26
Total	99,94	99,94	99,97	99,83	99,90	99,87	99,81	99,89	99,01	99,89	99,92	99,85	99,95	99,90	99,69	99,99	99,75	99,90	100,00	99,92
Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 22 átomos de oxigênio																				
Si	5,67	5,63	5,49	5,55	5,70	5,69	5,70	5,56	5,69	5,71	5,60	5,67	5,74	5,70	5,75	5,71	6,87	5,69	5,71	5,74
^{IV} Al	2,33	2,37	2,51	2,45	2,30	2,31	2,30	2,44	2,31	2,29	2,40	2,33	2,26	2,30	2,25	2,29	1,13	2,31	2,29	2,26
Soma T	8,00																			
^{VI} Al	0,64	0,66	0,46	0,62	0,44	0,31	0,39	0,48	0,41	0,51	0,83	0,85	0,80	0,84	0,85	0,78	2,58	0,76	0,76	0,82
Ti	0,15	0,09	0,37	0,20	0,47	0,54	0,48	0,36	0,49	0,42	0,34	0,35	0,37	0,34	0,36	0,40	0,46	0,39	0,40	0,35
Fe total	4,53	4,64	4,57	4,57	4,12	4,20	4,19	4,49	4,19	4,21	3,92	3,78	3,71	3,75	3,67	3,69	0,00	3,78	3,73	3,72
Mg	0,39	0,42	0,43	0,40	0,38	0,38	0,40	0,41	0,36	0,37	0,35	0,40	0,38	0,41	0,41	0,40	0,49	0,38	0,38	0,40
Mn	0,04	0,04	0,04	0,03	0,07	0,07	0,07	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07
Soma O	5,76	5,86	5,88	5,82	5,48	5,50	5,53	5,77	5,51	5,55	5,49	5,42	5,32	5,40	5,33	5,33	3,60	5,38	5,34	5,36
Ca	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Na	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,06	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
K	1,77	1,70	1,42	1,62	1,79	1,77	1,75	1,56	1,77	1,72	1,70	1,77	1,90	1,81	1,86	1,88	2,25	1,86	1,88	1,86
Soma A	1,78	1,72	1,46	1,68	1,83	1,81	1,79	1,59	1,79	1,74	1,78	1,81	1,94	1,84	1,88	1,91	2,28	1,87	1,90	1,88
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,22	0,23	0,23	0,24	0,28	0,26	0,26	0,30	0,25	0,26
OH	4,81	5,76	5,99	6,47	6,00	4,59	4,99	7,00	4,98	5,42	8,11	5,68	4,69	5,37	5,30	5,32	5,10	4,28	4,49	4,73
Cl	0,14	0,14	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05
Mg/(Mg+Fe)	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	1,00	0,09	0,09	0,10
Al total	2,98	3,03	2,97	3,08	2,74	2,63	2,69	2,91	2,72	2,79	3,24	3,18	3,06	3,15	3,09	3,06	3,71	3,07	3,05	3,08
Fe/(Fe+Mg)	0,92	0,92	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,90

Tabela 4 - Composições químicas representativas das biotitas do Granito Gradaús.

Continuação

Facies	BASG														
	Amostra	TL-19					TL-21								
		Análise nº	1-5	1-6	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-3	3-4	3-5
	SiO ₂	35,71	31,52	30,31	34,13	34,14	34,42	34,81	34,18	34,69	34,69	33,21	34,73	34,22	34,82
	TiO ₂	3,15	1,86	2,86	3,67	2,55	2,91	3,76	3,57	3,36	3,96	2,44	2,66	3,78	3,96
	Al ₂ O ₃	11,48	12,59	14,10	12,44	12,33	12,26	12,37	12,46	12,39	12,42	12,79	12,33	12,32	12,33
	FeO	33,03	37,62	37,05	34,03	34,61	33,97	32,93	33,15	33,09	33,02	35,68	34,05	33,23	32,64
	MgO	3,21	2,20	2,60	2,02	1,98	2,56	2,51	2,56	2,71	2,49	2,57	2,57	2,11	2,75
	MnO	0,21	0,35	0,30	0,25	0,16	0,21	0,20	0,21	0,17	0,21	0,23	0,17	0,19	0,23
	CaO	0,08	0,35	0,27	0,12	0,12	0,03	0,00	0,07	0,03	0,03	0,02	0,03	0,59	0,02
	Na ₂ O	0,05	0,06	0,08	0,12	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,05	0,03	0,02	0,05	0,08
	K ₂ O	8,19	4,52	4,65	7,87	8,10	8,33	8,65	8,32	8,38	8,43	7,22	8,31	8,54	8,65
	F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00
	Cl	0,50	0,25	0,20	0,39	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,37	0,32	0,39	0,38	0,37
	H ₂ O	4,32	8,51	7,60	4,91	5,64	4,80	4,20	4,97	4,63	4,40	5,41	4,79	4,25	4,08
	Subtotal	99,91	99,85	100,03	99,95	100,09	99,95	99,86	99,91	99,84	100,07	99,94	100,03	100,01	99,93
	O=F,Cl	0,11	0,06	0,05	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,23	0,08
	Total	99,80	99,79	99,98	99,86	99,99	99,86	99,77	99,82	99,76	99,99	99,87	99,94	99,78	99,85
	Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 22 átomos de oxigênio														
	Si	5,83	5,48	5,19	5,65	5,71	5,69	5,69	5,65	5,70	5,67	5,56	5,73	5,64	5,68
	^{IV} Al	2,17	2,52	2,81	2,35	2,29	2,31	2,31	2,35	2,30	2,33	2,44	2,27	2,36	2,32
	Soma T	8,00													
	^{VI} Al	0,04	0,05	0,04	0,07	0,14	0,08	0,08	0,07	0,10	0,07	0,08	0,13	0,03	0,05
	Ti	0,39	0,24	0,37	0,46	0,32	0,36	0,46	0,44	0,41	0,49	0,31	0,33	0,47	0,49
	Fe total	4,51	5,47	5,31	4,71	4,84	4,70	4,51	4,58	4,55	4,51	4,99	4,70	4,58	4,45
	Mg	0,78	0,57	0,66	0,50	0,49	0,63	0,61	0,63	0,66	0,61	0,64	0,63	0,52	0,67
	Mn	0,03	0,05	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
	Soma O	5,75	6,39	6,42	5,77	5,82	5,81	5,69	5,75	5,75	5,70	6,05	5,81	5,62	5,68
	Ca	0,01	0,07	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,10	0,00
	Na	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
	K	1,71	1,00	1,02	1,66	1,73	1,76	1,81	1,75	1,76	1,76	1,54	1,75	1,80	1,80
	Soma A	1,73	1,09	1,09	1,72	1,76	1,78	1,82	1,78	1,77	1,78	1,55	1,76	1,92	1,83
	F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00
	OH	4,71	9,87	8,68	5,42	6,29	5,30	4,59	5,47	5,07	4,80	6,04	5,27	4,67	4,43
	Cl	0,14	0,07	0,06	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,11	0,11	0,10
	Mg/(Mg+Fe)	0,15	0,09	0,11	0,10	0,09	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,10	0,13
	Al total	2,21	2,58	2,85	2,43	2,43	2,39	2,39	2,43	2,40	2,39	2,52	2,40	2,39	2,37
	Fe/(Fe+Mg)	0,85	0,91	0,89	0,90	0,91	0,88	0,88	0,88	0,87	0,88	0,89	0,88	0,90	0,87

Tabela 5 - Novas composições químicas representativas das biotitas dos granitos Cigano e Antônio Vicente obtidas neste trabalho.

GRANITO CIGANO																GRANITO ANTONIO VICENTE					
Facies	BMG															ABMG					
Amostra	CIG-34C															IE-04					
Análise nº	1-1	1-2	1-3	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	4.4	1.1	1.2	1.4	1.5	1.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
SiO ₂	34,82	35,51	35,35	35,39	35,49	35,57	35,57	35,44	35,62	35,19	35,42	35,55	35,18	35,16	35,39	33,73	34,48	34,55	35,05	34,68	34,65
TiO ₂	3,03	3,54	3,64	3,76	3,65	3,73	3,71	3,69	3,63	3,86	3,71	3,68	3,74	3,69	3,73	0,30	3,91	3,63	3,65	1,90	2,12
Al ₂ O ₃	13,14	12,89	12,92	12,79	12,61	12,54	12,54	13,06	12,49	12,91	13,11	12,70	12,85	12,79	12,89	14,40	12,47	12,42	12,32	12,52	12,48
FeO	29,85	29,94	29,99	30,08	29,94	29,85	29,33	29,62	29,64	29,99	29,74	30,01	29,63	30,04	30,04	30,35	29,87	30,34	30,14	31,04	30,97
MgO	4,54	4,53	4,61	4,63	4,66	4,74	4,82	4,71	5,00	4,55	4,59	4,77	4,54	4,57	4,60	4,94	4,87	4,79	4,80	5,20	5,23
MnO	0,22	0,25	0,26	0,24	0,25	0,22	0,23	0,21	0,24	0,27	0,22	0,27	0,28	0,23	0,21	0,17	0,21	0,21	0,25	0,22	0,21
CaO	0,01	0,03	0,01	0,00	0,04	0,03	0,01	0,09	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,04	0,02	0,14	0,29	0,04	0,01	0,08	0,03
Na ₂ O	0,05	0,13	0,06	0,13	0,13	0,11	0,14	0,06	0,10	0,09	0,09	0,15	0,20	0,18	0,13	0,14	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
K ₂ O	8,80	8,90	9,00	9,02	9,00	8,95	8,99	8,94	8,93	9,11	9,16	9,01	9,11	8,94	9,10	4,91	7,71	8,14	8,48	7,37	7,56
F	0,66	0,72	0,62	0,65	0,69	0,72	0,79	0,69	0,77	0,64	0,63	0,43	0,48	0,38	0,38	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00
Cl	0,75	0,53	0,57	0,46	0,56	0,52	0,50	0,57	0,43	0,58	0,55	0,45	0,40	0,40	0,44	0,07	0,29	0,35	0,43	0,45	0,49
H ₂ O	1,03	3,34	3,08	3,09	3,17	2,78	3,60	3,15	3,17	3,13	3,01	3,05	3,57	3,59	3,03	10,60	5,66	5,52	4,68	6,35	6,12
Subtotal	96,89	100,29	100,11	100,23	100,18	99,76	100,24	100,23	100,04	100,32	100,23	100,09	99,99	100,00	99,96	99,75	99,82	100,07	99,87	99,84	99,90
O=F,Cl	0,45	0,42	0,39	0,38	0,42	0,42	0,45	0,42	0,42	0,40	0,39	0,28	0,29	0,25	0,26	0,02	0,07	0,10	0,10	0,10	0,11
Total	96,44	99,87	99,72	99,85	99,76	99,34	99,79	99,81	99,62	99,92	99,84	99,81	99,70	99,75	99,70	99,73	99,75	99,97	99,77	99,74	99,79
Número de cátions por unidade de fórmula baseado em 22 átomos de oxigênio																					
Si	5,66	5,68	5,66	5,66	5,69	5,69	5,71	5,66	5,70	5,63	5,65	5,67	5,65	5,65	5,65	5,71	5,62	5,64	5,68	5,72	5,71
^{IV} Al	2,34	2,32	2,34	2,34	2,31	2,31	2,29	2,34	2,30	2,37	2,35	2,33	2,35	2,35	2,35	2,29	2,38	2,36	2,32	2,28	2,29
Soma T	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00															
^{VI} Al	0,17	0,12	0,10	0,07	0,07	0,06	0,08	0,12	0,06	0,07	0,12	0,06	0,09	0,07	0,08	0,59	0,02	0,03	0,03	0,16	0,13
Ti	0,37	0,43	0,44	0,45	0,44	0,45	0,45	0,44	0,44	0,47	0,45	0,44	0,45	0,45	0,45	0,04	0,48	0,45	0,45	0,24	0,26
Fe total	4,06	4,01	4,01	4,02	4,01	4,00	3,93	3,95	3,97	4,01	3,97	4,00	3,98	4,04	4,01	4,30	4,07	4,14	4,09	4,28	4,27
Mg	1,10	1,08	1,10	1,10	1,11	1,13	1,15	1,12	1,19	1,09	1,09	1,13	1,09	1,09	1,10	1,25	1,18	1,17	1,16	1,28	1,28
Mn	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Soma O	5,73	5,67	5,68	5,67	5,67	5,66	5,64	5,66	5,68	5,67	5,65	5,68	5,64	5,68	5,67	6,20	5,79	5,81	5,76	5,98	5,97
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,05	0,01	0,00	0,01	0,01
Na	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
K	1,82	1,82	1,84	1,84	1,84	1,83	1,84	1,82	1,82	1,86	1,87	1,83	1,87	1,83	1,85	1,06	1,60	1,69	1,75	1,55	1,59
Soma A	1,84	1,86	1,86	1,88	1,88	1,87	1,88	1,86	1,85	1,89	1,89	1,89	1,93	1,89	1,90	1,13	1,68	1,72	1,77	1,58	1,61
F	0,34	0,36	0,31	0,33	0,35	0,36	0,40	0,35	0,39	0,33	0,32	0,22	0,24	0,19	0,19	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
OH	1,11	3,56	3,29	3,29	3,39	2,97	3,85	3,35	3,39	3,34	3,21	3,24	3,82	3,84	3,23	11,97	6,16	6,01	5,06	6,99	6,72
Cl	0,21	0,14	0,15	0,12	0,15	0,14	0,14	0,15	0,12	0,16	0,15	0,12	0,11	0,11	0,12	0,02	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14
Mg/(Mg+Fe)	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23
Al total	2,52	2,43	2,44	2,41	2,38	2,36	2,37	2,46	2,36	2,44	2,47	2,39	2,43	2,42	2,43	2,88	2,40	2,39	2,35	2,43	2,42
Fe/(Fe+Mg)	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,78	0,77	0,79	0,78	0,78	0,79	0,79	0,79	0,78	0,77	0,78	0,78	0,77	0,77

6. DISCUSSÃO

6.1 CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO

Geobarometria com base no conteúdo de Al_t do anfibólio

Geobarômetros de Al em hornblenda têm sido amplamente utilizados para estimar pressões de cristalização de rochas granitoides. Ao longo dos anos, esses geobarômetros vêm sofrendo modificações e ajustes em suas calibrações na tentativa de diminuir diferenças e gerar resultados mais precisos e próximos da pressão de colocação real dos corpos granitoides. A grande maioria deles considera temperatura ou temperatura e pressão como principais responsáveis pelas mudanças no conteúdo de Al_t dos anfibólios e, conseqüentemente, nas pressões finais de colocação (Hammarstrom & Zen 1986, Hollister *et al.* 1987, Johnson & Rutherford 1989, Blundy & Holland 1990, Schmidt 1992, Anderson & Smith 1995). Segundo Anderson & Smith (1995), temperatura e fugacidade de oxigênio são fatores limitantes para o cálculo das pressões e devem ser avaliados antes da aplicação do geobarômetro. Rochas formadas a baixas fugacidades de oxigênio e com razões Fe/Mg ($(Fe_t/(Fe_t+Mg)) > 0,65$ não devem ser utilizadas, pois podem ter seus conteúdos de Al_t afetados e fornecer um aumento aparente da pressão. Geobarômetros mais recentes (Ridolfi *et al.* 2010, Ridolfi & Rezzulli 2012) não se mostraram consistentes, segundo Erdmann *et al.* (2014), uma vez que as pressões obtidas dependiam mais das variações composicionais do magma do que dos efeitos da pressão. Mutch *et al.* (2016) desenvolveram um novo geobarômetro do Al na hornblenda para rochas graníticas utilizando uma grande quantidade de dados experimentais da literatura, além de dados obtidos por eles. As análises dos anfibólios devem ser realizadas nas bordas dos cristais em contato com o plagioclásio e estar em aparente equilíbrio textural com os demais minerais. A assembleia mineralógica deve conter anfibólio, plagioclásio (An₁₅₋₈₀), biotita, quartzo, álcali feldspato, ilmenita/titanita, magnetita e apatita. A calibração foi efetuada para temperaturas próximas a do *solidus* (725±75 °C) e a pressões entre 0,8 e 10,0 kbar.

Apesar dos anfibólios do Granito Gradaús apresentarem razões Fe/Mg bem acima (0,77 a 0,90) do intervalo recomendado para utilização como geobarômetro (0,40 – 0,65), conforme Anderson & Smith (1995), a Figura 14 mostra os intervalos das pressões de cristalização estimadas para plúton Gradaús e outros granitos utilizados para comparação, e a Tabela 6 as fórmulas utilizadas. Foram utilizados os geobarômetros empírico de Hammarstrom & Zen (1986) e experimentais de Blundy & Holland (1990), Schmidt (1992) e Mutch *et al.*

(2016). Os geobarômetros de Blundy & Holland (1990) e Schmidt (1992), o primeiro considerando pressão e temperatura como responsáveis pelas mudanças no Al_t dos anfibólios, e o segundo essencialmente a pressão, forneceram valores muito próximos (2,7 a 4,6 kbar e 2,8 a 4,6, respectivamente, com média de 3,7 kbar), indicando que temperatura e pressão exerceram influência nos valores de Al . O geobarômetro de Hammarstron & Zen (1986) forneceu valores comparativamente inferiores (2,3 a 4,2 Kbar, com média de 3,3 kbar).

Utilizando o geobarômetro de Mutch *et al.* (2016), as rochas do Granito Gradaús forneceram pressões de colocação entre 2,4 e 3,6 kbar, com média de 3,0 kbar e, embora inferiores as dos outros geobarômetros, devem estar também superestimadas (Figura 14). Entretanto, esses valores devem ser os mais adequados, tendo em vista este geobarômetro envolver um maior número de variáveis e cobrir intervalos mais amplos de pressão (0,8 a 10,0 kbar). Além disso, os elevados valores de Fe/Mg de anfibólios e biotitas, a baixa ocorrência de magnetita (<10 wt.%), ausência de titanita magmática e os valores moderados a baixos de suscetibilidade magnética (< $3,53 \times 10^{-3}$ SIv) do Granito Gradaús (Carvalho 2017) sugerem cristalização em condições moderadas a reduzidas e a baixas profundidades (cf. Dall'Agnol *et al.* 2005, Mesquita 2018).

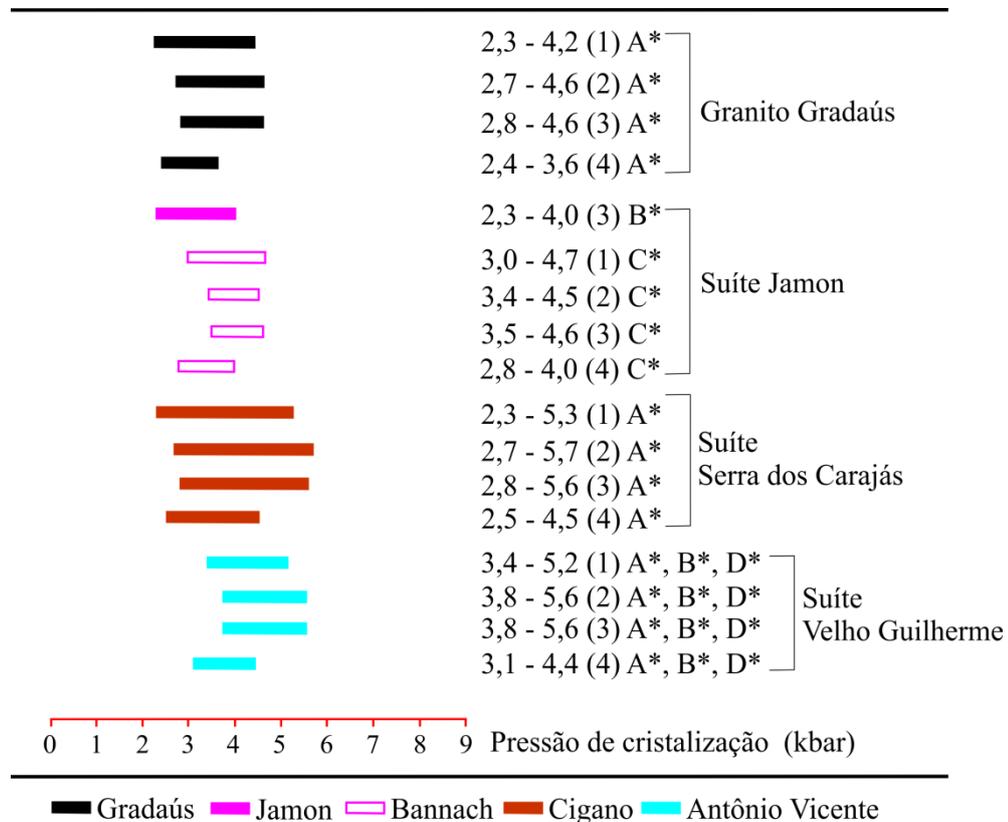


Figura 14 - Intervalos de pressão de cristalização do Granito Gradaús e outros granitos anorogênicos da Província Carajás calculados com base nos geobarômetros de: (1) Hammarstron & Zen (1986); (2) Blundy & Holland (1994); (3) Schmidt (1992); (4) Mutch *et al.* (2016). A* Este estudo, B* Dall'Agnol *et al.* (2005), C* Mesquita (2018), D* Teixeira (1999).

Tabela 6 - Fórmulas dos geobarômetros (em kbar) utilizados para cálculos das pressões de cristalização do Granito Gradaús.

Hammarstron & Zen (1986) *	$3.92+5.03*Al_t$
Blundy & Holland (1994) #	$5.03*Al_t - 3.53$
Schmidt (1992) #	$4.7*Al_t - 3.01$
Mutch <i>et al.</i> (2016) #	$0.5 + 0.331*Al_t + 0.995*(Al_t)^2$

* Empírico # Experimental

Temperatura

Para o cálculo dos intervalos de temperatura do Granito Gradaús foram utilizados os geotermômetros experimentais de Watson & Harrison (1983), cujas temperaturas próximas do *liquidus* são obtidas com o geotermômetro de saturação em Zr, e o empírico de Ridolfi *et al.* (2010), onde as temperaturas são estimadas com base na composição dos anfibólios.

Geralmente, em rochas peraluminosas ou metaluminosas, o zircão é uma fase magmática cristalizada precocemente, permitindo assim, usar a concentração de zircônio na rocha como geotermômetro. Essa hipótese assume que o magma estava saturado nesse elemento. Watson & Harrison (1983) desenvolveram, a partir de estudos experimentais, uma relação para estimar a solubilidade de Zr no magma necessária para a saturação do zircão, por meio da temperatura (T) e composição do líquido (M):

$$\ln D_{Zr} = (-3,80 - [0,85(M - 1)]) + 12900/T \quad (1)$$

Onde D_{Zr} é o coeficiente de distribuição de Zr entre zircão e líquido magmático (~476,000 ppm); M é a proporção catiônica $(Na + K + (2Ca))/(Al \cdot Si)$ em rocha total; e (T) a temperatura dada em graus Kelvin. Mais recentemente, Miller *et al.* (2003) admitiram que a temperatura de saturação em zircônio obtida através da composição de rocha total apresenta estimativas mínimas de temperatura caso o magma seja subsaturado, e máximas se o magma for saturado e propuseram um novo geotermômetro:

$$T_{Zr} = 12,900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496,000/Zr_{\text{melt}})] \quad (2)$$

Utilizando-se esta equação, foram obtidas temperaturas iniciais para o Granito Gradaús entre 870°-780 °C (Tabela 7). O valor máximo 870°C é consistente com temperaturas próximas do *liquidus* para granitos tipo-A (King *et al.* 1997, Frost *et al.* 1999, Dall'Agnol *et al.* 1999b, Klimm *et al.* 2003). Além disso, há evidências petrográficas de que o zircão cristalizou como fase inicial na evolução magmática do Granito Gradaús, pois cristais euédricos de zircão ocorrem inclusos em anfibólio, biotita e plagioclásio.

Ridolfi *et al.* (2010) e Ridolfi & Rezulli (2012) revisaram equações termobarométricas disponíveis na literatura e apresentaram modelos de calibração empíricos para estimar a temperatura usando as concentrações dos principais óxidos presentes nos anfibólios, com padrão de erro de $\geq 50^\circ\text{C}$. Este modelo é recomendado para anfibólios cristalizados a partir de magmas com elevado ou baixo conteúdo de H_2O , derivados de magmas cálcio-alcálicos a alcálicos, que evoluíram em condições desde moderadamente reduzidas a moderadamente oxidadas.

$$T (^{\circ}\text{C}) = -151,487\text{Si}^* + 2,041 \quad (3)$$

Onde:

$$\text{Si}^* = \text{Si} + (\text{Al}^{\text{IV}}/15) - (2\text{Ti}^{\text{IV}}) - (\text{Al}^{\text{VI}}/2) - (\text{Ti}^{\text{VI}}/1,8) + (\text{Fe}^{3+}/9) + (\text{Fe}^{2+}/3,3) + (\text{Mg}/26) + (\text{Ca}^{\text{B}}/5) + (\text{Na}^{\text{B}}/1,3) - (\text{Na}^{\text{A}}/15) + ([\text{I}]^{\text{A}}/2,3)$$

O geotermômetro de Ridolfi *et al.* (2010) forneceu temperaturas entre $749 - 807^\circ\text{C}$ (Tabela 7) para o Granito Gradaús, com temperaturas máximas superpostas as do geotermômetro de saturação em Zr. Estudos experimentais de sistemas graníticos com baixo teor de flúor em anfibólio e biotita (Manning 1981, Naney 1983, Dall’Agnol *et al.* 1999) sugerem temperatura do *solidus* próxima de 700°C para sistemas graníticos. Portanto, os dados obtidos com geotermômetro de Ridolfi *et al.* (2010) para o Granito Gradaús seriam indicativos da temperatura do *solidus* e sugerem que sua temperatura final de cristalização ocorreu em um intervalo de $750 \pm 50^\circ\text{C}$.

Tabela 7 - Geotermômetros (em $^\circ\text{C}$) utilizados para cálculos das temperaturas de cristalização do Granito Gradaús.

Fácies	BASG		BMG		BSG	BMGP a BSGP	
	Min	Máx	Min	Máx	Máx	Min	Máx
Watson & Harrison (1983)	795	839	780	866	866	813	871
#							
Ridolfi <i>et al.</i> (2010)*	749	807	-	-	-	-	-

* Empírico # Experimental

Estimativas da fugacidade de oxigênio

A fugacidade de oxigênio (fO_2) exerce certa influência na química dos anfibólios; com o aumento da fugacidade de oxigênio anfibólios magmáticos tornam-se enriquecidos em Mg (Wones 1981). Por outro lado, anfibólios com razões Fe/Mg elevadas teriam se formado em condições de baixas fugacidade de oxigênio (Anderson & Smith 1995). Estudos desenvolvidos no Granito Gradaús identificaram a presença frequente de ilmenita > magnetita, esta última com conteúdos <1%, valores moderados a baixos de suscetibilidade magnética (entre $3,75 \times 10^{-5}$ e $3,53 \times 10^{-3}$, com média de $9,8 \times 10^{-4}$ SIv) e ausência de titanita magmática, permitindo classificá-lo como reduzido a moderadamente reduzido (Carvalho 2017). Os anfibólios identificados neste estudo são predominantemente Fe-edenitas, com razões Fe/Mg entre 0,77 e 0,90, confirmando seu caráter reduzido a moderadamente reduzido e cristalização a baixas fO_2 (Figura 15).

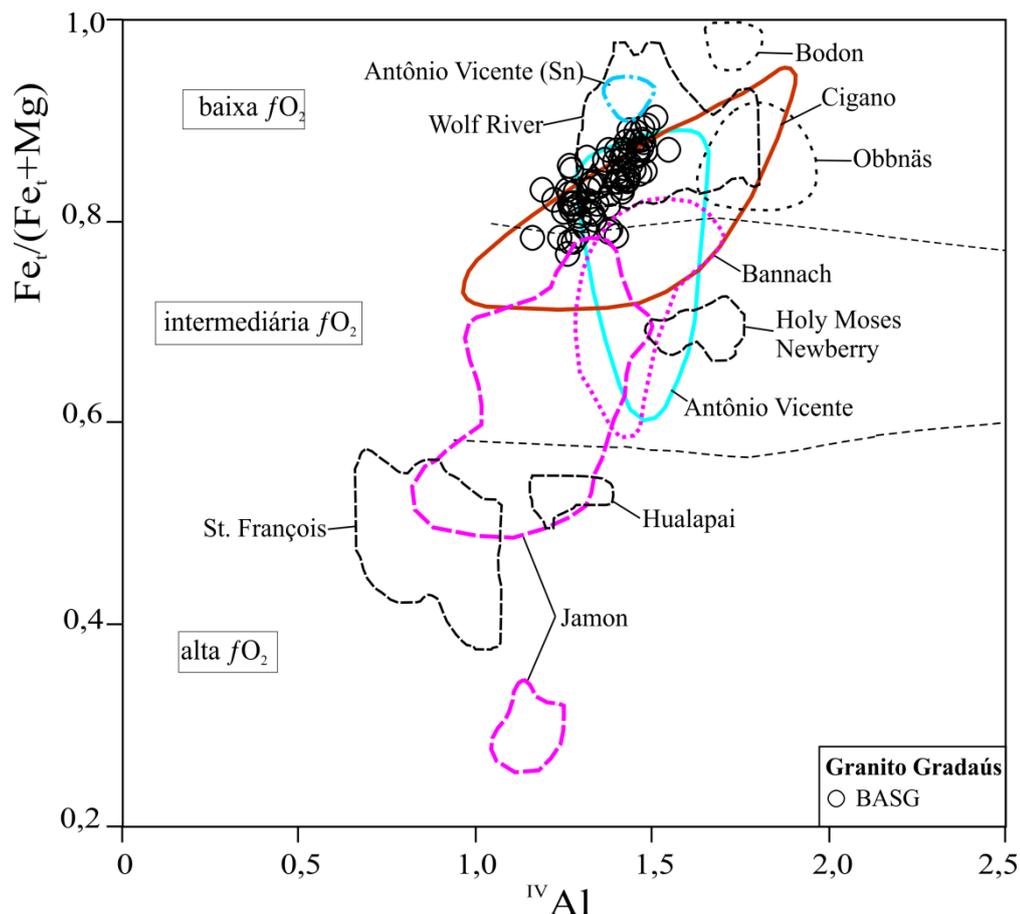


Figura 15 - Diagrama $Fe/(Fe+Mg)$ vs $IVAl$ (Anderson & Smith 1995) mostrando a distribuição dos anfibólios do Granito Gradaús e campos com a composição de anfibólios de granitos selecionados para comparação. BASG=biotita-anfibólio-sienogranito.

A Figura 16 mostra o comportamento do Granito Gradaús em termos de $\log fO_2$ vs temperatura. Para efeitos comparativos, foram colocados no diagrama os granitos Antônio Vicente, representativo da Suíte Velho Guilherme, Jamon, da Suíte Jamon, e Cigano, da Suíte Serra dos Carajás. É possível observar que a cristalização do Granito Gradaús evoluiu próximo ao campo de estabilidade da ilmenita e magnetita, entre os tampões NNO e FMQ. O Granito Cigano, com conteúdos de magnetita > ilmenita, se posiciona logo acima do Granito Gradaús, porém próximo ao campo de estabilidade da ilmenita e magnetita. O Granito Antônio Vicente, mineralizado em Sn, evoluiu no campo de estabilidade da ilmenita e fora do campo de equilíbrio da magnetita, logo abaixo do tampão FMQ, possibilitando a cristalização apenas de ilmenita em suas rochas. O Granito Jamon, por sua vez, contém magnetita e titanita magmática e teria evoluído em condições relativamente oxidadas, um pouco acima do tampão NNO (cf. Dall’Agnol *et al.* 2005).

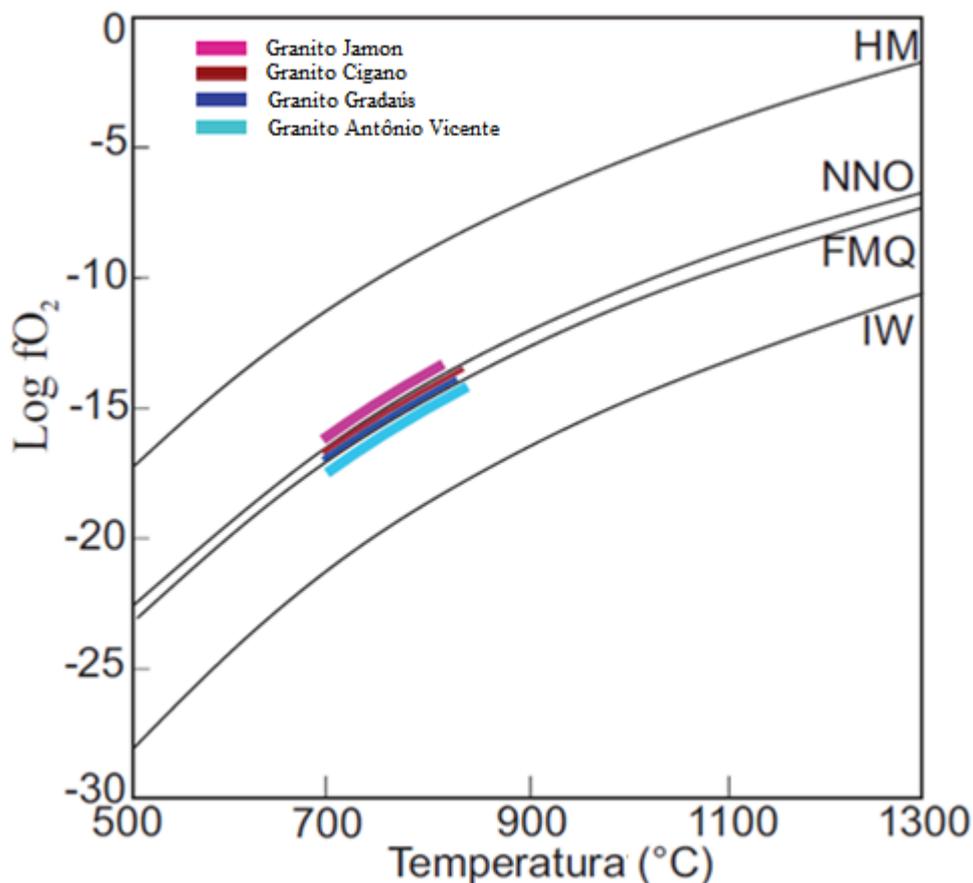


Figura 16 - Diagrama $\log fO_2$ vs T mostrando os possíveis intervalos de temperatura de formação e condições estimadas de fO_2 para os granitos Gradaús, Antônio Vicente, Jamon e Cigano. Curvas de estabilidade dos principais tampões e diferentes fases de Fe em função do estágio de oxidação no sistema Fe-Si-O baseado em Frost (1991). As linhas coloridas ilustram a evolução do granito Gradaús e dos demais granitos em comparação. IW = ferro-wustita; NNO = níquel-óxido de níquel; FMQ = fayalita-magnetita-quartzo; HM = magnetita-hematita. Fontes: Este estudo, Teixeira (1999), Dall’Agnol *et al.* (2005), Carvalho (2017).

6.2 COMPARAÇÃO COM OUTROS GRANITOS TIPO A PALEOPROTEROZOICOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS

Para efeitos comparativos, foram selecionados os granitos Jamon (Dall'Agnol *et al.* 2005) e Bannach (Mesquita 2018), pertencentes à Suíte Jamon, e os granitos Antônio Vicente (Teixeira 1999, este estudo) e Cigano (Dall'Agnol *et al.* 2005, este estudo), representantes das Suítes Velho Guilherme e Serra dos Carajás, respectivamente.

Comparativamente, o Granito Gradaús mostra maiores semelhanças com o Granito Cigano da Suíte Serra dos Carajás (Carvalho 2017). Seu mineral máfico principal é a biotita ferrosa (annita), com elevadas razões Fe/Mg (Fe_t/Fe_t+Mg), variando entre 0,81 e 0,96. Em sua fácies menos evoluída (BASG), predominam Fe-edenitas com razões Fe/Mg variando de 0,77 a 0,90, além de subordinadas hastingsitas e Fe-hornblendas. As biotitas do Granito Cigano apresentam razões Fe/Mg entre 0,77 a 0,87 e seus anfibólios são predominantemente Fe-edenitas, com valores de Fe/Mg similares às do Granito Gradaús (0,73 a 0,90; Dall'Agnol *et al.* 2005, este estudo), além de subordinadas hastingsitas (Figuras 9 e 11A).

Por outro lado, as biotitas dos granitos Jamon e Bannach são comparativamente mais empobrecidas em ferro e apresentam razões Fe/Mg variando de 0,60 a 0,70 e 0,72 a 0,81, respectivamente; a exceção são as biotitas dos leucomonzogranitos tardios do Granito Bannach, com valores de Fe/Mg entre 0,89 e 0,91, que se superpõem às biotitas do Granito Gradaús (Figura 11). Os anfibólios do Granito Jamon são edenitas e Fe-edenitas com razões Fe/Mg entre 0,47 a 0,65 nos hornblenda-biotita monzogranitos e 0,63 a 0,73 nos biotita monzogranitos (Dall'Agnol *et al.* 2005), bem inferiores a dos anfibólios do Granito Gradaús (Figura 15). Os anfibólios do Granito Bannach são Fe-edenitas com subordinadas hastingsitas, com razões Fe/Mg variando de 0,62 a 0,80 (Mesquita 2018),

As biotitas dos biotita monzogranitos e biotita sienogranitos do Granito Antônio Vicente acompanham aquelas do Granito Gradaús e dos leucomonzogranitos tardios do Granito Bannach ($Fe/Mg=0,84$ a 0,95; Figura 11). Os anfibólios do Granito Antônio Vicente são hastingsitas e Fe-edenitas com razões Fe/Mg entre 0,62-0,88 e $> 0,92$ nas rochas mineralizadas em Sn (Figuras 9 e 15; Dall'Agnol *et al.* 2005, este estudo).

Outro ponto de concordância é a ausência de titanita magmática no Granito Gradaús, similarmente ao observado no Granito Cigano, da Suíte Serra dos Carajás, onde este mineral é raro a ausente (Rios *et al.* 1995, Barros *et al.* 1995). O mesmo é observado nas rochas do Granito Antônio Vicente, mas neste caso estas estão mineralizadas em Sn. Por outro lado, nos

granitos da Suíte Jamon a presença de titanita magmática é uma fase comum (Dall'Agnol *et al.* 1999a, b, 2005, Oliveira 2001, Oliveira *et al.* 2009, Mesquita 2018).

A fO_2 , baseada nas composições dos anfibólios (Figuras 15 e 16), mostra que os granitos Gradaús, Cigano e Antônio Vicente evoluíram sob condições reduzidas a moderadamente reduzidas, com as rochas mineralizadas do Granito Antônio Vicente tendo se formado no campo de estabilidade da ilmenita, provavelmente um pouco abaixo do tampão FMQ (cf. Dall'Agnol *et al.* 2005). Por sua vez, os granitos Jamon e Bannach, mais enriquecidos em magnetita e titanita, formaram-se em condições mais oxidantes, acima do tampão NNO (cf. Dall'Agnol *et al.* 2005, Mesquita 2018).

Dall'Agnol *et al.* (1999c) obtiveram experimentalmente temperaturas entre 900-870°C para as rochas o Granito Jamon, incluindo os diques de dacito pórfiro associados (900°C). Temperaturas em torno de 870 °C foram estimadas para o início da cristalização dos hornblenda-biotita monzogranitos, com diminuição gradual para as fácies mais evoluídas; a temperatura do *solidus* para essas rochas foi estimada em ~700°C, equivalente às temperaturas encontradas para o Granito Gradaús (Tabela 7). De acordo com Dall'Agnol *et al.* (2005), os granitos Cigano e Antônio Vicente começaram a cristalizar a temperaturas um pouco mais baixas (~850°C), provavelmente pela ausência de clinopiroxênio e plagioclásio menos cálcico. Mesquita (2018), utilizando o geotermômetro do Zr (Watson & Harrison 1983) nas rochas do Granito Bannach, obtiveram temperaturas entre 943-845°C, consideradas próximas do *liquidus*, e com o geotermômetro do anfibólio-plagioclásio (Blundy & Holland 1990), valores de 807-732°C consideradas temperaturas do *solidus*.

Com relação à pressão de colocação, os geobarômetros empíricos e experimentais do Al em anfibólio utilizados indicaram pressões entre 2,3-4,6 kbar para o Granito Gradaús (Figura 14). No entanto, como esses anfibólios apresentaram razões Fe/Mg entre 0,77-0,90, bem acima do limite aceitável (0,40-0,65; cf. Anderson & Smith 1995), tais pressões devem estar superestimadas. Em decorrência disso admite-se o geobarômetro de Mutch *et al.* (2016), desenvolvido com um maior número de variáveis e intervalos mais amplos de pressão, como o mais indicado para a estimativa de pressão de colocação do Granito Gradaús (2,4-3,6 kbar).

Dall'Agnol *et al.* (2005) e Mesquita (2018), utilizando o geobarômetro do Al em anfibólio, estimaram pressões de cristalização de $3,2 \pm 0,7$ kbar e $3 \pm 0,5$ kbar para os granitos Jamon e Bannach, respectivamente. Estimativas de pressão obtidas neste trabalho para os granitos Cigano e Antônio Vicente, utilizando o geobarômetro de Mutch *et al.* (2016), forneceram valores de 2,5-4,5 kbar e 3,1-4,4 kbar. Entretanto, com base no alto contraste de viscosidade entre magmas graníticos e as rochas encaixantes de baixo grau metamórfico, além

da ausência de foliação e lineação, Dall’Agnol *et al.* (2005) admitem que os granitos Cigano e Antônio Vicente foram colocados a baixas pressões (2 ± 1 kbar e 1 ± 0.5 kbar, respectivamente).

A Tabela 8 resume os parâmetros de cristalização do Granito Gradaús e dos outros corpos utilizados para comparação.

Tabela 8 - Principais parâmetros de cristalização do Granito Gradaús e de outros plutons usados para comparação.

Granito	Facies	Fe/(Fe+Mg) Anf	Fe/(Fe+Mg) Bt	P(kbar)	T(C°)	Opacos
Gradaús (A)	BSG	0,77-0,90	0,9-0,93	2,4-3,6	700-870	Ilm>Mag
	BMG		0,88-0,94			
	BASG		0,85-0,91			
	BSGP		0,91-0,96			
	BMGP		0,81-0,94			
Suíte Jamon						
Bannach (C)	BAMGrG	0,68-0,81	0,72-0,78	3 ± 0.5	732-943	Mag>Ilm
	ABMGrG	0,68-0,83	0,79-0,81			
	BLMzG		0,72-0,81			
	BLMGMt		0,89-0,91			
Jamon (B)	ABMG	0,5-0,65	0,60-0,63	3.2 ± 0.7	700-870	Mag>Ilm
	BMG		0,65-0,70			
	BMcG		0,45-0,56			
Suíte Serra dos Carajás						
Cigano (A)	ABMG	0,73-0,90	0,81-0,87	2,5-4,5	761 - 842	Ilm>Mag
	BMG		0,77-0,80			
Suíte Intrusiva Velho Guilherme						
Antônio	BSG		0,84-0,89	3,1-4,4	778 - 842	Ilm>Mag
Vicente	ABMG	0,62-0,88	0,75-0,79			
(A,B,D)	BASAFG(Sn)	0,89-0,90	0,92-0,93			

Fontes: A* Este estudo, B* Dall’Agnol *et al.* (2005), C* Mesquita (2018), D* Teixeira (1999)

6.3 COMPARAÇÃO COM GRANITOS TIPO A DE OUTRAS PROVÍNCIAS.

Para comparação com granitos tipo A de outras províncias geológicas, foram escolhidos os batólitos mesoproterozoicos Wolf River, Holy Moses, Newberry, Hualapai e St. François dos EUA (Anderson 1980; Anderson & Bender 1989; Anderson & Smith 1995; Anderson & Morrison 2005) e os granitos rapakivi Bodon e Obbnäs, da Finlândia (Rämö & Haapala 1995; Kosunen 2004).

Os anfibólitos cálcicos do batólito Wolf River e dos granitos rapakivi da Finlândia apresentam composições similares as do Granito Gradaús, variando de Fe-edenita a hastingsita, associados à biotitas de composição annita; a ilmenita é o opaco dominante e a magnetita é rara ou ausente; são classificados como granitos da série ilmenita (Ishihara 1981); a exceção é o Granito Obbnäs, com um pouco mais de magnetita e levemente oxidado. Esses granitos mostram altas razões Fe/Mg (Figura 15) indicando cristalização em condições de baixa fugacidade de oxigênio, próximas ao tampão FMQ (Anderson and Smith 1995; Anderson *et al.* 2008); seriam derivados, provavelmente, de magmas reduzidos a moderadamente reduzidos (Rämö & Haapala 1995).

O geobarômetro do Al em anfibólio mostrou pressões de colocação em torno de 5 kbar para o batólito Wolf River (Anderson and Smith 1995), no entanto seus anfibólitos são ricos em ferro, o que torna tais anfibólitos inapropriados como geobarômetros. De acordo com Anderson & Smith (1995), a pressão de colocação do Granito Wolf River foi superestimada por um fator de 2 ou 3 vezes, sendo possível que a mesma se situe abaixo de 2 kbar. A temperatura estimada para o batólito Wolf River variou de 650 a 790°C (Anderson 1980), com valor mínimo próximo ao registrado para o Granito Gradaús. Com base nesses parâmetros, pode-se admitir que este pluton se formou em condições de pressão e temperatura semelhantes às do Granito Gradaús.

Os outros granitos mesoproterozoicos dos EUA (Holy Moses, Newberry, Hualapai e St. François) apresentam magnetita como principal mineral opaco e ilmenita subordinada, além de titanita primária em suas fácies petrográficas, e são inseridos na série magnetita (Ishihara 1981). Quando comparadas as razões Fe/Mg dos seus anfibólitos (Figura 15), o Granito Gradaús apresenta valores mais elevados, os granitos Holy Moses e Newberry mostram valores intermediários, similares aos encontrados nos anfibólitos do Granito Bannach e das rochas menos evoluídas do Granito Cigano, enquanto os granitos Hualapai e St. François possuem as menores razões Fe/Mg, indicando cristalização em condições mais oxidantes, assemelhando-se ao Granito Jamon.

7. CONCLUSÕES

O Granito Gradaús possui anfibólios cálcicos, predominantemente Fe-edenitas e, subordinadamente, hastingsitas e Fe-hornblendas, com razões Fe/Mg entre 0,77 e 0,90, confirmando seu caráter reduzido a moderadamente reduzido e cristalização a baixas fO_2 . Suas biotitas, primárias e reequilibradas, apresentam razões Fe/Mg variando de 0,81 a 0,96 e plotam próximas ao pólo da annita. Nos diagramas tipológicos, baseados na composição das biotitas, as do Granito Gradaús plotam nos campos dos granitos anorogênicos, confirmando os dados de rocha total obtidos por Carvalho (2017).

O geobarômetro do Al em anfibólio (Mutch *et al.* 2016) forneceu pressões de colocação entre 2,4 e 3,6 kbar. Entretanto, como os anfibólios do plúton estudado apresentam razões Fe/Mg superiores a 0,65 é possível que tais pressões estejam superestimadas (cf. Anderson & Smith 1995).

De acordo com geotermômetro de saturação em Zr o Granito Gradaús apresentou, temperaturas entre 780 e 870°C, consideradas próximas as do *liquidus*, enquanto o geotermômetro do anfibólio forneceu valores entre 700 a 750°C, admitidas como temperaturas do *solidus*.

As razões Fe/Mg elevadas dos anfibólio, a presença de ilmenita > magnetita e a ausência de titanita magmática, sugerem que o Granito Gradaús cristalizou sob condições moderadamente reduzidas a reduzidas, provavelmente entre os tampões NNO e FMQ.

Em comparação com outros granitos tipo A da Província Carajás, o Granito Gradaús apresentou maiores similaridades com os granitos Cigano, da Suíte Serra dos Carajás e Antônio Vicente, da Suíte Velho Guilherme; entretanto, este último é mineralizado em Sn e difere neste aspecto do Gradaús. Diferenças significativas foram observadas com os granitos oxidados Jamon e Bannach, da Suíte Jamon.

Quando comparado com granitos tipo A de outras províncias, o Granito Gradaús mostrou maiores similaridades com os granitos Wolf River dos EUA e os granitos rapakivi Bodon e Obbnäs, da Finlândia, cristalizados sob condições reduzidas. Outros granitos mesoproterozoicos dos EUA (Holy Moses, Newberry, Hualapai e St. François) diferem do Granito Gradaús, principalmente pelo caráter oxidado de suas rochas e se assemelham aos granitos Jamon e Bannach.

Os dados de química mineral de anfibólio e biotita, em conjunto com os parâmetros de cristalização (T, P e fO_2) obtidos e discutidos no presente trabalho, reforçam os estudos de Carvalho (2017) que, utilizando dados petrográficos, geoquímicos de rocha total e de

susceptibilidade magnética, apontam maiores similaridades do Granito Gradaús com as rochas da Suíte Serra dos Carajás.

REFERÊNCIAS

Abdel-Rahman A.M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal of Petrology*, **35**:525-541.

Abdel Fattah M. Abdel-Rahman A.M. 1996. Discussion on the Comment on Nature of Biotites in Alkaline, Calc-alkaline and Peraluminous Magmas. *Journal of Petrology*, **37**(5): 1031-1035.

Abrantes Jr. F.R. & Lamarão C.N. 2011. Petrografia e variação composicional de zircão do Granito Gradaús, Província Carajás, Centro-Sul do Pará. *In: SBGq, 13º Congresso Brasileiro de Geoquímica & 3º Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, Gramado. Anais. p. 713-716.*

Abreu F.A.M., Ramos C.R. 1974. Estanho do Sul do Pará. SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais **5**: 11-23.

Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An introduction. *Earth Science Review*, **17**: 1-29.

Almeida J.A.C., Dall'Agnol R, Oliveira D.C. 2006. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **31**:17-36.

Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite Suites: Evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, **120**:235-257.

Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG Suítes of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás province; Brazil. *Precambrian Research*, **187**:201-221.

Almeida, J.A.C., Dall'Agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite Suítes of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.

Anderson, J.L. 1980. Mineral equilibria and crystallization conditions in the late Precambrian Wolf River rapakivi massif. *American Journal of Science*, **280**: 289-332.

Anderson J.L., Barth A.P., Wooden J.L. Mazdab F. 2008. Thermometers and thermobarometers in granitic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**: 121-142.

- Anderson J.L., Bender E.E. 1989. Nature and origin of Proterozoic A-Type granitic magmatism in the southwestern United States of America. *In: Gorbatshev, R. (Ed.), Proterozoic Geochemistry. Lithos*, **23**: 19-52.
- Anderson J.L., Morrison J. 2005. Ilmenite, magnetite, and peraluminous Mesoproterozoic anorogenic granites of Laurentia and Baltica. *Lithos*, **80**: 45-60.
- Anderson J.L., Smith D.R. 1995. The Effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, **80**: 549-559.
- Armstrong J.T. 1988. Quantitative analysis of silicate and oxide minerals: Comparison of Monte Carlo, ZAF, and $\phi(\rho z)$ procedures, in *Microbeam Analysis – D.E. Newbury, ed.*, San Francisco Press, 239-246.
- Barbosa A.B., Lafon J.M., Neves A.P., Vale A.G. 1995. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: implicações para a evolução do magmatismo proterozoico da região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra*, Belém, **7**: 147-164.
- Barros C.E.M., Dall'agnol R., Vieira E.A.P., Magalhães M.S. 1995. Granito Central da Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, Belém, **7**:93-123.
- Blundy J.D., Holland T.J.B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. *Contributions Mineralogy Petrology*, **104**: 208-224.
- Bonova K., Broska I., Petrík I. 2010. Biotite from Cierna hora Mountains granitoids (Western Carpathians, Slovakia) and estimation of water contents in granitoid melts. *Geologica Carpathica*, **61**(1): 3-17.
- Carvalho T.A. 2017. *Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do granito Gradaús, Província Carajás, SE do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, 63 p.
- Cunha B.C.C., Santos D.B., Prado P. 1984. Contribuição ao estudo da estratigrafia da região dos Gradaús com ênfase no Grupo Rio Fresco. *In: 33º Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro. *Anais*. **2**:873-885.
- Cunha I. R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral Chemistry and Magnetic Petrology of the Archean Planalto Suíte, Carajás Province – Amazonian Craton: Implications for the Evolution of Ferroan Archean Granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**: 100-121.
- Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Magalhães M.S. 1993. Diagnostic features of the Tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, **65** (1): 33-50.
- Dall'Agnol R., Lafon J.M., Macambira, M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, **50**:113-138.

- Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999a. Petrology of the anorogenic; oxidized Jamon and Musa granites; Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, **46**:431–462.
- Dall'Agnol R., Costi, H.T., Leite, A.A., Magalhães, M.S., Teixeira, N.P. 1999b. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*, **95**:9-39.
- Dall'Agnol R., Scaillet B., Pichavant M. 1999c. Evolution of A-type granite magmas: an experimental study of the Lower Proterozoic Jamon Granite, eastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **40** (11):1673-1698.
- Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Rämö O.T., Moura C.A.V., Macambira M.J.B., Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, **80**: 101-129.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. In: Dall'Agnol, R., Rosa-Costa, L.T., Klein, E.L. (Eds.), Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, PRONEX-UFPA-SBGNO. 99–150 p. (Volume and Field Trip Guide).
- Dall'Agnol R. & Oliveira D.C. 2007. Oxidized, magnetite series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, **93**(3-4):215-233.
- Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J.P., Silva C.R.P, Santos R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – Implicações para a evolução arqueana da Província Carajás - Pará. In: SBG, 13° Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, Anais, CD-ROM.
- Dall'Agnol R., Cunha I.R.V., Guimarães F.V., Oliveira D.C., Teixeira M.F.B., Feio G.R.L., Lamarão C.N. 2017. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, **277**:3-32.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1992. Rock-forming Minerals, second ed. Longmans, London, p. 696.
- Dymek R.F. 1983. Titanium, aluminium and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses, West Greenland. *American Mineralogist*, **68**:880-889.
- Eby G.N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, **20**:641-644.
- Erdmann S., Martel C., Pichavant M., Kushnir A., 2014. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **167**:1-23.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the Mesoarchean granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás Province, Brazil: Implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, **154**: 33-52.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Oliveira D.C., Santos R.D., Santos P.A. 2013. Geochemistry, Geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite Suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos*, **151**:57-73.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implication for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **227**:157-185.

Foster M.D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U. S. Geol. Surv., Prof. Paper*, **354**:1-49.

Frost B.R. 1991. Introduction to oxygen fugacity and its petrologic importance. In: Lindsley D.H. (Ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, **25**:1-9.

Frost C.D.; Frost B.R. Chamberlain K.R. Edwards B. 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology*, **40**: 1771-1802.

Gabriel E.O. 2012. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética da porção nordeste de Água azul do norte, Província Carajás*. MS Dissertation. Belém: Instituto de Geociências - Universidade Federal do Pará. p. 117.

Gastal M.C.P. 1987. *Petrologia do Maciço Granítico Musa, Sudeste do Pará*. MS Dissertation, Universidade federal do Pará. Centro de Geociências, Belém, p. 316.

Giret A., Bonin B., Léger J.-M. 1980. Amphibole compositional trends in oversaturated and undersaturated alkaline plutonic Ring-Complexes. *Canadian Mineralogist*, **18**:481-495.

Guimarães F.V.G., Dall'agnol R., Almeida J.A.C., Oliveira M.A. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do trondhjemitó Mogno e tonalito Mariazinha, Terreno granito-greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**:196-211.

Guimarães, F. V., Dall'agnol, R., Oliveira, D. C., Silva, A. C., Teixeira, M. F. B., Santos, P. A., 2012. Geologia Preliminar da Porção Leste do Subdomínio de Transição da Província Carajás - PA. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos (SP), CD-rom.

Hammarstron J.M., Zen, E.A. 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, **71**:1297-1313.

Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin, R.F., Schumacher J.C., Welch, M.D. 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, **97**: 2031-2048.

Hollister L.S., Grisson G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, **72**:231-139.

Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization. In: SKINNER, B. J. (ed.) Economic Geology, **75th anniversary volume**:458-484.

Janousek, V., Farrow, C.M., Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, **47**:1255-1259.

Javier Rios F., Villas R.N.N., Fuzikawa K. 1994a. Estudo preliminar de Inclusões Fluidas (IF) em veios hidrotermais do Granito Cigano, Serra dos Carajás, PA. In: SBG, 38° Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, Boletim de resumos expandidos, p. 639-640.

Javier R.F., Villas R.N.N., Pimenta M.A. 1994b. Fluidos relacionados com o hidrotermalismo do Granito Musa (PA): indicações das Inclusões Fluidas (IF) em quartzo de veios mineralizados da Jazida de W de Pedra Preta. In: SBG, 38° Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, Boletim de resumos expandidos, p. 644-645.

Johnson M.C., Rutherford M.J. 1989. Experimental calibration of the aluminium-in hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, **17**:837-841.

King P.L., White A.J.R., Chappell B.W., Allen C.M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, **38**: 371-391.

Klimm K., Holtz F., Johannes W., King P.L. 2003. Fractionation of metaluminous A-type granites: an experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia. *Precambrian Research*, **124**:327-341.

Kosunen P.J. 2004. *Petrogenesis of Mid-Proterozoic A-type Granite: Case Studies from Fennoscandia (Finland) and Laurentia (New Mexico)*. PhD thesis. University of Helsinki, Departamento of Geology.

Lalonde A.E., Rancourt D.G., Chao G.Y. 1996. Fe-bearing trioctahedral micas from Mont Saint-Hilaire, Québec, Canada. *Mineralogical Magazine*, **60**:447-60.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R. 2004. Química mineral de anfibólios e biotitas e condições de cristalização de granitoides paleoproterozoicos da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:95-108.

Lamarão C.N., Pinho, S.C.C., Junior A.L.P., Toro M.A.G. 2012. 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*, **38**:159-173.

Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Schumacher J., Smith J.C., Stephenson, N.C.N. Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and Mineral names. *Mineralogical Magazine*, **61**:295-321.

Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J. 1999. Geoquímica e aspectos petrogenéticos do granito Xinguara, Terreno granito - greenstone de Rio Maria – Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **23**(3):429-436.

Leite A.A.S. *Geoquímica, petrogênese e evolução Estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico*. Phd Tesis. 2001. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Pós-Graduação em Geoquímica e Petrologia. p. 330.

Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Althoff F.J. 2004. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:447-458.

Lima P.H.A., Lamarão C.N., Santos M.J.P. 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*. **9**:47-72.

Macambira M.J.B. 1992. *Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est, exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajas, Brésil*. Phd Tesis, Université Montpellier II, França. p. 212.

Machado N., Lindenmayer Z. G., Krogh T. E., Lindenmayer, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**:329-354.

Manning D.A.C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb; *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **76**:206-215.

Mesquita C.J.S. 2018. *Química Mineral e Parâmetros de Cristalização do Granito Tipo A Paleoproterozoico Bannach, Província Carajás, Pará*. MS Dissertation. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. 150p.

Miller C.F., McDowell S.M., Mapes R.W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, **31**: 529-532.

Mutch E.J.F., Blundy J. D., Tattitch B. C., Cooper F.J., Brooker R. A. 2016. An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **171**:85.

Nachit H., Razafimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P. 1985. Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitóides. *Comptes Rendus l'Académie Geoscience*. Paris **301**:813-818.

Nachit H., Ibhi A., Abia E.H., Ohoud M.B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites. *Comptes Rendus l'Académie Geoscience*, 337.

Naney, M.T. 1983. Phase equilibria of rocks-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Mineralogy*, **283**: 993-1033.

Oliveira D.C. 2001. *Geologia, Geoquímica e Petrologia Magnética do Granito Paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade federal do Pará, Belém, p. 207.

Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Barros C.E.M, Vale A.G. 2005. Geologia e Petrografia do Granito Paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, Belém, **2** (1):155-172.

Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Silva J.B.C., Almeida J.A.C. 2008. Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons: implications for architecture and zoning of A-type granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **25**:100–115.

Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Barros C.E.M., Oliveira M.A. 2009. Geology, geochemistry and magmatic evolution of the Paleoproterozoic, anorogenic oxidized A-type Redenção granite of the Jamon Suíte, eastern Amazon Craton, Brazil. *Canadian Mineralogist*, **47** (6):1441-1468.

Oliveira D.C., Neves S.P., Trindade R.L.F., Dall'Agnol R., Mariano G., Correia P.B. 2010a. Magnetic anisotropy of the Redenção granite, eastern Amazonian craton (Brazil): Implications for the emplacement of A-type plutons. *Tectonophysics*, **493**:27-41.

Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Scaillet B. 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean Sanukitoid Rocks, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **51**:2121–2148.

Paiva Jr A.L., Lamarão C.N., Lima P.H.A. 2011. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Batólito Seringa, Província Carajás, SSE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **41**(2): 185-202.

Papoutsas, A., Pe-Piper, G., 2014. Geochemical variation of amphiboles in A-type granites as an indicator of complex magmatic systems: Wentworth pluton, Nova Scotia, Canada. *Chemical Geology*, 384: 120-134.

Pearce J.A, Harris N.B.W, Tindle A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, **25**: 956-983.

Pinho S.C.C. 2009. *Geologia, petrografia e geoquímica do granito Bom Jardim, Província Estanífera do Sul do Pará*. MS Dissertation, Pós-Graduação em Geoquímica e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal, Belém, p. 144.

Rämö O.T., Haapala I. 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineralogy and Petrology*, **52**:129–185.

- Ridolfi F., Renzulli A. 2012. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130°C and 2.2 GPa. *Contributions Mineralogy Petrology*, **163**:877-895.
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions Mineralogy Petrology*, **160**:45-66.
- Rieder M. 1998. Nomenclature of the micas. *Mineralogical Magazine*, **63**:267-279.
- Rios F. J., Villas R. N. N., Dall'agnol, R. 1995. O Granito Serra dos Carajás: I. Fácies Petrográficas e Avaliação do Potencial Metalogenético para Estanho no Setor Norte. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **25**: 20-31.
- Rocha Jr. G.L.D. 2004. *Caracterização petrográfica do Granito Paleoproterozóico Marajoara, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do estado do Pará*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Belém. p. 45.
- Rodrigues E.M.S., Lafon J.M., Scheller T. 1992. Geocronologia Pb-Pb em rochas totais da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: SBG, 37º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Boletim de Resumos Expandidos. **2**: 183-184.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**:453-488.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi, L.A. *et al.* (Ed.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 169-226 (in Portuguese).
- Santos J.S.O., Hartmann L.A., Faria M.S., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., Mcnaughton N.J. 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SBG, 9º Simpósio de geologia da Amazônia. Belém. Resumos Expandidos, CD-ROM.
- Santos P.J.L., Oliveira D.C. 2012. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas-Graníticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.
- Santos P.A., Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Lamarão C.N., Galarza M.A. 2013. Petrography, magnetic susceptibility and geochemistry of the Rio Branco Granite, Carajás Province, southeast of Pará, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **43**(1):2-15.
- Santos, M. N. S., Oliveira, D. C., 2015. Rio Maria Granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte, Carajás Province: Geology and petrological affinities. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Anais, Marabá-Pa, CDrom.
- Santos R.D., Galarza M.A., Oliveira D.C., 2012. Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium - Província Carajás, In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.

Schmidt M.W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **110**:304-310.

Schumacher J.C. 1997. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles. In: Leake, B.E. (Ed.), 1997. Nomenclature of Amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, **9**: 623-651.

Shand S.J. 1951. Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit. 4ed., London, p. 488.

Souza Z.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic constrast on the Archean evolution of the Rio Maria Granito-Greenstone Terrain and the Carajás Block. In: SYMPOSIUM ON ARCHEAN TERRANES OF SOUTH AMERICA PLATAFORM, Df, Brasília. Extended abstracts... SBG, p. 31-32.

Streckeisen A.L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, **12**: 1-33.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**: 174-182.

Tassinari C.C.G., Macambira M. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli, A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (EDS.). *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida*. São Paulo. p. 471-486.

Teixeira N.P. 1999. *Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. 1999. 508 f. Phd Tesis em Geologia e Geoquímica – Universidade de São Paulo, Centro de Geociências, São Paulo.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Moura C.A.V., Dall'Agnol R., Macambira E.M.B. 2002 Archean crustal sources for Paleoproterozoic tin-mineralized granites in the Carajás Province, SSE Pará, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Precambrian Research*, **119**: 257-275.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Dall'Agnol R., Moura C.A.V., Fernandes C.M.D.F., Pinho S.C.C. 2005. Geoquímica dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **35** (2): 217-226.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.R., 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. 2008. Unidade litoestratigráficas. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *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. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM. p. 113-215.

Vasquez M.L., Chaves C.L., Melo E.M., Oliveira J.KM. 2017. Geologia e Recursos Minerais das Folhas São Domingos – SB.21-Z-A-II e Jardim do Ouro – SB.21-Z-A-III. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Programa Geologia do Brasil, levantamentos geológicos básicos. p. 305.

Villas R.N.N. 1999. Granito Pojuca, Serra dos Carajás (PA): composição mineralógica, química mineral e controles químicos da alteração hidrotermal. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**(3):393- 404.

Watson E.B., Harrison T.M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, **64**:295-304.

Whalen J.W., Currie K.L., Chappel B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **95**: 407-419.

Wones D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *American Mineralogist*, **74**:744-749.

Wones, D.R., Eugster, H.P., 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and applications. *American Mineralogist*, **50**: 1228-1272.

CAPÍTULO 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trabalhos anteriores, envolvendo mapeamento geológico e amostragem sistemática, estudos petrográficos, geoquímicos e de suscetibilidade magnética, além de datação geocronológica realizados no Granito Gradaús (Abrantes Jr. & Lamarão 2011, Carvalho 2017) forneceram o suporte necessário para o desenvolvimento desta dissertação.

A química mineral de anfibólios e biotitas do Granito Gradaús permitiu, não apenas constatar que se trata de um corpo anorogênico, mas classificar seus anfibólios e biotitas como Fe-edenitas e annitas, predominantemente, com razões (Fe_t/Fe_t+Mg) elevadas, as quais indicam sua evolução em condições moderadamente reduzidas a reduzidas e a baixas fugacidade de oxigênio, podendo ser inserido na série Ilmenita.

Os geotermômetros de saturação em Zr e do anfibólio estimaram temperaturas do *liquidus* entre 780 e 870°C e do *solidus* entre 700 a 750°C, respectivamente, e pressões de colocação, baseada no geobarômetro do Al em anfibólio, entre 2,4 e 3,6 kbar. Entretanto, por se tratar de anfibólios com elevadas razões Fe/Mg ($> 0,65$), essas pressões provavelmente estão superestimadas.

O estudo de química mineral comparativo com outros granitos paleoproterozoicos da Província Carajás indicou que o Granito Gradaús apresenta maiores similaridades com os granitos Cigano, da Suíte Serra dos Carajás, e Antônio Vicente, da Suíte Velho Guilherme; entretanto, este último pertence à Província Estanífera do Sul do Pará e possui mineralizações de Sn em suas rochas mais evoluídas e alteradas hidrotermalmente, diferindo neste aspecto do Granito Gradaús que é estéril. Diferenças significativas foram constatadas em relação aos granitos Jamon e Bannach, da Suíte Jamon, uma vez que estes se formaram sob condições oxidantes a moderadamente oxidantes e pertencem à série magnetita.

O Granito Gradaús mostrou, ainda, similaridades em termos da composição de seus anfibólios e biotitas, fugacidade de oxigênio, série magmática (ilmenita), temperatura e pressão com os granitos mesoproterozoicos reduzidos Wolf River, dos EUA, e Bodon e Obnäs, da Finlândia, diferindo, entretanto, dos batólitos oxidados a moderadamente oxidados Holy Moses, Newberry, Hualapai e St. François, dos EUA.

Os dados de químicos de anfibólios e biotitas obtidos neste trabalho, somados aos de petrografia, geoquímica de rocha total, suscetibilidade magnética e datação geocronológica existentes permitiram colocar o Granito Gradaús no mesmo nível de conhecimento de outros importantes granitos paleoproterozoicos anorogênicos da Província Carajás.

REFERÊNCIAS

- Abdel-Rahman A.M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal Petrology*, **35**:525-541.
- Abdel-Rahman A.M. 1996. Discussion on the Comment on Nature of Biotites in Alkaline, Calc-alkaline and Peraluminous Magmas. *Journal of Petrology*, **37**(5): 1031-1035.
- Abrantes Jr. F.R. & Lamarão C.N. 2011. Petrografia e variação composicional de zircão do Granito Gradaús, Província Carajás, Centro-Sul do Pará. In: SBGq, 13º Congresso Brasileiro de Geoquímica & 3º Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, Gramado. Anais. p. 713-716.
- Abreu F.A.M., Ramos C.R. 1974. Estanho do Sul do Pará. In: SBG, 28º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, *Anais...* **5**: 11-23.
- Almeida F.F.M. 1978. Tectonic map of south america 1:5.000.000. Explanatory note, Brasília DNPM/DGMW/UNESCO, p. 23.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An introduction. *Earth Science Review*, **17**:1-29.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Oliveira D.C. 2006. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **31**:17-36.
- Almeida J.A.C., Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Borges R.M.K. 2008. *Relatório de mapeamento geológico na escala 1:100.000 da Folha Marajoara (SB.22-Z-C-V)*. Programa Geobrasil, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. p. 147.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite Suites: Evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, **120**:235-257.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and origin 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*, **187**:201-221.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Leite A.A.S. 2013. 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*, **42**:103-126.
- Althoff F.J. 1996. *Etude pétrologique et structurale des granitoïdes de Marajoara (Pará Brésil): leur rôle dans l'évolution archéenne du craton Amazonien (2,7-3,2 Ga)*. Phd Tesis .Université. Henri Poincaré, Nancy I – France. p. 296.
- Althoff F.J., Barbey P., Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province; Brazil). *Precambrian Research*, **104**:187-206.

Amaral G. 1974. Geologia Pré Cambriana da Região Amazônica. Phd Tesis, IGC, Universidade de São Paulo, p. 212.

Anderson J.L., Smith D.R. 1995. The Effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, **80**: 549-559.

Anderson J.L., Barth A.P., Wooden J.L. Mazdab F. 2008. Thermometers and thermobarometers in granitic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**: 121-142.

Araújo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. Folha Serra dos Carajás; *Folha SB-22-Z-A*. Relatório Final. CPRM; Rio de Janeiro; p. 136.

Armstrong J.T. 1988. Quantitative analysis of silicate and oxide minerals: Comparison of Monte Carlo, ZAF, and $\phi(\rho z)$ procedures, in *Microbeam Analysis – D.E. Newbury, ed.*, San Francisco Press, 239-246.

Avelar V.G. 1996. *Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão do magmatismo da região de Tucumã; SE do Estado do Pará; Amazônia Oriental*. MS Dissertation. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, p. 149.

Barbosa A.B., Lafon J.M., Neves A.P., Vale A.G. 1995. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: implicações para a evolução do magmatismo proterozoico da região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra*, Belém, **7**: 147-164.

Bard J.P. 1980. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks*. D. Reidel Publishing Company. Tokyo. P. 246.

Belousova E.A., & Griffin W.L. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions Mineralogy Petrology*, **143**:602-622.

Blundy J.D., Holland T.J.B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. *Contributions Mineralogy Petrology*, **104**: 208-224.

Carvalho T.A. 2017. *Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Gradaús, Província Carajás, SE do Pará*, MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, p. 63.

Cerný P. & Burt D.M. 1984. Paragenesis, crystallochemical characteristics and geochemical evolution of micas in granite pegmatites. In: S.W. Bailey (ed.). *Micas - Reviews in Mineralogy*. New York. *Mineralogical Society of America*. 257-298.

Cordani U.G., Tassinari C.C.G., Teixeira W., Basei M.A.S., Kawasita K.1979. Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: Congresso Geológico Chileno, 2, Chile. Atas, p.137-48.

Cordani U.G. & Brito Neves B.B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geologia*, **12**(1-3):78-88.

Costa J.B.S. & Hasui Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: M.L.Costa, R.S. Angélica (eds). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. SBG, p. 15-90.

Cunha I. R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral Chemistry and Magnetic Petrology of the Archean Planalto Suíte, Carajás Province – Amazonian Craton: Implications for the Evolution of Ferroan Archean Granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**: 100-121.

Dall'Agnol R. 1982. Maciço Jamon: Evolução Petrológica de um granito da Amazônia Oriental. In: SBG, 1º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, *Anais*. **2**:139-161.

Dall'Agnol R., Schenato C.A., Cordeiro A.A., Scheller T. 1985. Efeitos de contato do maciço granítico Jamon na sequência Lagoa Seca (Sudeste do Pará). In: SBG, 2º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais*. p. 33-52.

Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Magalhães M.S. 1993. Diagnostic features of the Tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, **65** (1): 33-50.

Dall'Agnol R., Lafon J.M., Macambira M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, **50**:113-138.

Dall'Agnol R., Pichavant M., Champenois M. 1997. Iron-Titanium Oxide Mineral of the Jamon Granite; Eastern Amazonian Region; Brazil: Implications for the Oxygen Fugacity in Proterozoic, A-type Granites. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **69** (3):325-347.

Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999a. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites; Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, **46**:431–462.

Dall'Agnol R., Costi H.T., Leite A.A.S, Magalhães M.S., Teixeira N.P. 1999b. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*, **95**: 9-39.

Dall'Agnol R., Scaillet B., Pichavant M. 1999c. Evolution of A-type granite magmas: an experimental study of the Lower Proterozoic Jamon Granite, eastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **40** (11): 1673-1698.

Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Rämö O.T., Moura C.A.V., Macambira M.J.B., Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, **80**: 101-129.

Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Arquean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. In: Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, PRONEX-UFPA/SBG-NO, p. 97-150.

Dall'Agnol R. & Oliveira D.C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, **93**: 215–233.

Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva, A.C., Rodrigues D.S., Santos M. J.P., Silva C.R.P., Santos R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – Implicações para a evolução arqueana da Província Carajás – Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 13, Belém (PA), CD-rom.

Dall'Agnol R., Cunha I.R.V., Guimarães F.V., Oliveira D.C., Teixeira M.F.B., Feio G.R.L., Lamarão C.N. 2017. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, **277**:3-32.

Dias S.B. 2009. *Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica de granitos Arqueanos da Folha Marajoara, terreno granito–greenstone de Rio Maria, sudeste do Pará*. MS Dissertation, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 129p.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1992. *Rock-forming Minerals, second ed. Longmans*, London, p. 696.

DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Província Mineral de Carajás. Litoestratigrafia e principais depósitos.

Eby G.N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, **20**: 641-644.

Erdmann S., Martel C., Pichavant M., Kushnir A., 2014. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **167**:1-23.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the Mesoproterozoic granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás Province, Brazil: Implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, **154**: 33-52.

Foster M.D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U. S. Geol. Surv., Prof. Paper*, **354**:1-49.

Frost B.R. 1991. Introduction to oxygen fugacity and its petrologic importance. In: Lindsley D.H. (Ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, **25**:1-9.

Gao P., Zhao Z., Zheng Y. 2016. Magma mixing in granite petrogenesis: Insights from biotite inclusions in quartz and feldspar of Mesozoic granites from South China. *Journal of Asian Earth Science*, **123**: 142-161.

Gastal M.C.P. 1987. *Petrologia do Maço Granítico Musa, Sudeste do Pará*. MS Dissertation, Universidade federal do Pará. Centro de Geociências, Belém, p. 316.

- Guimarães F.V.G., Dall'Agnol R., Almeida J.A.C., Oliveira M.A. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do trondhjemitó Mogno e tonalito Mariazinha, Terreno granito-greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**: 196–211.
- Hammarström J.M., Zen E.A. 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, **71**: 1297-1313.
- Hasui Y., Haralyi N. L., Schobbenhaus C. 1984. Elementos Geofísicos e Geológicos da Região Amazônica: Subsídios para o Modelo Geotectônico. In: Simpósio de Geologia da Amazonas, (2):129-147.
- Hibbard M.J. 1995. Mixed magma rocks. Petrography to petrogenesis. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. p. 242-260.
- Hirata W.K., Rigon J.C., Kadkaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, *Anais*, Belém, **1**: 100-110.
- Hollister L.S., Grisson G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, **72**:231-139.
- Huhn S.B., Macambira M.J.B, Dall'Agnol R. 1999. Geologia e Geocronologia Pb/Pb do granito Alcalino Arqueano Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás – PA. In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus. *Anais*. **1**:463-466.
- Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization. In: SKINNER, B. J. (ed.) *Economic Geology*, 75th anniversary volume: 458-484.7
- Issler R.S. 1977. Esboço geológico-tectônico do Cráton do Guaporé. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Rio de Janeiro, **7**(3):177-211.
- Janousek V., Farrow, C.M., Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* **47**: 1,255-1,259.
- Javier Rios F., Villas R.N.N., Fuzikawa K. 1994a. Estudo preliminar de Inclusões Fluidas (IF) em veios hidrotermais do Granito Cigano, Serra dos Carajás, PA. In: SBG, 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, *Boletim de resumos expandidos*, p. 639-640. 92
- Javier Rios F., Villas R.N.N., Pimenta M.A. 1994b. Fluidos relacionados com o hidrotermalismo do Granito Musa (PA): indicações das Inclusões Fluidas (IF) em quartzo de veios mineralizados da Jazida de W de Pedra Preta. In: SBG, 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, *Boletim de resumos expandidos*, p. 644-645.
- Kerr P. 1959. *Optical Mineralogy*. McGraw-Hill Book Co., New York, Third Edition, p. 492

Lafon J.M., Macambira M.J.B., Pidgeon R.T. 2000. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). *In: 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro Abstracts*, CD-ROM.

Lafon J.M., Rodrigues E., Duarte K.D. 1994. Le granite Mata Surrão: un magmatisme monzogranitique contemporain des associations tonalitiques trondhjemitiques-granodioritiques archéennes de la région de Rio Maria (Amazonie Orientale, Brésil). *Comptes Rendues de la Academie de Sciences de Paris*, t. **318**, serie II, 642–649.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R. 2004. Química mineral de anfibólios e biotitas e condições de cristalização de granitoides paleoproterozoicos da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:95-108.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Soledade G.L. da, Silva J.S. 2007. Variações composicionais de zircão em granitos anorogênicos proterozóicos do Cráton Amazônico: implicações metalogênicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37** (4):693-704.

Lamarão C.N., Pinho S.C.C., Junior A.L.P., Toro M.A.G. 2012. 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*, **38**:159-173.

Lamarão C.N., Silva J.S., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2014. Morphological and compositional variations of zircon and their metallogenetic implications: the example of Jamon, Serra dos Carajás and Velho Guilherme suites, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **44**: 105-120.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova J., Keller J., Lameyre J., Sabine P.A., Schmidt R., Sørensen H., Woolley A.R., 2002. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, p. 236.

Lima P.H.A., Lamarão C.N., Santos M.J.P. 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*. **9**:47-72.

Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J.A., Maresch W.V., Nickel E.H., Schumacher J., Smith J.C., Stephenson, N.C.N. Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and Mineral names. *Mineralogical Magazine*, **61**:295-321.

Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Burke E. A.J., Ferraris G., Grice J. D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. 2003. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the international mineralogical association's 1997 Recommendations. *The Canadian Mineralogist*, **41**:1355-1362.

Leite A.A.S., Dall'Agnol R. 1994. Estratigrafia e aspectos geológicos da região de ocorrência do Granito Xinguara (SE do Pará). *In: Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, 1994. Resumos expandidos, Belém, SBG. 4: 325-327.*

Leite A.A.S., Dall'Agnol, R., Althoff, F.J. 1997. Geologia e petrografia do maciço granítico Arqueano Xinguara e de suas encaixantes - SE do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Série Ciência da Terra. 9: 43-81.*

Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J. 1999. Geoquímica e aspectos petrogenéticos do granito Xinguara, Terreno granito - greenstone de Rio Maria – Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências, 23(3):429-436.*

Leite A.A.S. *Geoquímica, petrogênese e evolução Estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico.* Phd Tesis. 2001. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Pós-Graduação em Geoquímica e Petrologia. p. 330.

Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Althoff F.J. 2004. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria. *Revista Brasileira de Geociências, 34:447-458.*

Macambira M.J.B. 1992. *Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est, exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajás, Brésil.* Phd Tesis, Université Montpellier II, França. p. 212.

Macambira M.J.B., Costa J.B.S., Althoff F.J., Lafon J.M., Melo J.C.V., Santos A. 2000. New geochronological data for the Rio Maria TTG terrane, implications for the time constraints of the crustal formation of the Carajás province, Brazil. *In: International Geological Congress, 31st, Rio de Janeiro, 2000, CD-ron abstract volume.*

Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás, Síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências naturais, 7: 263-287.*

Macambira M.J.B., Lancelot J. 1991. Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do Estado do Pará. *In: RBG, 3º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, Resumos Expandidos, 3: 49-58.*

Macambira M.J.B., Lancelot, J. 1996. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review, 38(12):1134-1142.*

Machado N., Lindenmayer Z. G., Krogh T. E., Lindenmayer, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research, 49:329-354.*

Magalhães M.S., Dall'Agnol R., Sauck W.A., Luiz J.G. 1984. Suscetibilidade magnética: um indicador da evolução petrológica de granitóides da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências 24:139-149.*

Mackenzie W.S., Donaldson C.H., Guilford C. 1982. Atlas de Igneous Rocks and Their Textures. Harlow Essex, England: Longman Group Ltd., 1982. p. 148.

Melo L.M.C., Lamarão C.L. 2017. Estudo de cristais de zircão do Granito Rio Xingu, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás, por MEV-EDS e suas implicações metalogenéticas. 15º *Simpósio de Geologia da Amazônia*, Belém.

Mesquita C.J.S. 2018. *Química Mineral e Parâmetros de Cristalização do Granito Tipo A Paleoproterozoico Bannach, Província Carajás, Pará*. MS Dissertation. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. p. 150.

Mutch E.J.F., Blundy J. D., Tattitch B. C., Cooper F.J., Brooker R. A. 2016. An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **171**:85.

Nachit H. 1986. Contribution à l'étude analytique et expérimentale des biotites des granitoïdes. Applications typologiques. Université de Bretagne Occidentale, Phd Tesis, p. 181.

Nachit H., Razafimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P. 1985. Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoïdes. *Comptes Rendus l'Académie Geoscience*. Paris **301**:813-818.

Nachit H., Ibhi A., Abia E.H., Ohoud M.B. 2005. Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neofomed biotites. *Comptes Rendus l'Académie Geoscience* 337.

Nockolds, S. R. 1947. The relation between chemical composition and paragenesis in the biotite micas of igneous rocks. *American Journal of Sciences*. **245**:401-420.

Oliveira D.C. 2001. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética do granito paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico*. MS Dissertation, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, p. 202

Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Silva J.B.C., Almeida J.A.C. 2008. Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons: implications for architecture and zoning of A-type granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **25**:100–115.

Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Barros C.E.M., Oliveira M.A. 2009. Geology, geochemistry and magmatic evolution of the Paleoproterozoic, anorogenic oxidized A-type Redenção granite of the Jamon Suíte, eastern Amazon Craton, Brazil. *Canadian Mineralogist*, **47** (6):1441-1468.

Oliveira D.C., Neves S.P., Trindade R.L.F., Dall'Agnol R., Mariano G., Correia P.B. 2010. Magnetic anisotropy of the Redenção granite, eastern Amazonian craton (Brazil): Implications for the emplacement of A-type plutons. *Tectonophysics*, **493**:27-41.

Paiva Jr A.L., Lamarão C.N., Lima P.H.A. 2011. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Batólito Seringa, Província Carajás, SSE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **41**(2): 185-202.

Papoutsas A., Pe-Piper, G., 2014. Geochemical variation of amphiboles in A-type granites as an indicator of complex magmatic systems: Wentworth pluton, Nova Scotia, Canada. *Chemical Geology*, **384**:120-134.

Pearce J.A, Harris N.B.W, Tindle A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, **25**: 956-983.

Pimentel M.M., Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb dos Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. In: SBG, 38º Congresso Brasileiro de Geologia, *Boletim de Resumos Expandidos*, Camboriú, 390-391.

Pinho S.C.C., Lamarão C.N., Fernandes C.M.D., Paiva Jr.A.L., Cruz V.L. 2006. Geocronologia do Granito Serra da Queimada, região de São Félix do Xingu, Província Mineral de Carajás. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 9, Belém, Resumos expandidos, CD-ROM.

Pinho S.C.C. 2009. *Geologia, petrografia e geoquímica do granito Bom Jardim, Província Estanífera do Sul do Pará*. MS Dissertation, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal, Belém, p. 144.

Rämö O.T., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Leite A.A.S., Oliveira D.C. 2002. 1.88 Ga oxidized A-type granites of the Rio Maria region, eastern Amazonian Craton, Brazil: Positively anorogenic! *Journal of Geology*, **110**: 603-610.

Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy Petrology*, **160**:45-66.

Rocha Jr. G.L.D. 2004. *Caracterização petrográfica do Granito Paleoproterozóico Marajoara, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do estado do Pará*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Belém. p. 45.

Rodrigues E.M.S., Lafon J.M., Scheller T. 1992. Geocronologia Pb-Pb em rochas totais da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: SBG, 37º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos*. **2**:183-184.

Rolando A.P & Macambira M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: 4º South American Symposium on Isotope Geology. Salvador, *Expanded Abstracts*, CD-ROM.

Santos A & Pena Filho J.I.C. 2000. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Região de Xinguara, folha Xinguara (SB-22-Z-C), Estado do Pará. Texto explicativo, Brasília, DNPM/CPRM, p. 120.

Santos M.N.S., Oliveira D.C. 2016. Rio Maria granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte – Carajás province: Petrography, geochemistry and implications for sanukitoid petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**: 279-301.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**:453-488.

Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil-central. In: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, p. 169-361.

Santos J.S.O., Hartmann L.A., Faria M.S., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., Mcnaughton N.J. 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SBG, 9º Simpósio de geologia da Amazônia. Belém. Resumos Expandidos, CD-ROM.

Santos P.A. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica da associação Tonalítico-Trondhjemítico-Granodiorítica (TTG) do extremo leste do Subdomínio de Transição, Província Carajás - Pará. MS Dissertation. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. 128p.

Santos R.F.S. 2017. *Geocronologia U-Pb, classificação e aspectos evolutivos do Granito Marajoara – Província Carajás*. MS Dissertation. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. p. 78.

Schmidt M.W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **110**:304-310.

Shand S.J. 1951. Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit. 4ed., London, p. 488.

Streckeisen A.L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, **12**: 1-33.

Souza S.Z., Dall’Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archean evolution of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain and the Carajás block. *Extended Abstracts of the Symposium on Archean Terranes of South America Platform*. **1**:31-32.

Souza Z.S., Dall’Agnol R., Oliveira C.G, Huhn S.R.B. 1997. Geochemistry and Petrogenesis of metavolcanic rocks from Archean Greenstone Belts: Rio Maria Region (Southeast Pará, Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*, **27**(2):169-180.

Souza Z.S., Potrel H., Lafon J.M., Althoff F.J., Pimentel M.M., Dall’Agnol R., Oliveira C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes of the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás province, Brazil): Implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**:293-315.

Speer J.A. 1984. Micas in igneous rocks. In: BAILEY, S.W., ed. *Reviews in Mineralogy*. Blacksburg, *Mineralogical Society of America*, v.13, p.299-356.

Tassinari C.C.G. 1981. Estudo geocronológico pelos métodos Rb/Sr e K/Ar em rochas da folha SE-21 Corumbá. Goiânia: Radam-Brasil, (Relatório Interno RADAMBRASIL, 408-G). p. 20.

Tassinari C.C.G. 1996. *O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos*. Tese (Livre-Docência). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 139.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**:174–182.

Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Geraldés M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. The Amazonian Craton. In: Cordani U.G., Milani E.J. Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.) *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro. p. 41-95.

Tassinari C.C.G., Macambira M. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli, A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (ed.). *Geologia do Continente Sul Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida*. São Paulo. p. 471-486.

Teixeira M.F.B. Dall’Agnol R., Santos J.O.S, Oliveira D.C., Lamarão C.L., McNaughton N.J. 2018. Crystallization ages of Paleoproterozoic A-type granites of Carajás province, Amazon Craton: Constraints from U-Pb geochronology of zircon and titanite. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:312-331.

Teixeira N.P. 1999. *Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. Phd Tesis em Geologia e Geoquímica, Universidade de São Paulo, Centro de Geociências, São Paulo. p. 508.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Moura C.A.V., Dall’Agnol R., Macambira E.M.B. 2002 Archean crustal sources for Paleoproterozoic tin-mineralized granites in the Carajás Province, SSE Pará, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Precambrian Research*, **119**: 257-275.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Dall’Agnol R., Moura C.A.V., Fernandes C.M.D.F., Pinho S.C.C. 2005. Geoquímica dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **35** (2): 217-226, jun.

Teixeira W., Tassinari C.C.G., Cordani U.G., Kawashita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, **42**: 213–227.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.R., 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. 2008. Unidade litoestratigráficas. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *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*. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM. p. 113-215.

Villas R.N.N. 1999. Granito Pojuca, Serra dos Carajás (PA): composição mineralógica, química mineral e controles químicos da alteração hidrotermal. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**(3):393- 404.

Whalen J.W., Currie K.L., Chappel B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **95**:407-419.

Wones D.R., Eugster H.P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and applications. *American Mineralogist*, **50**:1228-1272.