



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC**

**TITANITA DE GRANITOS PALEOPROTEROZOICOS REDUZIDOS E  
OXIDADOS, PROVÍNCIA CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E  
COMPOSICIONAL POR MEV/EDS**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por:**

**YURY HARRISON DA COSTA REIS**

**Orientador: Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão (IG/UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ**  
**Junho/2021**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TITANITA DE GRANITOS PALEOPROTEROZOICOS REDUZIDOS E  
OXIDADOS, PROVÍNCIA CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E  
COMPOSICIONAL POR MEV/EDS**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por:**

**YURY HARRISON DA COSTA REIS**

**Orientador: Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão (IG/UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ**  
**Junho/2021**



**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Geociências  
Faculdade de Geologia**

**TITANITA DE GRANITOS PALEOPROTEROZOICOS REDUZIDOS E  
OXIDADOS, PROVÍNCIA CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E  
COMPOSICIONAL POR MEV/EDS**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por**

**YURY HARRISON DA COSTA REIS**

**Como requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia**

**Data de aprovação: 30 /06/2021**

Banca Examinadora

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

Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira  
(Avaliador – UFPA)

Prof. Dr. Amarildo Salina Ruiz  
(Avaliador – UFMT)

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)

---

R375t REIS, YURY HARRISON DA COSTA.

Titanitas de granitos paleoproterozoicos reduzidos e oxidados, Província Carajás: Um estudo morfológico e composicional por MEV/EDS / YURY HARRISON DA COSTA REIS. — 2021.

61 f.: il. color.

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

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2021.

1. Titanita. 2. Granitos reduzidos e oxidados. 3. Paleoproterozoico. 4. Província Carajás. I. Título.

CDD 550.2462

---

*À minha mãe, Jilcelina Costa,  
Por todo amor, confiança e dedicação.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me fazer forte e me abençoar com muita saúde e sabedoria, que me fizeram conseguir vencer os desafios diários e concluir mais esse ciclo.

Aos meus familiares pelo apoio na realização deste sonho e compreensão aos momentos em que estive ausente. Gratidão especial à minha mãe, Jilcelina Costa, por toda dedicação, educação e confiança depositada em mim e ao meu pai Edir Reis (*in memoriam*).

Aos meus irmãos Larissa, Letícia, Gilcilene e Glauber, por todo amor, paciência e confiança. Aos meus sobrinhos, por toda felicidade que a presença de vocês me causa.

A minha namorada, Alane Cereja, pelo amor e incentivo que me deram forças ao longo desse caminho.

Ao Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão, por todas as oportunidades de aprendizado, pela paciência, confiança, amizade, orientação e compreensão durante a jornada de desenvolvimento deste trabalho.

A Prof.<sup>a</sup> Msc. Vânia Barriga por todo conhecimento, amizade, conselhos e café oferecidos durante a graduação.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências (IG) e à Faculdade de Geologia (FAGEO), pela infraestrutura e oportunidade de formação acadêmica e pela concessão de bolsa de iniciação científica (PIBIC) e incentivo a pesquisa.

Ao Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA pela oportunidade de utilização do espaço e ferramentas necessárias para o desenvolvimento das atividades.

Aos membros do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), em especial ao Williamy Félix, pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos de turma, João Eduardo, André Arguelhes, Pedro Oliveira e Giulliana Paraense, por compartilharem comigo momentos de alegria e dificuldade durante esses 5 anos, pela dedicação em todas as atividades de campo em que trabalhamos juntos.

E por fim, os meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho e me incentivaram com palavras de carinho e apoio.

*“O pensamento é a força criadora, irmão  
O amanhã é ilusório porque ainda não existe  
O hoje é real, é a realidade que você pode interferir  
As oportunidades de mudança 'tá no presente  
Não espere o futuro mudar sua vida  
Porque o futuro será a consequência do presente  
Parasita hoje, um coitado amanhã  
Corrida hoje, vitória amanhã  
Nunca esqueça disso, irmão  
Acreditar e sonhar”*

**Racionais MC's**

## RESUMO

Titanitas são minerais acessórios comuns em granitos metaluminosos oxidados, e raros em granitos peraluminosos reduzidos. Cristais de titanita incorporam em sua estrutura uma grande variedade de elementos maiores, menores e traços geologicamente importantes (Al, Fe, Sn, Nb, Ta, W, Ce, Y) capazes de fornecer informações sobre suas condições de formação e o potencial metalogenético da rocha hospedeira. Esses fatos contribuem para a importância atribuída ao presente estudo. Os granitos paleoproterozoicos tipo A Serra da Queimada e Bom Jardim, pertencentes à Suíte Intrusiva Velho Guilherme, ocorrem nas proximidades de São Félix do Xingu, centro-sul do Estado do Pará, Província Mineral Carajás. Ambos mostram caráter reduzido e apresentam mineralizações de Sn e W em suas fácies mais evoluídas e hidrotermalizadas e em corpos de *greisens* associados. São constituídos por biotita sienogranitos e monzogranitos. A ausência, ou ocorrência muito restrita, de magnetita e titanita primária e a presença de ilmenita indicam que esses granitos pertencem à série Ilmenita. Os granitos paleoproterozoicos tipo A Bannach e Redenção, localizados imediatamente a sul das cidades de Bannach e Redenção, SE do Pará, apresentam caráter oxidado e estão inseridos na Suíte Jamon; predominam monzogranitos com sienogranitos ocorrendo subordinadamente; a presença de magnetita como principal mineral opaco permite incluí-los na série magnetita. No granito reduzido Bom Jardim foram identificadas apenas titanitas secundárias provenientes da alteração de cristais de ilmenita e clorita. No granito reduzido Serra da Queimada constatou-se a presença localizada de cristais de titanita primária associadas a anfibólio e biotita, além de titanitas secundárias provenientes da alteração da clorita. Nos granitos oxidados Bannach e Redenção as titanitas são primárias e associadas a cristais de anfibólio e biotita. As titanitas dos granitos reduzidos, tanto primárias quanto secundárias, apresentaram teores mais elevados de Sn+W+Ta+Nb+Ce e mais baixos de Y em relação às titanitas primárias dos granitos oxidados. Este estudo mostrou que titanitas de granitos reduzidos (mineralizados) e oxidados (estéreis) apresentam assinaturas geoquímicas diferentes e podem ser utilizadas preliminarmente como indicadores deste tipo de mineralização. A identificação e caracterização morfológica e geoquímica de diferentes tipos de titanitas presentes nessas rochas complementarão os estudos realizados até agora nos granitos Bom Jardim, Serra da Queimada, Bannach e Redenção.

**Palavra Chave:** paleoproterozoico; Província Carajás; granitos tipo A reduzidos e oxidados; titanitas; MEV-EDS.

## ABSTRACT

Titanites are common accessory minerals in oxidized metaluminous granites, and rare in reduced peraluminous granites. Titanites crystals incorporate in its structure a wide variety of major, minor elements and geologically important features (Al, Fe, Sn, Nb, Ta, W, Ce, Y) capable of providing information about their formation conditions and the metallogenetic potential of their host rock. These facts contribute to the importance attributed to the present study. Paleoproterozoic A type granites, such as Serra da Queimada and Bom Jardim, belonging to the Velho Guilherme Intrusive Suit, occur in the vicinity of São Félix do Xingu, in the south-central of the state of Pará, in the Carajás Mineral Province. Both present reduced character and present Sn and W mineralizations in their more evolved and hydrothermal facies and in associated greisens bodies. They consist of biotite syenogranites and monzogranites. The absence, or very limited occurrence, of magnetite and primary titanite and the presence of ilmenite indicate that these granites belong to the Ilmenite series. Paleoproterozoic Bannach and Redenção A type granites, located immediately south of the Bannach and Redenção cities, SE of Pará, have oxidized character and are inserted in the Jamon Suite; monzogranites predominate with syenogranites occurring subordinately; the presence of magnetite as the main opaque mineral makes it possible to include them in the magnetite series. In the reduced Bom Jardim granite, only secondary titanites from the alteration of ilmenite and chlorite were identified. In the Serra da Queimada reduced granite are locally present primary titanite crystals associated with amphibole and biotite, in addition to secondary titanites from chlorite alteration. In the Bannach and Redenção oxidized granites, titanites are primary and associated with amphibole and biotite crystals. The titanites of the reduced granites, both primary and secondary, presented higher levels of Sn + W + Ta + Nb + Ce and lower Y compared to the primary titanites of oxidized granites. This study showed that titanites of reduced (mineralized) and oxidized (sterile) granite have different geochemical signatures and can be used preliminarily as indicators of this type of mineralization. The identification and morphological and geochemical characterization of different types of titanites present in these rocks will complement the studies carried out so far in the Bom Jardim, Serra da Queimada, Bannach and Redenção granites.

**Keywords:** paleoproterozoic; Carajás Province; reduced and oxidized A-type granites; titanite; MEV.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa esquemático do Cráton Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição das suítes graníticas do Cráton Amazônico (Dall’Agnol *et al.* 2005), com destaque para os granitos Bom Jardim, Serra da Queimada, Bannach e Redenção, objeto deste estudo (**em negrito**). DRM=Domínio Rio Maria. RX=Região do Xingu. BC=Bacia Carajás. Suíte Jamon: granitos oxidados; Suíte Velho Guilherme: granitos reduzidos; Suíte Serra dos Carajás: granitos moderadamente oxidados; Outros granitos paleoproterozoicos: granitos moderadamente oxidados.

Figura 2 - Mapa de acesso rodoviário aos municípios onde estão inseridos os granitos Serra da Queimada e Bom Jardim, localizados aos arredores da cidade de São Félix do Xingu; Bannach e Redenção, situados nas proximidades dos municípios de Bannach e Redenção, respectivamente

Figura 3 - Quadro tectônico regional: (a) localização do Cráton Amazônico na plataforma sul-americana; (b) Província Carajás no contexto do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira 1999 2004); (c) proposta de compartimentação tectônica da PC segundo (Dall’Agnol *et al.* 2013); (d) mapa geológico da PC. Modificado de (Vasquez *et al.* 2008, D. C. de Oliveira *et al.* 2010, Santos *et al.* 2012, Guimarães *et al.* 2012, Gabriel & de Oliveira 2013, Feio *et al.* 2013, Dall’Agnol *et al.* 2013),

Figura 4 - Mapa geológico do Granito Bom Jardim, retirado de Lamarão *et al.* (2012).

Figura 5 - Mapa geológico do Granito Serra da Queimada; (B) Imagem aerogeofísica da região de ocorrência do GSQ mostrando sua delimitação. Retirado de (Melo 2019).

Figura 6 - Mapa geológico da região de ocorrência do Granito Bannach, retirado (Almeida *et al.* 2006).

Figura 7 - Mapa geológico do Granito Redenção, retirado de Oliveira *et al.* (2005).

Figura 8 - Feições macroscópicas do GBJ; B e C) Fotomicrografias do GBJ, mostrando feições texturais características. D) Aspecto macroscópico do GS Q. E) Fotomicrografia mostrando cristais de titanita analisados por MEV-EDS. Kf=álcali-feldspato, Qz=quartzo, Ttn=titanita, Ilm=ilmenita, Chl=clorita Amp=anfíbólio, Plg=plagioclásio.

Figura 9 - Aspectos macroscópicos do Granito oxidado Bannach; B e D) Fotomicrografias do GBANN, mostrando feições texturais características, bem como anfibólio, biotita e magnetita, com titanitas associadas. E) Feição macroscópica do Granito oxidado Redenção estudado neste trabalho. E) Fotomicrografia do GRED mostrando morfologia de cristais de titanita analisados por MEV-EDS. Kf=álcali-feldspato, Qz=quartzo, Ttn=titanita, Ilm=ilmenita, Bt=biotita, Mag=magnetita, Amp=anfibólio, Plg=plagioclásio.

Figura 10 - Imagens de elétrons retroespalhados. Aspectos morfológicos de titanitas secundárias do GBJ: A-B= alteração da ilmenita; C-D=alteração da clorita. Titanitas do GSQ: primárias (E-F) e secundárias (G-H), provenientes da alteração da clorita; pontos vermelhos=análises semiquantitativas de MEV-EDS realizadas, Ttn-p=titanita primária; Ttn-s=titanita secundária; Rt=rutilo; Zrn=zircão; Chl=clorita; Mag=magnetita; Qz=quartzo; Amp=anfibólio; Ap=apatita.

Figura 11 - Imagens de elétrons retroespalhados. Aspectos morfológicos de titanitas primárias (A-B) associadas ao GBANN e titanitas primárias associadas ao GRED (C-D-E); pontos vermelhos = análises semiquantitativas de MEV-EDS realizadas. Ttn-p=titanita primária; Bt=biotita; Zrn=zircão.

Figura 12 - Diagramas (A) Ti x Al+Fe e (B) Ca+Ti x Y de titanitas dos granitos reduzidos (GBJ e GSQ)

Figura 13 - Diagramas (A) Al+Fe - Sn+W - Ta; (B) Al+Fe - Sn+W - Nb; (C) Al+Fe - Sn+W - Ce; (D) Fe+Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Y; (E) Fe/Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Y, e (F) Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Fe (% peso) de titanitas secundárias dos granitos reduzidos (GBJ e GSQ).

Figura 14 - Diagramas (A) Ti x Al e (B) Ti x Fe de titanitas primárias de granitos oxidados (GBANN e GRED) e reduzido (GSQ).

Figura 15 - Diagramas (A) Al+Fe x Sn+W x Ta; (B) Al+Fe x Sn+W x Nb; (C) Al+Fe x Sn+W x Ce; (D) Al+Fe x Sn+W+Nb+Ta+Ce x Y; (E) Fe/Al x Sn+W+Nb+Ta+Ce x Y e Al x Fe x Sn+W+Nb+Ta+Ce, (% peso) de titanitas primárias do granito reduzido (GSQ) e oxidados (GBANN e GRED) estudadas.

Figura 16- Imagens de ERE de titanitas primárias e secundárias. A e B: Granito estanífero Qitianling, sul da China (Xie *et al.* 2010); Ttn=titanita primária, Ilm=ilmenita; Rtl=rutilo; Chl=clorita. C e D: granitos Proterozoicos do SE da Suécia (Morad *et al.* 2009).

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Lâminas petrográficas e amostras de mão utilizadas neste estudo: GBJ (Granito Bom Jardim); GSQ (Granito Serra da Queimada); GBANN (Granito Bannach); GRED (Granito Redenção).

Tabela 2 – Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas do GBJ e GSQ.

Tabela 3 - Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas primárias do Granito Redenção (GRED).

Tabela 4 - Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas primárias do Granito Bannach (GBANN).

Tabela 5- Análises comparativas de titanitas primárias e secundárias.

**LISTA DE ABREVIATURAS**

**PC – Província Carajás**  
**GBJ – Granito Bom Jardim**  
**GSQ – Granito Serra da Queimada**  
**GBANN – Granito Bannach**  
**GREDD – Granito Redenção**

**Abreviaturas de minerais**

**Ttn - Titanita**  
**Bt - Biotita**  
**Amp – Anfibólio**  
**Chl - Clorita**  
**Ilm - Ilmenita**  
**Mt - Magnetita**

# Sumário

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	Erro! Indicador não definido.	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....		v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	Erro! Indicador não definido.	
<b>ABSTRACT</b> .....		viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....		ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....		xi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....		xii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....		1
1.1 APRESENTAÇÃO .....		1
<b>2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO</b> .....		4
<b>3. JUSTIFICATIVA</b> .....		5
<b>4. OBJETIVOS</b> .....		6
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....		7
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....		7
5.2. ESTUDOS PETROGRÁFICOS.....		7
5.3 ANÁLISES DE MEV-EDS:.....		8
<b>6. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....		9
<b>7. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL</b> .....		11
7.1 SUITE INTRUSIVA VELHO GUILHERME .....		11
7.1.1 Granito Bom Jardim (GBJ).....		11
7.1.2 Granito Serra da Queimada (GSQ).....		12
7.2 SUITE JAMON.....		14
7.2.1 Granito Bannach (GBANN) .....		15
7.2.2 Granito Redenção (GRED).....		16
<b>8. TITANITA EM ROCHAS GRANITOIDES</b> .....		18
8.1 INDICADOR PETROGENÉTICO .....		18
8.2. TRAÇADOR DE MINERALIZAÇÕES.....		18
<b>9. RESULTADOS</b> .....		20
9.1 ASPECTOS TEXTURAIS E MORFOLÓGICOS .....		20
9.1.1 Granito Bom Jardim .....		20
9.1.2. Granito Serra da Queimada.....		20
9.1.3. Granito Bannach .....		22
9.1.4. Granito Redenção.....		22
9.2 ANÁLISES DE MEV-EDS.....		23

<b>9.2.1 Aspectos morfológicos .....</b>	<b>23</b>
<b>9.2.2 Aspectos composicionais e diagramas discriminantes .....</b>	<b>24</b>
<b>10. COMPARAÇÃO COM OUTRAS TITANITAS .....</b>	<b>36</b>
<b>11. CONCLUSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>11. REFERÊNCIAS</b>	

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

O Cráton Amazônico, importante porção continental estável da Plataforma Sul-Americana, encontra-se localizado ao norte da América do Sul e está limitado por grandes cinturões orogênicos neoproterozoicos. É dividido nos escudos das Guianas e Brasil Central, além de sequências sedimentares pertencentes à Bacia do Amazonas (Figura 1a) (Almeida et al. 1981; Tassinari & Macambira 2004). A evolução do conhecimento geológico acerca deste Cráton permitiu sua individualização em províncias geocronológicas de idades arqueanas à mesoproterozoicas, originadas tanto por sucessões de arcos magmáticos evoluídos de materiais derivados de contribuição mantélica, quanto por retrabalhamento e colisão de porções continentais preexistentes (Figura 2b) (Tassinari & Macambira 2004). Na porção sudeste do Cráton encontra-se o maior núcleo arqueano preservado, representado pela Província Carajás (PC) considerada como uma província geocronológica independente (Santos 2003), ou parte do contexto geológico da Província Amazônica Central (Bloco Carajás) (Tassinari & Macambira 2004). É uma das mais importantes províncias metalogenéticas do mundo, pois possui grandes ocorrências de depósitos minerais, onde se destacam os depósitos de ferro, ouro, manganês, níquel, cobre e estanho.

Nas proximidades de São Félix do Xingu, centro-sul do Estado do Pará, Província Mineral Carajás, ocorre uma extensa sequência de rochas vulcânicas intermediárias a félsicas pertencentes ao Supergrupo Uatumã (Macambira & Vale 1997; Teixeira *et al.* 2002; Fernandes *et al.* 2006; Juliani & Fernandes 2010,) e corpos graníticos de idade paleoproterozoica com caráter reduzido inseridos na Suíte Intrusiva Velho Guilherme (SIVG) (Dall’Agnol *et al.* 1993; Macambira & Vale 1997; Teixeira & Bettencourt 2000; Lamarão *et al.* 2012; Teixeira *et al.* 2002, 2005). Fazem parte desta suíte os granitos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Benedita, Ubim Sul, Rio Xingu, Serra da Queimada, Mocambo e Bom Jardim, todos contendo mineralizações de Sn e W em suas rochas mais evoluídas e alteradas hidrotermalmente e em corpos de *greisens* associados. Rochas sienograníticas são dominantes sobre as monzograníticas e a biotita é o principal mineral máfico, com o anfibólio ocorrendo apenas nas fácies menos evoluídas do Granito Antônio Vicente (GAV). A ausência, ou ocorrência muito restrita, de magnetita e titanita e a presença de ilmenita indicam que esses granitos pertencem à série Ilmenita (Ishihara 1981).

A sudeste de São Félix do Xingu, nos arredores das cidades de Bannach, Rio Maria, Redenção e Xinguará, ocorrem vários granitos paleoproterozoicos, de caráter oxidado e intrusivos

em unidades arqueanas. São representados pelos plútons Jamon, Musa, Bannach, Redenção, Marajoara e Manda Saia (Figura 1b) que compõem a Suíte Jamon (SJ) (Dall'Agnol *et al.* 2005; Almeida *et al.* 2006; Oliveira *et al.* 2010). São rochas dominadas por monzogranitos, com sienogranitos ocorrendo subordinadamente. A biotita é mais abundante que o anfibólio, porém nas rochas menos evoluídas este último é mais comum. Zircão, apatita, magnetita, ilmenita, allanita e titanita são os principais acessórios (Dall'Agnol *et al.* 2005) e a magnetita é dominante sobre a ilmenita, classificando esses como típicos granitos da série magnetita (Ishihara 1981).

Existem ainda, três batólitos graníticos (Seringa, São João e Gradaús) com características mineralógicas, petrográficas, geoquímicas e de suscetibilidade magnética (SM) intermediárias entre os corpos oxidados da SJ e os reduzidos da SIVG. Apesar de terem sido estudados anteriormente (Paiva Júnior *et al.* 2011; Lima *et al.* 2014; Carvalho 2017), ainda não foram inseridos em nenhuma das três suítes graníticas do Cráton Amazônico. Ao longo dos anos, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos nos granitos dessas importantes suítes graníticas sob várias temáticas (Magalhães & Dall'agnol 1992; Dall'Agnol *et al.* 1993, 1994, 1999a, 2005; Magalhães *et al.* 1994; Teixeira 1999; Teixeira *et al.* 2002, 2005; Almeida *et al.* 2006; Dall'Agnol & Oliveira 2007; Lamarão *et al.* 2007, 2012; Oliveira *et al.* 2008; D. C. de Oliveira *et al.* 2010; Mesquita *et al.* 2018) porém, poucos abordam o estudo geoquímico de magnetita (Dall'Agnol *et al.* 1997b, 1999b; Cunha *et al.* 2016; Mesquita *et al.* 2018) e/ou titanita (Mesquita *et al.* 2018) para individualizar diferentes tipos e relacionar suas composições com a presença de mineralizações (conforme Morad *et al.* 2009; Xie *et al.* 2010; Nadoll *et al.* 2012, 2014; Che *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013; Xu *et al.* 2015).

A Figura 1 mostra o mapa geológico simplificado da Província Carajás com sua localização em relação ao Cráton Amazônico, a distribuição das suítes graníticas anorogênicas e dos corpos utilizados neste estudo (em **negrito**).

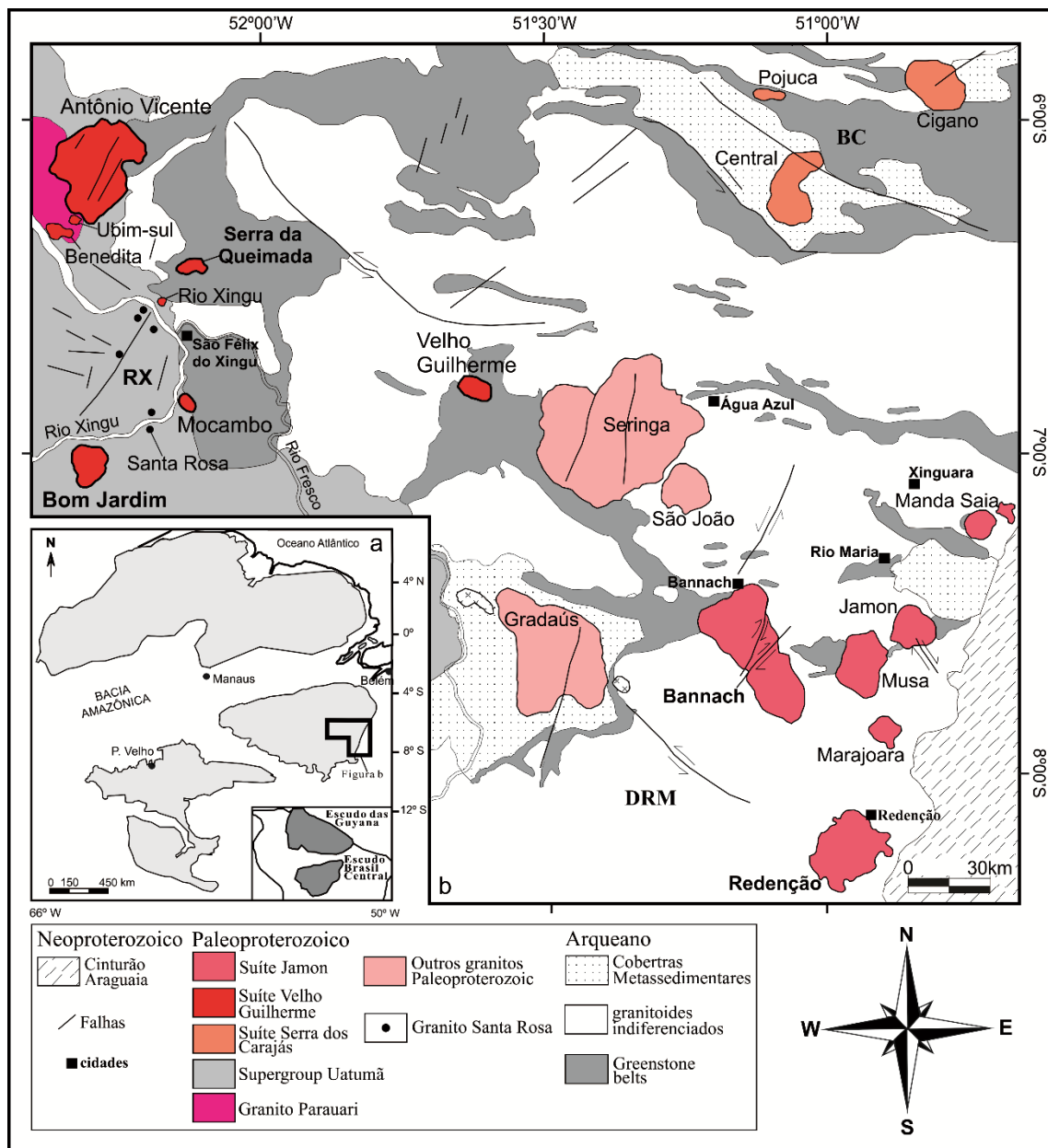


Figura 1. (a) Mapa esquemático do Cráton Amazônico com a localização da área de estudo. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição das suítes graníticas do Cráton Amazônico (Dall’Agnol *et al.* 2005), com destaque para os granitos Bom Jardim, Serra da Queimada, Bannach e Redenção, objeto deste estudo (**em negrito**). DRM=Domínio Rio Maria. RX=Região do Xingu. BC=Bacia Carajás. Suíte Jamon: granitos oxidados; Suíte Velho Guilherme: granitos reduzidos; Suíte Serra dos Carajás: granitos moderadamente oxidados; Outros granitos paleoproterozoicos: granitos moderadamente oxidados. Fonte: Modificado de Dall’Agnol *et al.* (2005).

## 2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Os corpos estudados estão localizados nos municípios de São Félix do Xingu, Bannach e Redenção, sudeste do estado do Pará, e fazem parte do contexto geológico da Província Carajás. O acesso por via terrestre aos municípios onde estão inseridos os batólitos estudados neste trabalho são feitos a partir de Marabá pela PA-150 que dá acesso até as cidades de Redenção e Bannach; o acesso até São Félix do Xingu ocorre pela PA-279 (Figura 2).

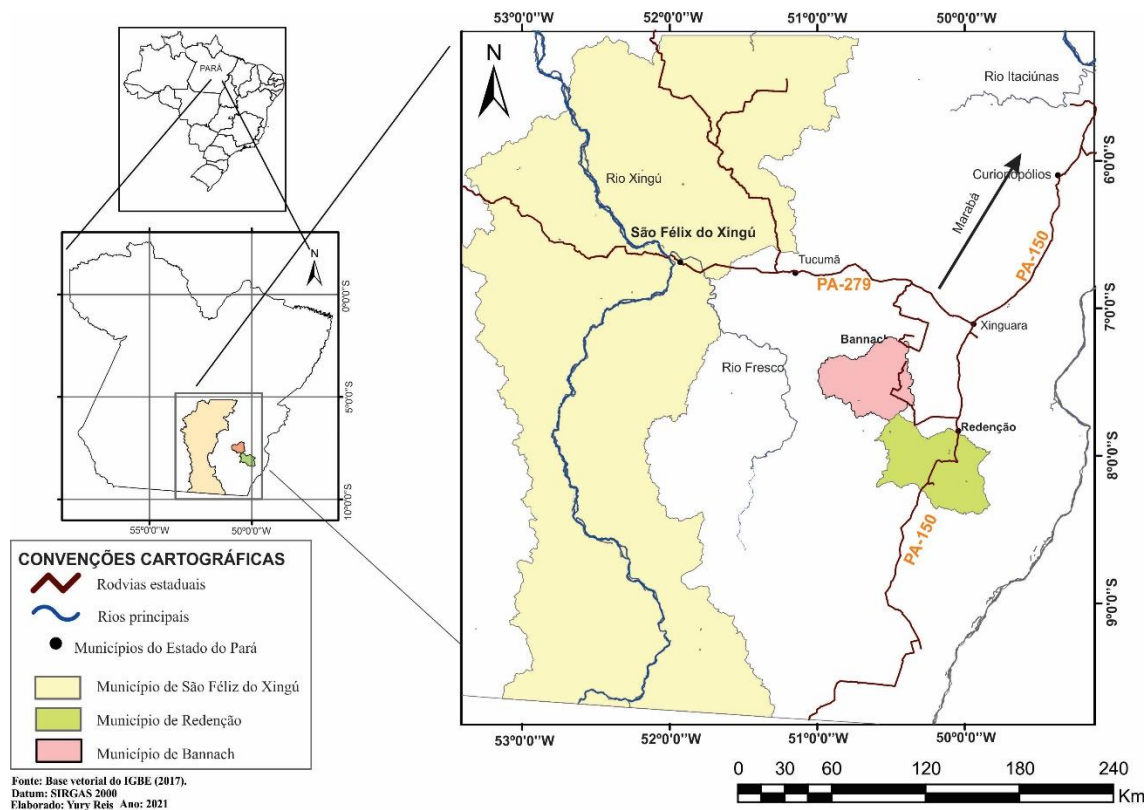


Figura 2: Mapa de acesso rodoviário aos municípios onde estão inseridos os granitos Serra da Queimada e Bom Jardim, localizados aos arredores da cidade de São Félix do Xingu; Bannach e Redenção, situados nas proximidades dos municípios de Bannach e Redenção, respectivamente. Fonte: Autor.

### 3. JUSTIFICATIVA

Titanitas são minerais acessórios comuns em granitos metaluminosos e oxidados (Robinson & Miller 1999; Piccoli *et al.* 2000) e raros em granitos reduzidos, ocorrendo apenas pontualmente em suas fácies menos evoluídas ou como alteração de biotita, clorita e ilmenita. Cristais de titanita incorporam durante seu crescimento uma grande variedade de elementos maiores, menores e traços geologicamente importantes (Al, Fe, Sn, Nb, Ta, W, Ce, Y), os quais podem fornecer informações sobre suas condições de formação e o potencial metalogenético de sua rocha hospedeira (Che *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013).

Nos granitos oxidados Bannach (GBANN) e Redenção (GRED), ocorrem titanitas magmáticas e secundárias ou hidrotermais (Dall'Agnol *et al.* 2006) euédricas, por vezes zonadas, e com tamanhos geralmente  $\geq 50 \mu\text{m}$ , comumente inclusas ou associadas às fases máficas (anfíbólio e biotita). As titanitas secundárias ou hidrotermais são anédricas, com tamanhos inferiores a  $50 \mu\text{m}$ , e dispostas como agregados de grãos ou como grãos isolados provenientes da alteração de biotitas (Dall'Agnol *et al.* 2006). No granito reduzido Bom Jardim (GBJ), cristais de titanita secundária foram identificados apenas nas rochas menos evoluídas e portadoras de biotita; formam cristais anédricos finos, corroídos e alterados, provenientes da alteração de cristais de ilmenita e clorita. No Granito Serra da Queimada (GSQ) (Pinho 2005; Melo 2019), titanita magmática primária ocorre apenas nos anfíbólio-biotita-monzogranitos, considerada a fácies menos evoluída; titanitas secundárias foram identificadas como produto da alteração de clorita.

A importância atribuída ao presente estudo deve-se aos poucos trabalhos envolvendo a caracterização de minerais acessórios, como a titanita, em granitos anorogênicos da Província Carajás. A identificação e caracterização morfológica e geoquímica dos diferentes tipos de titanita presentes nessas rochas complementarão os estudos realizados até agora nos GBJ, GSQ, GBANN e GRED, permitindo avançar no conhecimento da evolução magmática e na caracterização de suas mineralizações através de modificações morfológicas e composicionais com o auxílio de análises de MEV-EDS.

#### 4. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal realizar análises por MEV-EDS em cristais de titanita presentes nos granitos anorogênicos GBJ e GSQ, localizados respectivamente, a sul e a norte de São Félix do Xingu, e nos granitos GBANN e GRED, ocorrentes imediatamente a sul das cidades de Bannach e Redenção. Os GBJ e GSQ (Pinho 2005; Lamarão *et al.* 2012; Melo 2019) são reduzidos, contêm mineralizações de Sn e W em suas rochas mais evoluídas e alteradas hidrotermalmente e pertencem à série Ilmenita (Ishihara 1981). Os granitos GBANN e GRED (Dall’Agnol *et al.* 1994, 2005; Dall’Agnol & Oliveira 2007; Oliveira *et al.* 2005, 2009; Mesquita *et al.* 2018) são oxidados e incluídos na série magnetita (Ishihara 1981).

Desta forma, os dados de química mineral em titanitas obtidos neste estudo, se somarão às outras informações geológicas existentes, constituindo-se em informações complementares para o avanço do conhecimento desses corpos graníticos. Com esse intuito, foram também abordados os seguintes objetivos específicos:

1. Reavaliação dos estudos petrográficos: foram identificados, descritos e selecionados cristais de titanita presentes nesses corpos para as análises de MEV;
2. Determinação por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) das composições das titanitas previamente selecionadas em imagens de elétrons retroespalhados (ERE);
3. Classificação das titanitas em diagramas geoquímicos apropriados;
4. Discussão dos tipos de titanita identificados, suas variações composicionais e associações com a mineralização.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Foi realizada pesquisa bibliográfica acerca da região estudada e para o prévio conhecimento do tema de trabalho, realizando uma síntese de grande parte dos dados já publicados para a Província Carajás com ênfase sobre a Província Estanífera do Sul do Pará (Abreu & Ramos 1974), as Suítes Intrusivas Velho Guilherme e Jamon, trabalhos específicos envolvendo petrografia, geoquímica e estudos de química mineral em titanitas de rochas granitoides, além de livros e apostilas envolvendo princípios básicos e aplicações em MEV.

### 5.2. ESTUDOS PETROGRÁFICOS

Utilizando microscopia de luz transmitida, foram realizados estudos petrográficos e mineralógicos das amostras (Tabela 1). Esta etapa consistiu na identificação e descrição sistemática dos minerais (Deer *et al.* 2013), estudo das texturas magmáticas e de alteração (MacKenzie *et al.* 1982, Bard 1986, Hibbard 1995). As lâminas e seções polidas dos corpos mencionados se encontram disponíveis no acervo do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG). O estudo teve como intuito a revisão petrográfica dos granitos estudados, além de obtenção de fotomicrografias de feições texturais características, bem como dos cristais de titanita analisados por MEV-EDS.

Tabela 1: Lâminas petrográficas e amostras de mão utilizadas neste estudo: GBJ (Granito Bom Jardim); GSQ (Granito Serra da Queimada); GBANN (Granito Bannach); GRED (Granito Redenção).

Granitos Reduzidos		Granitos Oxidados	
GBJ	GSQ	GBANN	GRED
NC-BJ-122 (BSG)	SQ-35 (BMG)	ADR-55A (ABMG)	DCR-33B (BMG)
NC-BJ-123 (BSG)		ADR-136C (BAMG)	DCR-36B (ABMG)
NC-BJ-125 (BSG)			DCR-63a (BAMG)
SAL-32 (BMG)			
SAL-35 (BMG)			
SAL-42 (BMG)			
SAL-64a (BSG)			
SAL-72B (BMG)			

A=anfíbólio. B=biotita. MG=monzogranito. SG=sienogranito. Fonte: Autor.

### 5.3 ANÁLISES DE MEV-EDS:

Foram realizadas no Laboratório de Microanálises do IG-UFGA, sob a orientação do Prof. Cláudio Nery Lamarão. O MEV utilizado será um LEO-ZEISS 1430 equipado com sistema de EDS a seco Sirius-SD. As lâminas e seções polidas foram metalizadas com carbono. As condições de operação para obtenção de imagens de ERE e análises por EDS foram: corrente do feixe de elétrons = 90  $\mu$ a, voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho = 15 mm. As análises de EDS utilizam o fator de correção ZAF ( $Z=n^{\circ}$  atômico,  $A$ =absorção atômica,  $F$ =fluorescência de Raios-X), que já vem instalado com o *software* e faz correções entre pico e *background* do elemento. O tempo de duração das análises foi de 30s, com 3000 a 4000 contagens/segundo para cada análise. Os dados analíticos foram tratados e interpretados em diagramas específicos utilizando-se o software GCDkit.

## 6. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás (PC) está localizada no extremo sudeste do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), ao norte da Plataforma Sul-Americana (Figura 3a e 3d), e está inserida na Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004) (Figura 3b). É considerada a principal província mineral do Brasil, gerada, reativada e tectonicamente estabilizada no Arqueano. Está delimitada a norte pelo Domínio Bacajá da Província Transamazonas (2260 – 1990 Ma), a leste pelo Cinturão Araguaia da Província Tocantins (<850 – 757 Ma), e a sul e oeste pela cobertura sedimentar da Bacia Parecis (Fanerozoica), por sucessões vulcânicas pertencentes ao Grupo Iriri (Vasquez *et al.* 2008), granitoides proterozoicos e a assembleia vulcano-piroclástica do Supergrupo Uatumã (Macambira & Vale 1997; Teixeira *et al.* 2002). No Paleoproterozoico, foi afetada por um evento magmático extenso, registrado por intrusões graníticas anorogênicas e por diques associados (Macambira & Lafon 1995; Dall’Agnol *et al.* 2005). Dall’Agnol *et al.* (1997b), em revisão à geologia do estado do Pará, subdividiram a PC em dois domínios tectônicos: Domínio Rio Maria (DRM), de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga) e Domínio Carajás (DC), composto por rochas meso- e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga), fazendo com que (Feio *et al.* 2012) redefinisse o DT como Subdomínio de Transição (SDT). Dall’Agnol *et al.* (2013) sugeriram o abandono ao termo SDT e propuseram os Domínios: (1) Canaã dos Carajás (DCC), localizado a sul da Bacia Carajás (BC) e formado por granitos stricto sensu e anorogênicos, suítes TTG e associações charnoquíticas; (2) Domínio Sapucaia (DS), situado entre as cidades de Canaã dos Carajás, Xinguara e Água Azul do Norte, sendo caracterizado pela ocorrência de suítes TTG associadas à suítes cálcio-alcalinas de alto-K e com padrão deformacional Neoarqueano (Figura 3c). Tal divisão fundamenta-se na heterogeneidade da porção da crosta correspondente ao embasamento da BC, localizada entre a borda sul da bacia e seu limite com o DRM (Dall’Agnol *et al.* 2013).

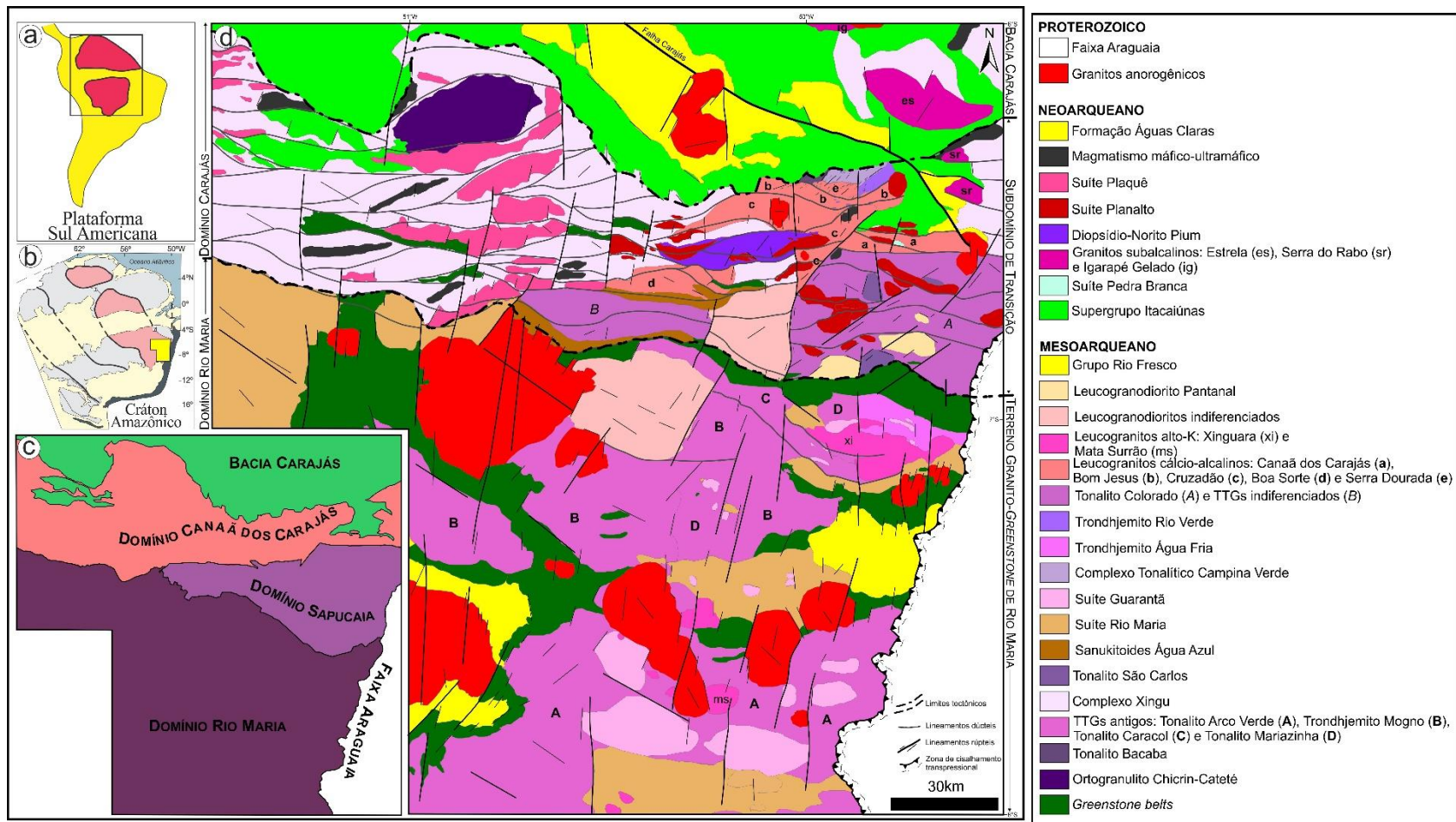


Figura 3 – Quadro tectônico regional: (a) localização do Cráton Amazônico na plataforma sul-americana; (b) Província Carajás no contexto do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira 2004); (c) proposta de compartimentação tectônica da PC segundo (Dall’Agnol *et al.* 2013); (d) mapa geológico da PC. Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* (2008), D. C. de Oliveira *et al.* (2010), Santos *et al.* (2012), Guimarães *et al.* (2012), Gabriel & de Oliveira (2013), Feio *et al.* (2013), Dall’Agnol *et al.* (2013).

## 7. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

### 7.1 SUITE INTRUSIVA VELHO GUILHERME

A Suíte Intrusiva Velho Guilherme (Abreu & Ramos 1974; Dall’Agnol *et al.* 1993; Macambira & Vale 1997; Teixeira *et al.* 2002), está localizada na região do Xingu, porção noroeste do Cráton Amazônico. É formada pelos granitos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Benedita, Ubim-Sul, Ubim-Norte, Rio Xingu, Serra da Queimada, Mocambo e Bom Jardim, intrusivos em rochas arqueanas do Domínio Rio Maria, do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, em rochas paleoproterozoicas do Grupo São Felix, do Granito Parauarí e em vulcânicas do Supergrupo Uatumã. Possuem idades de cristalização em torno de 1,88 – 1,86 Ga, caráter reduzido e hospedam mineralizações de Sn e W em suas rochas mais evoluídas e hidrotermalizadas (leucogranitos) (Dall’Agnol *et al.* 1993, 2005; Teixeira 1999; Teixeira *et al.* 2002, 2005; Lamarão *et al.* 2012; Melo 2019). As altas razões Fe/(Fe+Mg), os baixos valores de SM e a ausência de magnetita e dominância de ilmenita permite inseri-los na série Ilmenita (Ishihara 1981). As rochas que compõem a Suíte Intrusiva Velho Guilherme são isotrópicas, metaluminosas a peraluminosas, variando predominantemente de sienograníticas a álcali-feldspato graníticas, com assinaturas geoquímicas de granitos tipo A intraplaca (Pearce *et al.* 1984; Whalen *et al.* 1987), do subtipo A2 (Eby 1992). Mineralizações de cassiterita, wolframita, fluorita, molibdenita e topázio são comuns nesses corpos, geralmente acompanhando as rochas mais evoluídas e intensamente hidrotermalizadas e corpos de greisens associados (Teixeira 1999; Teixeira *et al.* 2005; Lamarão *et al.* 2012; Melo 2019).

#### 7.1.1 Granito Bom Jardim (GBJ)

O GBJ (Figura 4) é uma intrusão subcircular localizada na margem direita do Rio Xingu, sul de São Félix do Xingu. Aflora em uma área de cerca de 200 km<sup>2</sup> e apresenta rochas expostas às margens e ao longo do Rio Xingu (Lamarão *et al.* 2012). É intrusivo nos andesitos da Formação Sobreiro, nos riolitos das Formações Iriri e Santa Rosa (Juliani & Fernandes 2010) pertencentes ao Supergrupo Uatumã (Macambira & Vale 1997; Vasquez *et al.* 2008). É formado por rochas isotrópicas, de cor rosa avermelhada nas facies monzogranítica a sienogranítica e granulação média a grossa (Pinho 2009). A biotita, intensamente cloritizada, é fase máfica dominante, enquanto o anfibólio ocorre localmente nos monzogranitos (Lamarão *et al.* 2012); monzogranitos e

sienogranitos do GBJ foram afetados, em diferentes intensidades, por alterações tarde a pós-magmáticas. Rochas greisenizadas associadas mostram concentrações mais elevadas de cassiterita; cristais de wolframita, pirita e fluorita foram identificados em veios milimétricos a centimétricos de quartzo como alteração pervasiva da cúpula do GBJ (Pinho 2009, Lamarão *et al.* 2012).

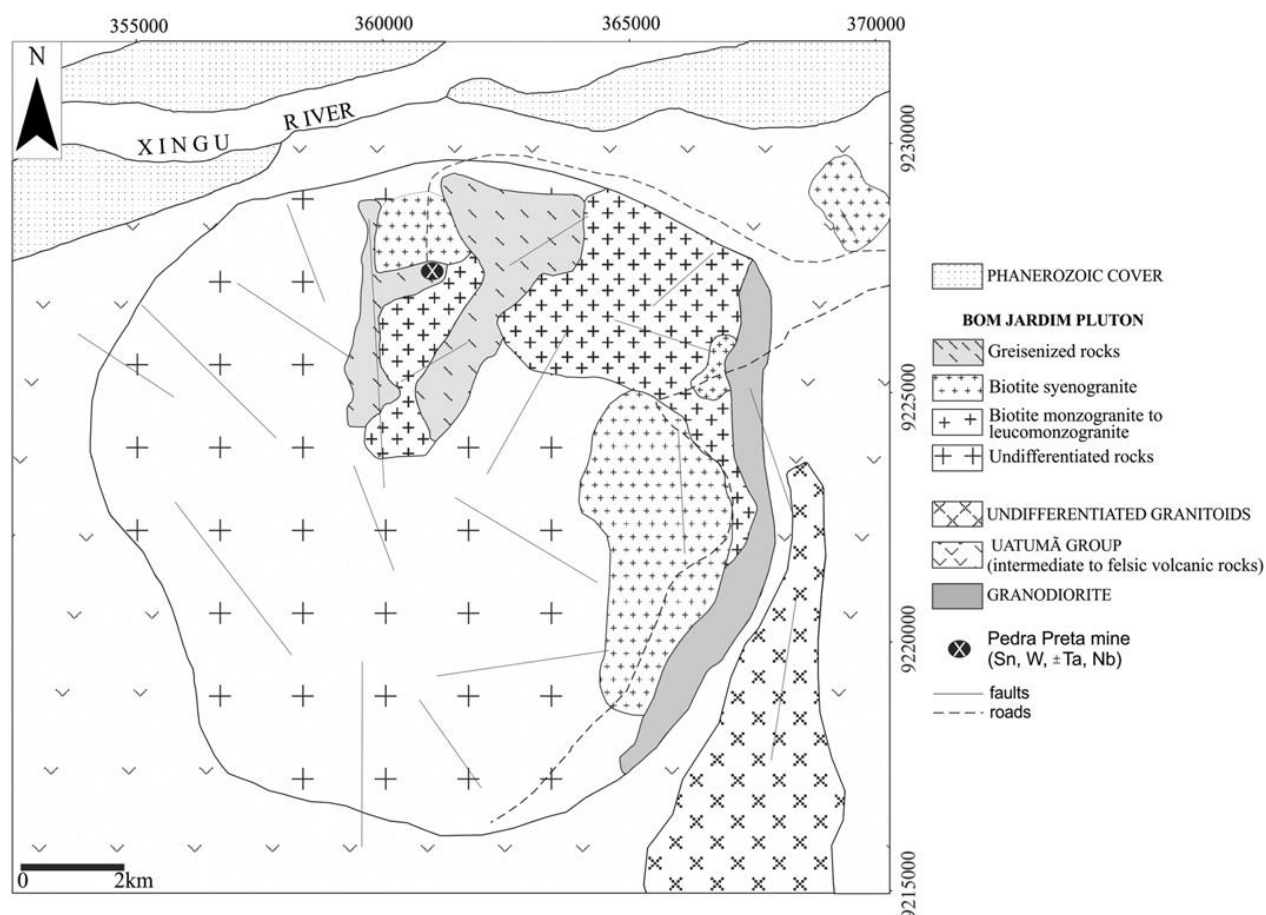


Figura 4: Mapa geológico do Granito Bom Jardim. Fonte: Lamarão *et al.* (2012).

### 7.1.2 Granito Serra da Queimada (GSQ)

O GSQ foi estudado preliminarmente por Macambira & Vale (1997) e Pinho (2005); corresponde a um plúton granítico subcircular intrusivo em rochas supracrustais do Grupo São Félix, aflorando em uma área de cerca de 20 km<sup>2</sup>; é formado por rochas isotrópicas, com textura fanerítica média a grossa e coloração variando de rosa-acinzentada a cinza levemente esverdeada (Pinho 2005). Melo (2019) identificou rochas porfiríticas ricas em K-feldspato e plagioclásio alterados na porção N-NW do corpo; biotita monzogranitos orientados ocorrem nesta porção,

porém estão restritos às bordas do granito. Nas porções leste e sul ocorrem as rochas mais características e dominantes do maciço, representadas por sienogranitos ricos em biotitas fortemente alteradas, enquanto na porção mais ao sul foram identificados biotita monzogranitos com mineralogia acessória semelhante as dos sienogranitos, porém com a presença de magnetita e titanita magmática, incomum em granitos reduzidos (Melo 2019). O GSQ forma serras irregulares com orientação E-W e aflora como lajedos e blocos isolados ao longo das viciniais de acesso ao corpo, bem como blocos rolados na base das serras com vênulas milimétricas que seccionam a rocha em diversas direções, indicando, muito provavelmente, a movimentação de fluídos posteriores a sua cristalização (Pinho 2005), Figura 5.

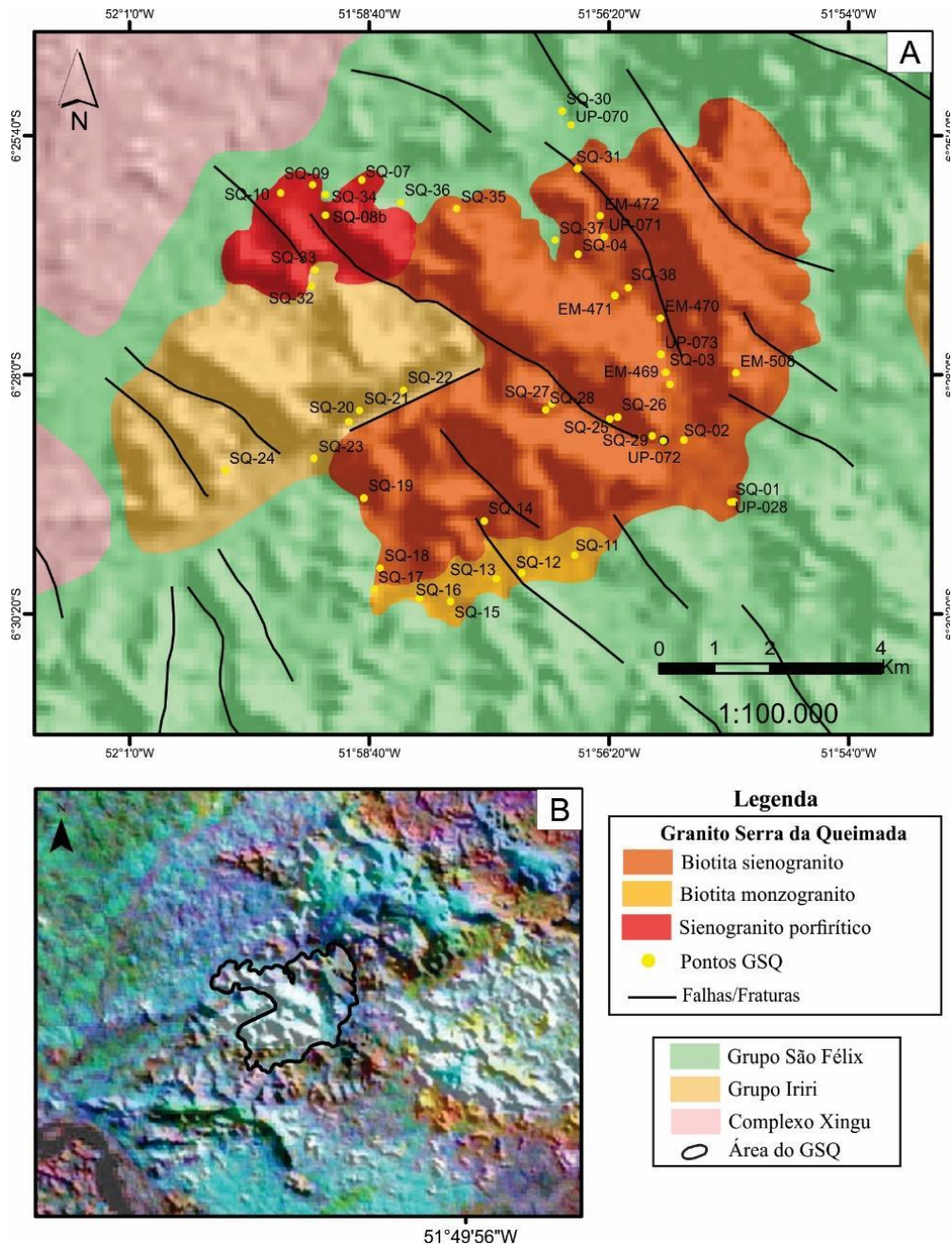


Figura 5: A) Mapa geológico do Granito Serra da Queimada; (B) Imagem aerogeofísica da região de ocorrência do GSQ mostrando sua delimitação. Fonte: Melo (2019).

## 7.2 SUITE JAMON

A Suíte Jamon é formada por granitos oxidados da série magnetita, com altas razões Fe/(Fe+Mg) e elevados valores de SM, localmente contendo mineralizações de wolframita associada (depósito de Pedra Preta). É intrusiva em granitoides arqueanos e greenstone belts do

Domínio Rio Maria, porção sul da PC (Dall’Agnol *et al.* 2006, 2005; Rämö *et al.* 2002) e representada pelos maciços: Marajoara (Santos *et al.* 2018), Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1997a, 1999b), Musa (Gastal 1987, 1988); Manda Saia (Leite 2001), Bannach (Huhn *et al.* 1988; Duarte 1992; Almeida *et al.* 2006; Oliveira *et al.* 2008) e Redenção (Montalvão *et al.* 1982; Vale & Neves 1994; Barbosa & Lafon 1996; Oliveira *et al.* 2005; Rämö *et al.* 2002; D.C. de Oliveira *et al.* 2010). Esses granitos apresentam contrastes na natureza de suas fontes, temperatura de fusão, conteúdo de água e fugacidade de oxigênio dos magmas.

### **7.2.1 Granito Bannach (GBANN)**

É um batólito isotrópico de forma elíptica com aproximadamente 800 km<sup>2</sup> de área, com seu eixo principal medindo 40 km, orientado na direção NNW (Figura 6); secciona a foliação regional E-W das unidades arqueanas nas quais está colocado (Almeida *et al.* 2006). É intrusivo no Trondhjemitó Mogno (Huhn *et al.* 1988; Almeida *et al.* 2011), em rochas sanukitoides da Suíte Rio Maria (M.A. de Oliveira *et al.* 2010), no Tonalito Arco Verde ou outras associações TTG (Duarte 1992; Almeida *et al.* 2011), no greenstone belt do Supergrupo Andorinhas, localizado a noroeste do maciço e no leucogranito potássico Mata Surrão (Duarte 1992; Lafon *et al.* 1994; Althoff *et al.* 2000; Almeida *et al.* 2010). Apresenta 8 fácies monzograníticas (Almeida *et al.* 2006), com granulação e conteúdo variável de minerais máficos, contendo quartzo, plagioclásio e feldspato potássico como constituintes essenciais; biotita e anfibólio, este limitado às fácies mais precoces, são os principais minerais máficos. Zircão, titanita, apatita, allanita, magnetita e ilmenita são acessórios primários, enquanto clorita, sericita, muscovita e fluorita figuram como secundários (Mesquita *et al.* 2018). Neste estudo foram estudadas titanitas da fácies anfibólio biotita monzogranito (ABMG; amostra ADR-35).

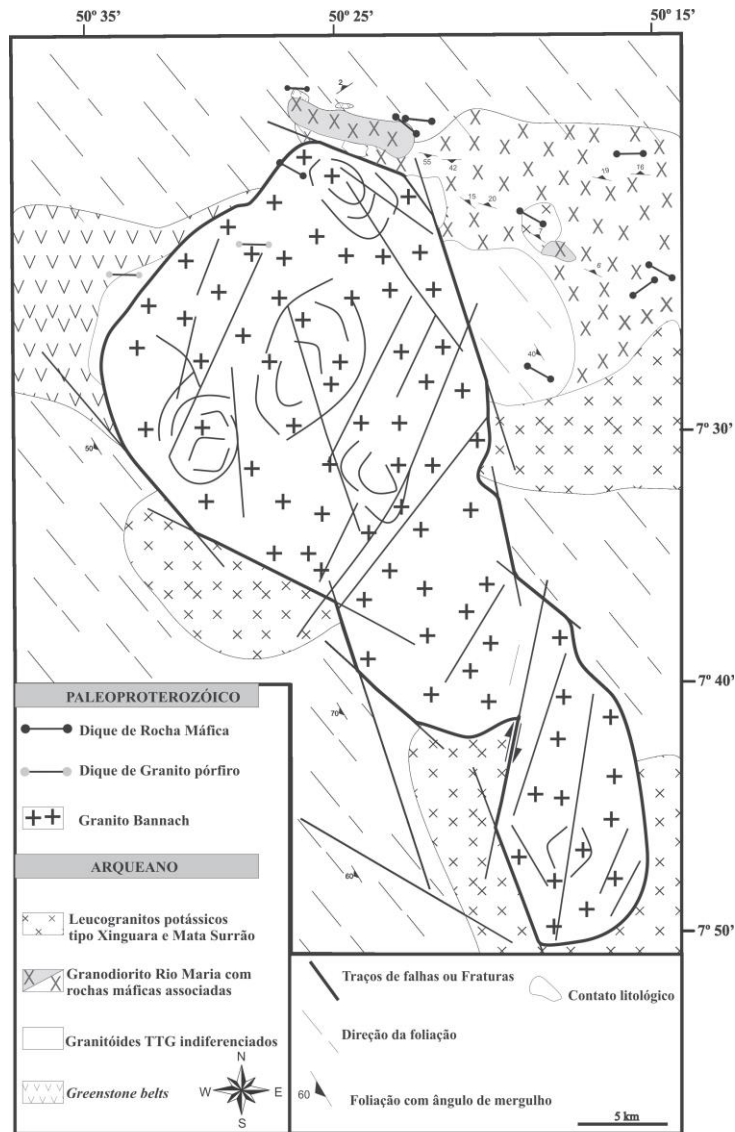


Figura 6: Mapa geológico da região de ocorrência do Granito Bannach. Fonte: Almeida *et al.* (2006).

### 7.2.2 Granito Redenção (GRED)

Está localizado na porção sudeste do Estado do Pará, parte sul da Província Carajás; possui forma subcircular com aproximadamente 625 km<sup>2</sup>, sendo a sua parte central constituída por morros e serras de encostas íngremes (Montalvão *et al.* 1982; Vale & Neves 1994; Barbosa & Lafon 1996; Dall’Agnol *et al.* 2005, 2006; Oliveira *et al.* 2005, 2010). É intrusivo em rochas granitoides Arqueanas pertencentes ao Terreno Granito-greenstone de Rio Maria (Gastal 1987; Huhn *et al.* 1988; Dall’Agnol *et al.* 2005; Dall’Agnol & Oliveira 2007; Oliveira *et al.* 2008) e formado essencialmente por rochas monzograníticas, localmente cortadas por diques sienograníticos

leucocráticos, equigranulares grossos a heterogranulares médios a grossos, com variações porfíricas a equigranulares. Apresenta nove variedades de granitos (Oliveira *et al.* 2005), porém neste trabalho foi utilizado o biotita monzogranito (BMG; amostra DCR-33B) com mineralogia essencial composta por microclina, quartzo e plagioclásio e biotita cloritizada em diferentes intensidades como principal varietal; titanita, allanita, apatita e zircão como acessórios primários; sericita-muscovita, epidoto, fluorita como fases secundárias (Figura 7).

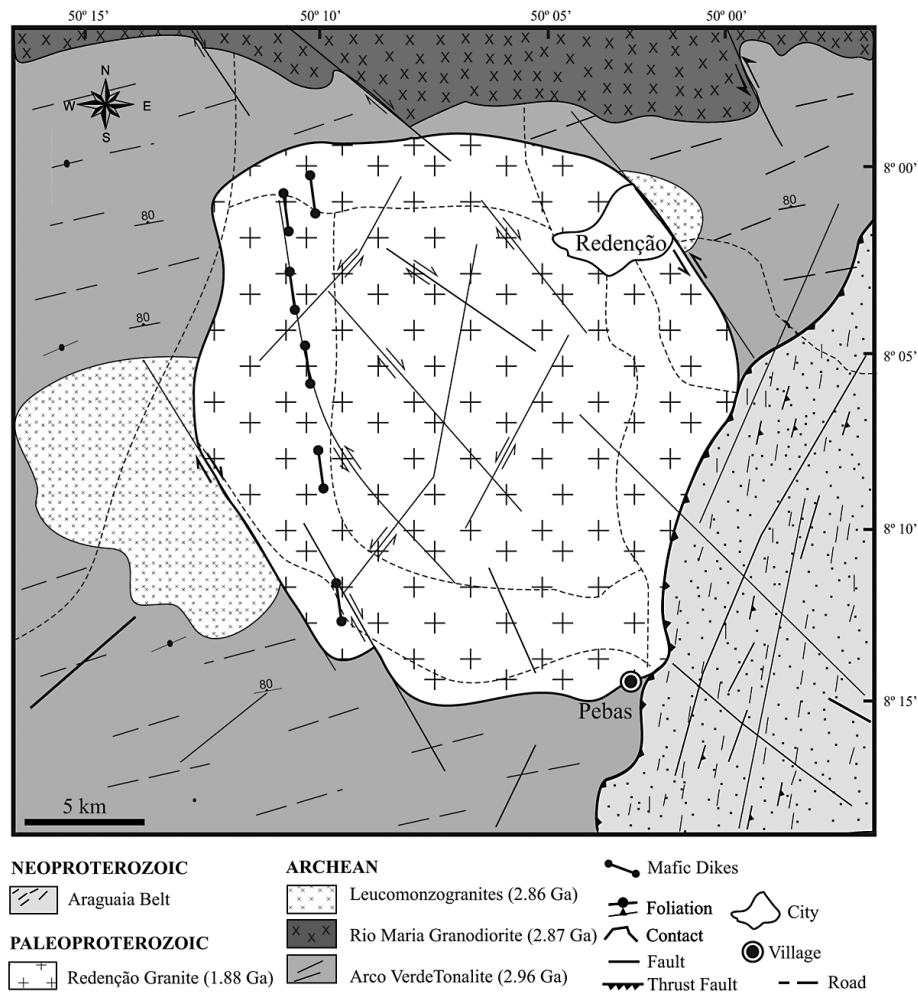


Figura 7: Mapa geológico do Granito Redenção. Fonte: Oliveira *et al.* (2005).

## 8. TITANITA EM ROCHAS GRANITOIDES

### 8.1 INDICADOR PETROGENÉTICO

Depósitos de estanho estão geneticamente relacionados às rochas graníticas. Em decorrência disso, vários estudos procuram estabelecer critérios mineralógicos, petrológicos e geoquímicos para granitos portadores de Sn. Por outro lado, as micas (principalmente biotita), consideradas importantes minerais carreadores de Sn, são facilmente alteradas para clorita, o que pode comprometer sua eficácia como um bom mineral indicador para este tipo de mineralização.

A titanita ( $\text{CaTiSiO}_5$ ), por sua vez, é um mineral acessório comum em granitos cálcio-alcalinos, metaluminosos e oxidados, onde forma cristais magmáticos primários bem desenvolvidos (Robinson & Miller 1999; Piccoli *et al.* 2000). Em granitos reduzidos e peraluminosos a titanita ocorre apenas pontualmente, como cristais pouco desenvolvidos em suas fácies menos evoluídas e geralmente associados a cristais de anfibólio; se desenvolvem também ao longo dos planos de clivagem de biotitas cloritizadas ou como produto de alteração da ilmenita, formando finos aglomerados de cristais secundários. Cristais de titanita incorporam durante sua cristalização uma grande variedade de elementos maiores, menores e traços geologicamente importantes (Al, Fe, Mn, Sn, W, Mo, Nb, Ta, Zr, ETR Y, U, Th, Pb, Sr), os quais podem ser usados para rastrear composições magmáticas, fornecer idades geocronológicas, informações sobre suas condições de formação e sobre o potencial metalogenético de sua rocha hospedeira (Pidgeon *et al.* 1996; Che *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013). O Zr na titanita pode ser usado para estimar sua temperatura de saturação no magma (Hayden *et al.* 2008), enquanto teores de Ga e Ce podem fornecer informações quanto ao estado de oxidação do magma (King *et al.* 2013; Xu *et al.* 2015).

### 8.2. TRAÇADOR DE MINERALIZAÇÕES

As discussões sobre a importância da titanita como um mineral indicador de mineralização vêm crescendo mundialmente (Frost *et al.* 2001; Broska *et al.* 2007; Smith *et al.* 2009; Xie *et al.* 2010; Che *et al.* 2013; Ismail *et al.* 2014; Wang *et al.* 2013; Xu *et al.* 2015). Os estudos mostram que cristais de titanita apresentam grande potencial como mineral guia de mineralizações de Sn, W, Cu, Mo (Xie *et al.* 2010; Che *et al.* 2013; Xu *et al.* 2015). Segundo Lehmann *et al.* (1990), o Sn apresenta geoquímica incompatível, fator que o torna preferencialmente enriquecido em rochas fracionadas dentro da crosta terrestre, como as rochas graníticas. O Ti da titanita pode ser

substituído por Sn em intensidades variadas, formando uma solução sólida de titanita-malaiaita ( $\text{CaSnSiO}_5$ ), o que permite considerar a titanita como um importante mineral carreador de Sn e indicador de granitos estaníferos. Porém, de acordo com estudos anteriores, titanitas com elevadas concentrações de Sn apresentam origem hidrotermal e são encontradas em pegmatitos graníticos. Exemplos disso são as titanitas hidrotermais do pegmatito de Zólkiewka, Polônia, com teores médios de  $\text{SnO}_2$  da ordem de 2,81 (% em peso), podendo atingir até 15,4 (% em peso; Xie *et al.* 2008).

Em geral, os depósitos de Sn estão associados a granitos peraluminosos reduzidos, como nos depósitos de Pitinga no Amazonas, da região do Xingu no sudeste do Pará, os depósitos de Rondônia (RO), ou o granito Beauvoir, França (Cuney *et al.* 1992; Raimbault *et al.* 1995), Entretanto, no SE da China existem grandes depósitos de Sn, W e Mo associados a granitos tipicamente cálcio-alcálicos e metaluminosos. Exemplos típicos são representados pelos plutons Qitianling, Pulang, Huashan, Guposhan e Tongchanggou que hospedam grandes depósitos de Sn, W, Mo e Cu (Xie *et al.* 2010; Pan *et al.* 2018). Como a titanita é um mineral acessório frequente em granitos cálcio-alcálicos oxidados e raro a ausente nos reduzidos, trabalhos envolvendo titanita como indicador metalogenético se concentram, em grande parte, nos plutons do SE da China (alguns deles mencionados acima). Entretanto, outros granitos peraluminosos também confirmam a titanita como um bom indicador desse tipo de mineralização (Cuney *et al.* 1992; Raimbault *et al.* 1995; Morad *et al.* 2009).

## **9. RESULTADOS**

### **9.1 ASPECTOS TEXTURAIS E MORFOLÓGICOS**

#### **9.1.1 Granito Bom Jardim**

Os biotita monzogranitos a biotita leucomonzogranitos (BMG - BLMG) do Granito Bom Jardim (LAMARÃO et al., 2012) estudados neste trabalho, são compostos por quartzo, álcali-feldspato (ortoclásio) e plagioclásio, contendo como minerais varietais biotita e anfibólio. Os minerais acessórios são fluorita, allanita, zircão e opacos (ilmenita e magnetita) e os secundários são clorita, sericita, titanita e argilominerais. Apresentam textura granular hipidiomórfica e biotita como fase máfica dominante. Os minerais acessórios encontram-se comumente associados às biotitas. Os cristais de quartzo são subédricos à anédricos, ocupando cerca de 40% da rocha. O ortoclásio está disposto de forma anédrica, com alguns cristais alterando para argilominerais; ocupam cerca de 20% da rocha e apresentam micropertitas. O plagioclásio ocorre de forma subédrica, ocupando cerca de 15% da rocha, com alguns cristais zonados e sericitizados dificultando a determinação de sua composição (possivelmente  $An \leq 30$ ). Raros cristais de anfibólio apresentam-se como pseudomorfos associados aos minerais opacos (ilmenita e magnetita).

Os biotita sienogranitos (BSG) apresentam textura granular hipidiomórfica e são compostos por quartzo, ortoclásio, plagioclásio e biotita como única fase máfica; os principais minerais acessórios são magnetita, ilmenita, zircão e apatita em pequenas proporções associados aos cristais de biotita. O quartzo forma cristais subédricos à anédricos, ocupando cerca de 45% da rocha. Ortoclásio micropertítico, com cerca de 25% da rocha, está disposto de forma anédrica, localmente apresentando intercrescimento granofírico. O Plagioclásio é subédrico, parcialmente sericitizado, com cerca de 15% na rocha. A biotita, com cerca de 10% da rocha, forma cristais subédricos, apresenta inclusões de zircão e opacos e, em alguns casos, apresenta titanita secundária como produto de sua cloritização (Figura 8A-B-C).

#### **9.1.2. Granito Serra da Queimada**

No Granito Serra da Queimada (MELO, 2019) foi analisado o biotita-anfibólio monzogranito (BAMG; amostra GSQ-35) formado essencialmente por quartzo, álcali-feldspato e

plagioclásio, tendo como minerais varietais biotita e anfibólio e como acessórios titanita, zircão, apatita, ilmenita e magnetita (Figura 8- D-E).

O BAMG apresenta textura granular hipidiomórfica, quartzo subédrico a anédrico com proporção modal de cerca de 40% da rocha. O ortoclásio é anédrico, pertítico e alterado para argilominerais; ocupa cerca de 23% da rocha. O plagioclásio é subédrico, sericitizado e ocupa cerca de 18% da rocha. A biotita (aproximadamente 5% da rocha) é subédrica e encontra-se associada aos minerais acessórios. O anfibólio é subédrico a anédrico, ocupa cerca de 10%, e ocorre associado com titanita e zircão.

A Figura 8 apresenta características macroscópicas dos BSG do GBJ e dos BAMG do GSQ, além de fotomicrografias dessas respectivas rochas.

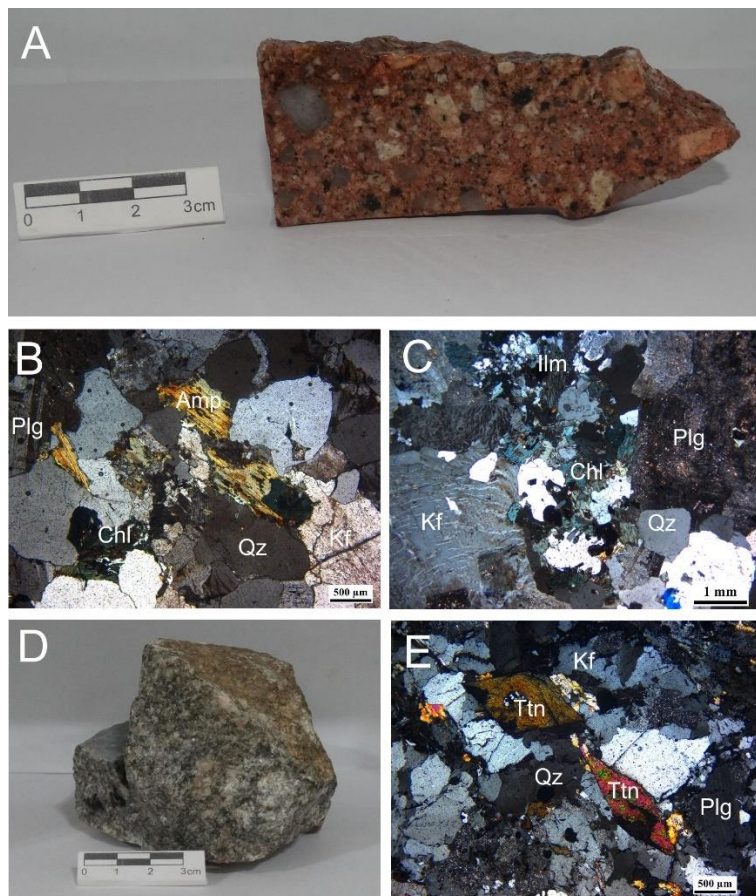


Figura 8- A) Feições macroscópicas do GBJ; B e C) Fotomicrografias do GBJ, mostrando feições texturais características. D) Aspecto macroscópico do GSQ. E) Fotomicrografia mostrando cristais de titanita analisados por MEV-EDS. Kf=álcali-feldspato, Qz=quartzo, Ttn=titanita, Ilm=ilmenita, Chl=clorita Amp=anfibólio, Plg=plagioclásio. Fonte: Autor.

### **9.1.3. Granito Bannach**

Nos biotita monzogranitos (BMG) do Granito Bannach (ALMEIDA; DALL'AGNOL; OLIVEIRA, 2006) estão presentes quartzo, álcali feldspato e plagioclásio, além da biotita como máfico dominante; cristais de anfibólio ocorrem pontualmente. Os minerais acessórios são titanita, zircão, apatita e opacos (Figura 9-A-B-C-D). O quartzo é subédrico e ocupa cerca de 40% da rocha. O álcali-feldspato apresenta-se anédrico, com alguns cristais alterando para argilominerais; ocupa cerca de 28% da rocha. O plagioclásio ocorre como cristais subédricos em cerca de 17% da rocha; alguns cristais estão zonados e sericitizados. Biotita corresponde a cerca de 10% da rocha; forma cristais subédricos a anédricos contendo inclusões de zircão ou associada com a titanita.

### **9.1.4. Granito Redenção**

É formado por inúmeras facies contendo clinopiroxênio, anfibólio e biotita como principais minerais máficos (OLIVEIRA et al., 2005); nesse trabalho foi estudada a fácies biotita monzogranito (BMG) composta essencialmente por quartzo, álcali-feldspato (ortoclásio) e plagioclásio, tendo como mineral varietal a biotita e como acessórios titanita, zircão, apatita, ilmenita e magnetita (Figura 9-E-F).

O quartzo é subédrico à anédrico e ocupa cerca de 45% da rocha. O ortoclásio é micropertítico e está disposto na forma anédrica, com alguns cristais alterando para argilominerais; ocupa cerca de 25% da rocha. O plagioclásio é subédrico, sericitizado (possivelmente  $An \leq 30$ ) e ocupa cerca de 20% da rocha. A biotita forma cristais subédricos, (10% da rocha), apresenta inclusões de minerais opacos, zircão e/ou titanita.

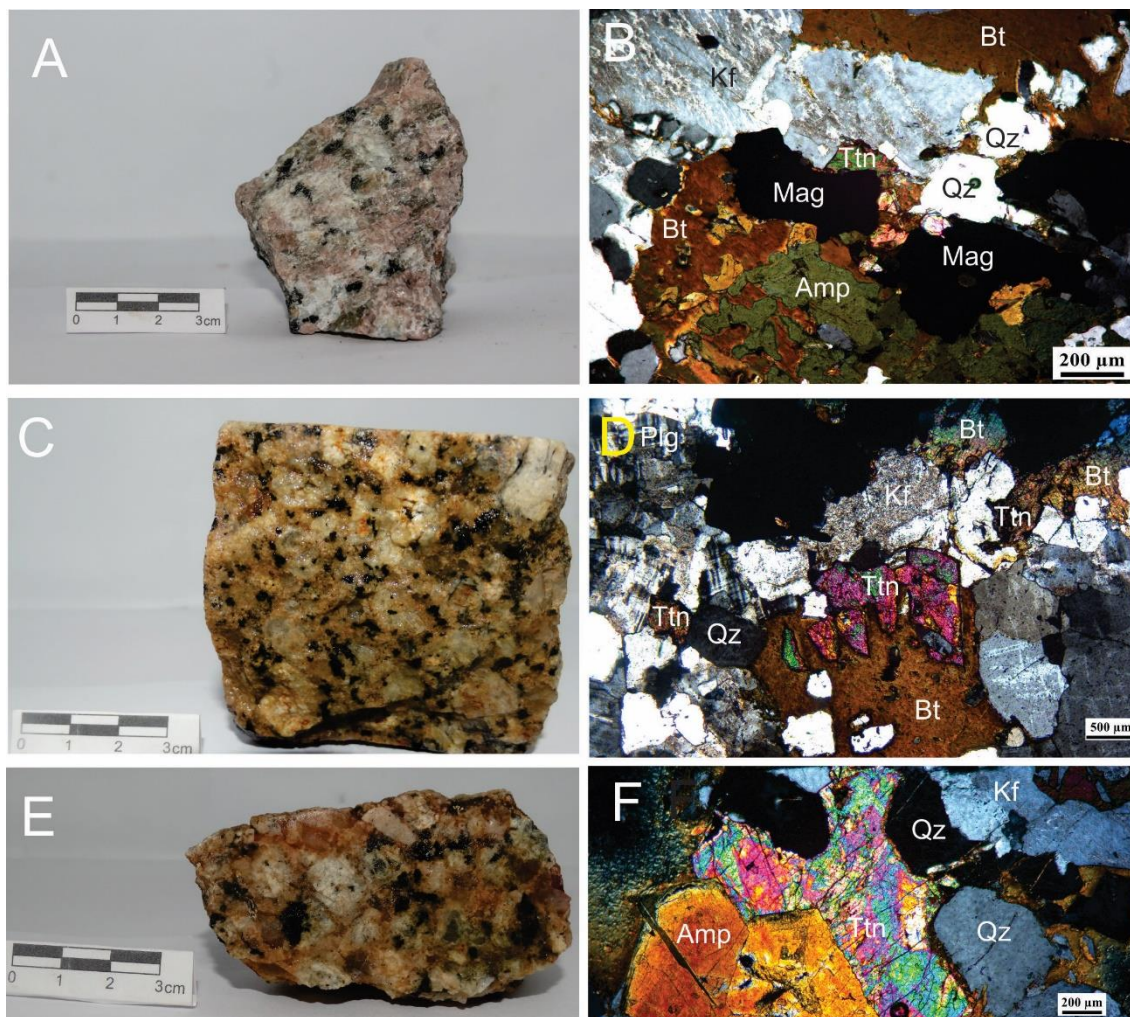


Figura 9 – A-C) Aspectos macroscópicos do Granito oxidado Bannach; B e D) Fotomicrografias do GBANN, mostrando feições texturais características, bem como anfibólio, biotita e magnetita, com titanita associadas. E) Feição macroscópica do GRED estudado neste trabalho. F) Fotomicrografia do GRED mostrando morfologia de cristais de titanita analisados por MEV-EDS. Kf=álcali-feldspato, Qz=quartzo, Ttn=titanita, Ilm=ilmenita, Bt=biotita, Mag=magnetita, Amp=anfibólio, Plg=plagioclásio. Fonte: Autor.

## 9.2 ANÁLISES DE MEV-EDS

### 9.2.1 Aspectos morfológicos

Os cristais de titanita apresentaram variações morfológicas nos diferentes corpos graníticos estudados. As Figuras 10 e 11 mostram imagens de elétrons retroespalhados de cristais de titanita dos granitos reduzidos Bom Jardim (GBJ) e Serra a Queimada (GSQ) e oxidados Bannach (GBANN) e Redenção (GRED). Na facies BMG-BLMG do GBJ, finos cristais anédricos e corroídos de titanita secundária ocorrem: (1) substituindo cristais de ilmenita, com cristais de rutilo associados (Figura 10A-B; amostra SAL-32); neste caso, a ilmenita forma restos ou “ilhas”

preservadas entre os produtos de sua alteração (titanita+rutilo), porém preserva sua forma original; (2) como produto da intensa cloritização sofrida pela biotita (Figura 10C-D; amostra SAL-42), se desenvolvendo preferencialmente ao longo dos seus planos de clivagem.

Nos BMG do GSQ (amostra GSQ-35), foram identificados raros cristais subédricos a euédricos de titanita primária associados com pseudomorfos de anfibólio, biotita e quartzo (Figura 10E-F), além de cristais anédricos de titanita secundária dispostos principalmente ao longo dos planos de clivagem da clorita (Figura 10G-H),

Nos granitos oxidados GBANN (ABMG; amostra ADR-55) e GRED (BMG; DCR-33B) ocorrem titanitas primárias euédricas a subédricas, bem desenvolvidas e isentas de alterações, comumente associadas ou inclusas em cristais de biotita (Figura 11).

### **9.2.2 Aspectos composicionais e diagramas discriminantes**

Na Tabela 2 são apresentadas análises químicas semiquantitativas de MEV-EDS representativas das titanitas secundárias utilizadas neste estudo, bem como análises das titanitas primárias do GSQ; as Figuras 12 e 13 mostram a distribuição e o comportamento geoquímico delas. Análises de MEV-EDS das titanitas primárias identificadas nos GRED e GBANN são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

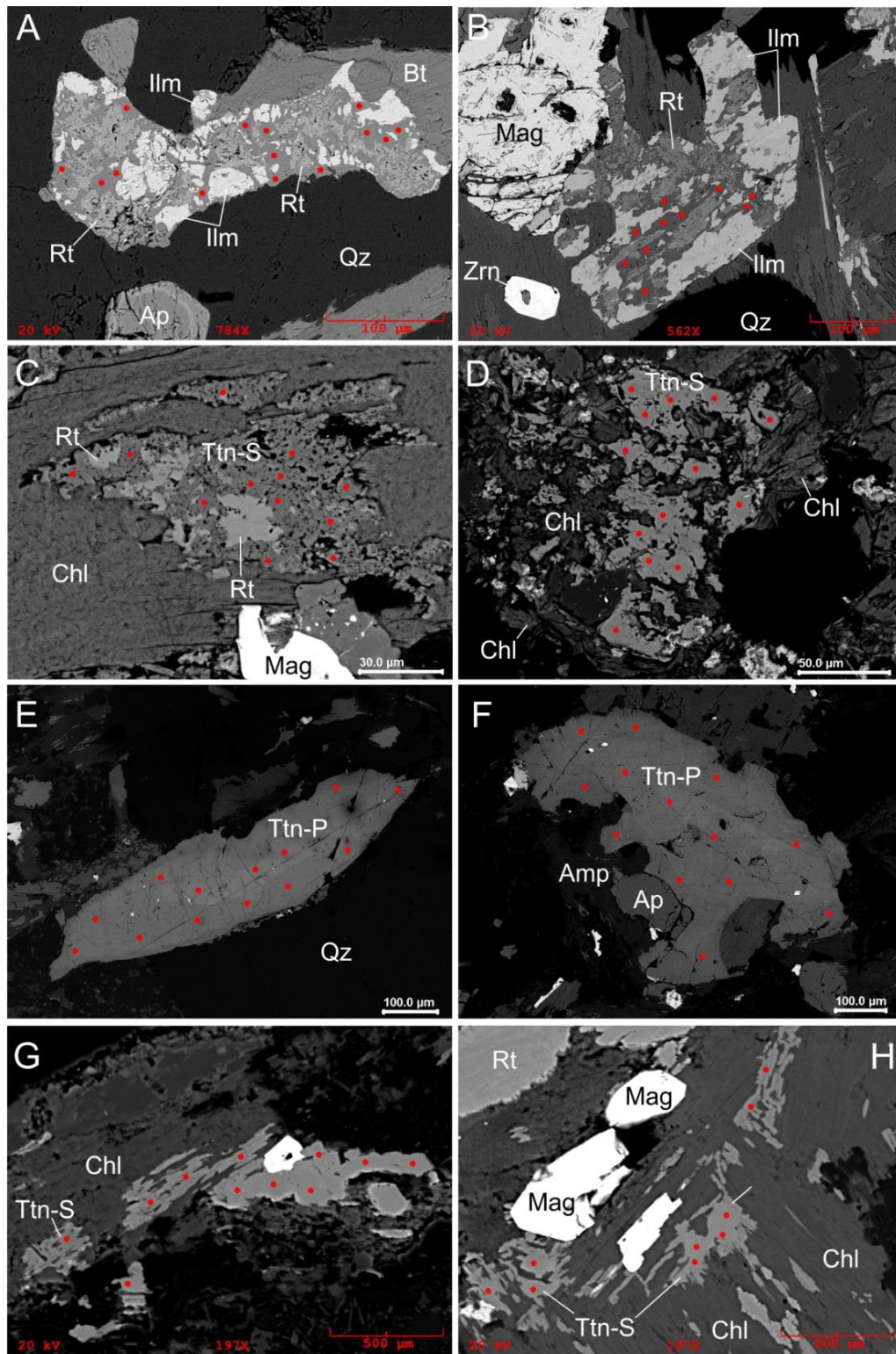


Figura 10 - Imagens de elétrons retroespalhados (ERE). Aspectos morfológicos de titanitas secundárias do GBJ: A-B= alteração da ilmenita; C-D=alteração da clorita. Titanitas do GSQ: primárias (E-F) e secundárias (G-H), provenientes da alteração da clorita; pontos vermelhos=análises semiquantitativas de MEV-EDS realizadas na Ttn, Ttn-p=titanita primária; Ttn-s=titanita secundaria; Rt=rutilo; Zrn=zircão; Chl=clorita; Mag=magnetita; Qz=quartzo; Amp=anfíbólio; Ap=apatita. Fonte: Autor.

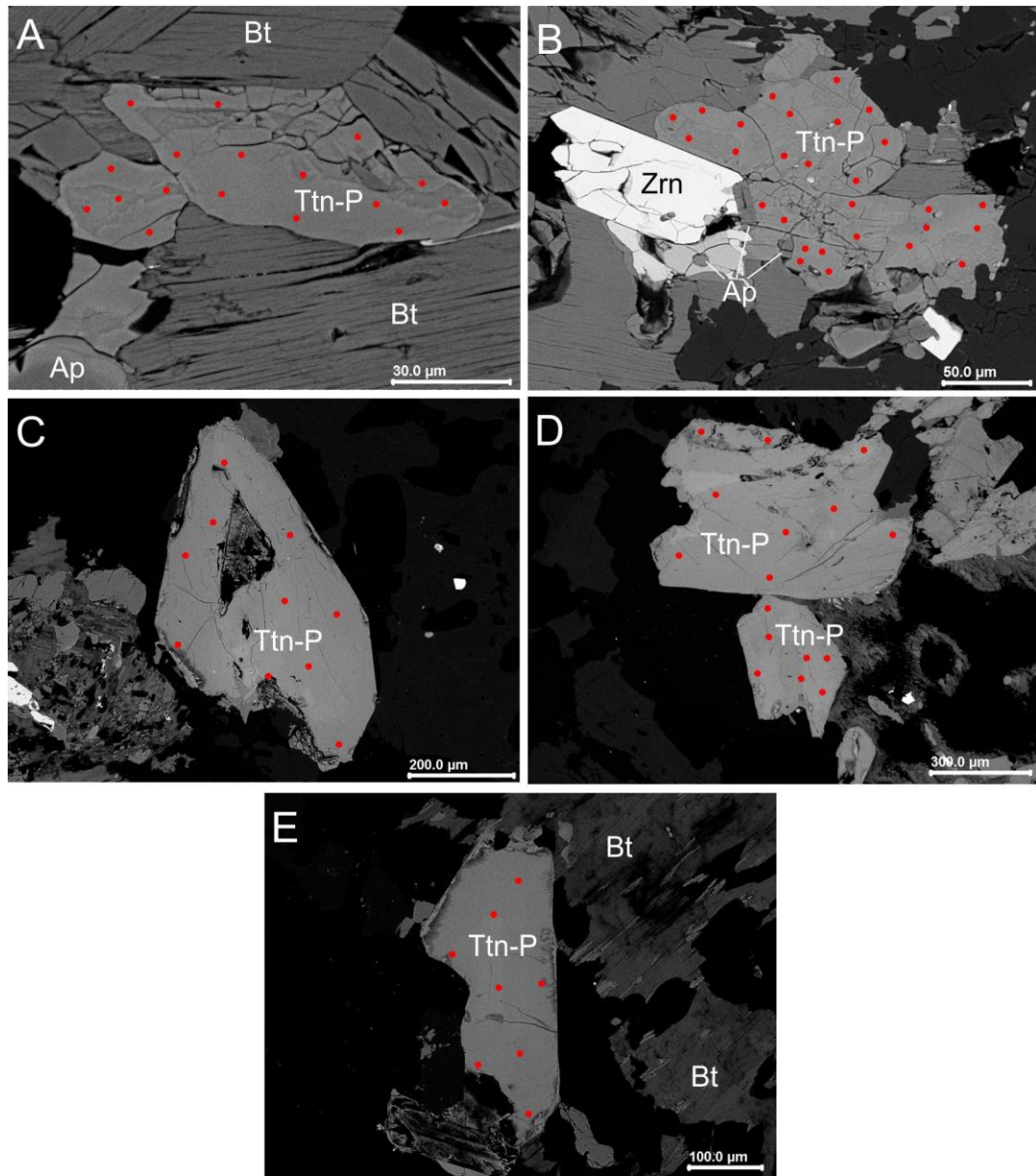


Figura 11 - Imagens de elétrons retroespalhados (ERE). Aspectos morfológicos de titanitas primárias (A-B) associadas ao GBANN e titanitas primárias associadas ao GRED (C-D-E); pontos vermelhos = análises semiquantitativas de MEV-EDS realizadas na Ttn. Ttn-p=titanita primária; Bt=biotita; Zrn=zircão. Fonte: Autor.

Tabela 2 - Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas do GBJ e GSQ.

Granito		GBJ (reduzido - Sn)															
Rocha/Amostra		BMG/SAL-32								BAMG/SAL-42							
Elem. (% peso)	Titanita Secundária (alteração da ilmenita)								Titanita Secundária (alteração da clorita)								Média
O	36,2	36,1	33,9	36,1	36,0	36,2	36,5	<b>35,9</b>	36,0	35,8	36,0	36,2	36,0	35,2	36,1	<b>35,9</b>	
Mg	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,0	0,2	0,1	0,3	0,1	0,4	0,3	<b>0,2</b>	
Al	0,2	0,5	0,2	0,3	0,3	0,3	1,0	<b>0,4</b>	1,9	3,0	2,7	3,1	1,2	3,9	3,1	<b>2,7</b>	
Si	12,7	12,7	13,4	12,7	12,5	12,9	12,5	<b>12,8</b>	13,5	12,8	13,0	12,9	12,5	13,5	12,5	<b>13,0</b>	
Ca	22,2	22,1	22,8	22,0	20,7	22,2	21,8	<b>21,9</b>	22,8	22,5	22,7	22,0	22,5	21,8	20,5	<b>22,1</b>	
Ti	25,1	24,1	25,6	25,2	25,9	24,6	23,9	<b>24,9</b>	22,9	20,4	21,2	20,8	24,0	21,0	22,9	<b>21,9</b>	
Mn	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	
Fe	1,1	0,8	1,0	1,1	1,5	1,2	0,9	<b>1,1</b>	0,4	0,7	0,5	0,5	0,3	0,9	1,3	<b>0,6</b>	
Y	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	<b>0,2</b>	0,3	0,8	0,6	1,0	0,2	0,6	0,5	<b>0,6</b>	
Nb	0,1	0,8	0,3	0,1	0,3	0,4	0,5	<b>0,4</b>	0,4	1,7	1,3	1,1	1,0	0,2	0,2	<b>0,8</b>	
Ce	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	<b>0,3</b>	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	<b>0,3</b>	
Ta	0,2	0,5	0,7	0,9	0,7	0,3	0,4	<b>0,6</b>	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	<b>0,5</b>	
Sn	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	
W	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	<b>1,1</b>	0,9	1,2	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	<b>1,2</b>	
F	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	<b>0,1</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	<b>0,0</b>	
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	
Ca+Ti	47,3	46,2	48,4	47,2	46,6	46,8	45,7	<b>46,4</b>	45,5	42,9	43,9	42,9	46,4	42,8	43,5	<b>44,0</b>	
Al+Fe	1,3	1,2	1,2	1,4	1,8	1,5	1,9	<b>2,2</b>	2,3	3,6	3,2	3,6	1,4	4,8	4,4	<b>3,4</b>	
Fe/Al	3,9	1,6	4,5	3,7	5,8	4,7	0,9	<b>3,1</b>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	<b>0,2</b>	
Sn+W	1,2	1,4	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	<b>1,2</b>	1,0	1,3	1,0	1,3	1,4	1,5	1,4	<b>1,3</b>	
Σ	2,0	2,9	2,6	2,4	2,6	2,1	2,4	<b>2,5</b>	2,3	3,7	3,0	3,1	3,1	2,4	2,6	<b>2,9</b>	

BMG=biotita monzogranito; BAMG=biotita-anfibólio monzogranito; SAL-32, 42=Nº da amostra analisada; Sn=estanho; Σ=Sn+W+Nb+Ta+Ce. Fonte: Autor.

Continuação

Granito		GSQ (reduzido - Sn)																
Rocha/Amostra		BAMG/SQ-35							BAMG/SQ-35									
Elem. (% peso)		Titanita Secundária (alteração da clorita)							Média	Titanita Primária								Média
O	36,6	35,5	35,0	35,9	34,0	37,3	36,7	<b>35,9</b>	36,9	38,1	37,7	36,1	36,5	36,3	37,1	<b>37,0</b>		
Mg	0,0	0,3	0,3	0,3	0,1	0,4	0,2	<b>0,2</b>	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0	<b>0,1</b>		
Al	2,7	4,9	3,8	3,1	4,2	1,8	3,3	<b>3,4</b>	1,1	1,3	1,2	1,3	1,6	1,2	1,1	<b>1,3</b>		
Si	12,9	12,6	15,0	12,7	13,5	13,0	12,1	<b>13,1</b>	13,9	12,6	13,0	13,9	13,1	13,9	13,4	<b>13,4</b>		
Ca	22,2	22,6	21,2	22,2	23,7	21,7	22,5	<b>22,3</b>	21,4	21,2	20,4	21,0	21,5	21,5	21,3	<b>21,2</b>		
Ti	20,4	17,3	19,7	19,2	17,7	21,4	19,1	<b>19,3</b>	22,6	22,3	22,3	22,2	22,5	22,7	22,8	<b>22,5</b>		
Mn	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>		
Fe	1,5	2,2	1,8	2,1	2,2	1,7	1,7	<b>1,9</b>	1,1	1,1	1,4	1,7	1,1	1,3	0,9	<b>1,2</b>		
Y	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	0,2	0,5	0,8	0,8	0,7	0,3	0,4	<b>0,5</b>		
Nb	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	<b>0,1</b>		
Ce	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	<b>0,4</b>	0,7	0,5	0,9	0,8	0,6	0,6	0,8	<b>0,7</b>		
Ta	0,9	0,7	0,9	1,1	0,7	0,6	0,8	<b>0,8</b>	0,5	0,6	0,5	0,7	0,4	0,6	0,5	<b>0,5</b>		
Sn	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	<b>0,2</b>	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>		
W	0,9	0,7	0,9	0,6	0,9	0,5	0,8	<b>0,7</b>	1,1	1,2	1,1	1,1	1,4	1,2	1,1	<b>1,2</b>		
F	0,8	2,1	0,6	1,6	2,1	0,4	1,6	<b>1,3</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	<b>0,0</b>		
Total	99,7	99,7	99,8	99,5	100,0	99,6	99,5	<b>99,7</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>		
Ca+Ti	42,6	39,9	40,9	41,4	41,4	43,1	41,5	<b>41,6</b>	44,0	43,5	42,7	43,2	43,9	44,2	44,1	<b>43,7</b>		
Al+Fe	4,2	7,3	5,6	5,2	6,4	3,5	5,0	<b>5,3</b>	2,2	2,4	2,6	3,1	2,71	2,5	2,0	<b>2,5</b>		
Fe/Al	0,5	0,4	0,5	0,7	0,5	0,9	0,5	<b>0,6</b>	1,0	0,8	1,1	1,3	0,7	1,1	0,8	<b>1,0</b>		
Sn+W	1,0	0,9	1,1	0,8	1,1	0,8	1,0	<b>1,0</b>	1,2	1,3	1,2	1,2	1,5	1,2	1,2	<b>1,3</b>		
Σ	2,5	2,1	2,3	2,4	2,3	1,9	2,3	<b>2,2</b>	2,5	2,6	2,8	2,8	2,6	2,6	2,6	<b>2,6</b>		

GSQ=Granito Serra da Queimada; BAMG=biotita-anfibólio monzogranito; SQ-35=Nº da amostra analisada; Sn=estanho; Σ=Sn+W+Nb+Ta+Ce. Fonte: Autor.

### ***Titanitas secundárias dos granitos reduzidos***

O enriquecimento em Al é uma característica típica de titanitas secundárias ou hidrotermais (Tullock 1979). No diagrama Ti *versus* Al (Figura 12A), as titanitas dos GBJ e GSQ apresentam um *trend* de diminuição de Ti com o aumento de Al, sugerindo substituições crescentes entre esses elementos. Entretanto, as titanitas provenientes de alteração da ilmenita do GBJ mostram conteúdos de Ti mais elevados (24,1 - 26,8 % peso) e de Al mais baixos (0,2 - 1,0 % peso), sugerindo substituições menos intensas. Por outro lado, as titanitas de alteração da clorita, em ambos os granitos, são comparativamente mais empobrecidas em Ti e mais enriquecidas em Al (Tabela 2), com as titanitas do GSQ apresentando as maiores variações nos conteúdos de Ti (16,5 - 23,3 % peso) e de Al (1,2 - 5,9 % peso), evidenciando maiores substituições entre esses elementos.

O mesmo comportamento é observado no diagrama Ti *versus* Al+Fe (Figura 12B), mostrando que o Fe também substitui o Ti nas titanitas secundárias, porém sem modificar de forma acentuada o *trend* anterior.

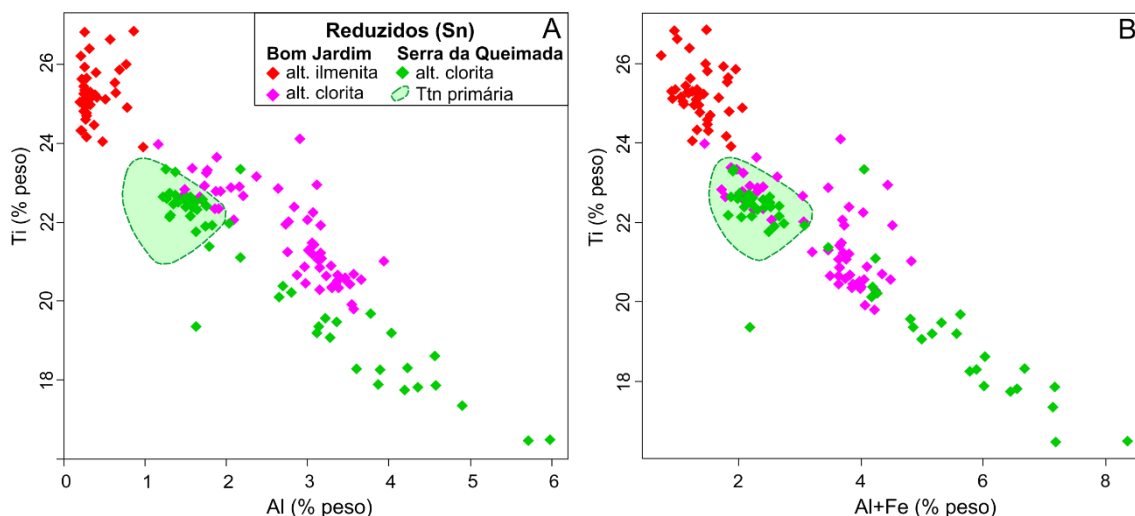


Figura 12 - Diagramas (A) Ti x Al+Fe e (B) Ca+Ti x Y de titanitas dos granitos reduzidos (GBJ e GSQ). Campo das titanitas primárias do GSQ indicado para comparações. Fonte: Autor.

As Figuras 13A, B e C mostram o comportamento das titanitas secundárias em relação aos conteúdos de Sn+W, Ta, Nb e Ce. Todas plotam ao longo do vértice Al+Fe e Sn+W, demonstrando enriquecimento nesses elementos, porém com conteúdos menos acentuados em Ta, Nb e Ce. As titanitas de alteração da ilmenita do GSQ mostram maior enriquecimento em Sn+W, enquanto aquelas provenientes da alteração da clorita são mais enriquecidas em Al+Fe, conforme demonstrado na Figura 12B.

No diagrama 13D, as titanitas secundárias mostram claramente que são mais enriquecidas na somatória  $\text{Sn+W+Nb+Ta+Ce}$  e  $\text{Al+Fe}$  e mais empobrecidas em Y. Na Figura 13E, as titanitas provenientes da alteração da clorita apresentam baixas razões  $\text{Fe/Al}$  (0,2 - 0,9; Tabela 2) e se aproximam do vértice  $\text{Sn+W+Nb+Ta+Ce}$ . As titanitas de alteração da ilmenita possuem razões  $\text{Fe/Al}$  mais elevadas e variáveis (0,9 – 5,8) e formam um trend ao longo do vértice  $\text{Sn+W+Nb+Ta+Ce}$  e  $\text{Fe/Al}$ .

O diagrama da Figura 13F confirma o maior enriquecimento em Al das titanitas provenientes de alteração de clorita e em Fe das titanitas originadas a partir da alteração de ilmenita, todas, porém com tendências à maiores concentrações de  $\text{Sn+W+Nb+Ta+Ce}$ .

As titanitas primárias do GSQ são mais enriquecidas em Ti e empobrecidas em Al e  $\text{Al+Fe}$ , embora com alguma superposição, em comparação às titanitas provenientes da alteração da clorita; entretanto, são mais empobrecidas em Ti e levemente mais enriquecidas em Al e Fe que as titanitas de alteração da ilmenita (Figuras 12A e B). Na Figura 13, mostram grande superposição com as titanitas secundárias e tendência a maiores concentrações de  $\text{Sn+W+Nb+Ta+Ce}$ .

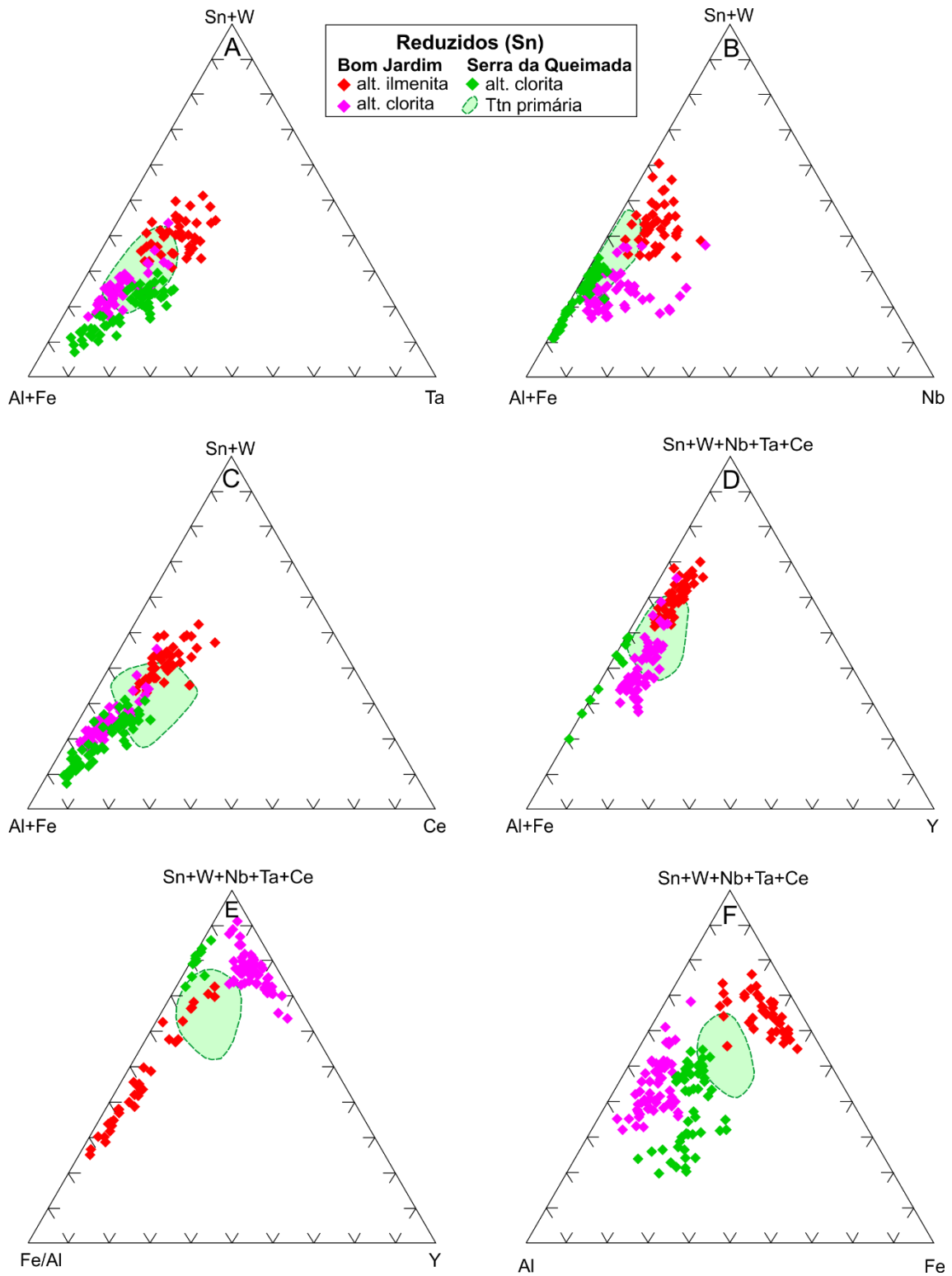


Figura 13 - Diagramas (A) Al+Fe - Sn+W - Ta; (B) Al+Fe - Sn+W - Nb; (C) Al+Fe - Sn+W - Ce; (D) Fe+Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Y; (E) Fe/Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Y, e (F) Al - Sn+W+Nb+Ta+Ce - Fe (% peso) de titanitas secundárias dos granitos reduzidos (GBJ e GSQ). Fonte: Autor

### *Titanitas primárias dos granitos oxidados e reduzido*

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas análises químicas semiquantitativas de EDS representativas das titanitas primárias dos granitos oxidados Redenção (GRED) e Bannach (GBANN); análises das titanitas primárias pertencentes ao granito reduzido Serra da Queimada (GSQ) constam da Tabela 2. As Figuras 14 e 15 mostram o comportamento geoquímico dessas titanitas nos dois tipos de granitos (oxidados e reduzidos).

Tabela 3 - Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas primárias do Granito Redenção (GRED).

Granito		GRED (oxidado)						
Rocha/Amostra		BMG/DCR-33B						
Elem. (% peso)		Titanita Primária						Média
O	34,4	34,2	34,1	34,4	35,0	34,1	34,5	<b>34,4</b>
Mg	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	<b>0,2</b>
Al	2,4	2,3	2,3	2,4	2,7	2,5	2,2	<b>2,4</b>
Si	13,3	13,2	13,2	13,4	12,7	13,2	12,9	<b>13,1</b>
Ca	22,1	22,4	22,2	22,1	22,1	22,2	22,2	<b>22,2</b>
Ti	21,2	21,5	21,5	21,5	21,3	21,3	21,7	<b>21,4</b>
Mn	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	<b>0,1</b>
Fe	2,3	2,2	2,5	2,3	2,4	2,1	2,1	<b>2,3</b>
Y	1,1	0,6	1,1	1,0	1,0	0,6	0,8	<b>0,9</b>
Nb	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	<b>0,2</b>
Ce	0,6	0,8	0,8	0,6	0,4	0,7	0,7	<b>0,7</b>
Ta	0,5	0,6	0,6	0,5	0,2	0,6	0,5	<b>0,5</b>
Sn	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>
W	1,1	1,3	1,01	1,2	1,4	1,1	1,1	<b>1,2</b>
F	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,9	0,3	<b>0,3</b>
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
Ca+Ti	43,3	44,0	43,7	43,6	43,4	43,4	43,9	<b>43,6</b>
Al+Fe	4,7	4,5	4,8	4,6	5,0	4,6	4,3	<b>4,6</b>
Fe/Al	0,9	1,0	1,1	1,0	0,9	0,8	0,9	<b>0,9</b>
Sn+W	1,2	1,4	1,1	1,3	1,5	1,2	1,2	<b>1,3</b>
$\Sigma$	2,4	3,0	2,7	2,6	2,4	2,8	2,9	<b>2,7</b>

BMG=biotita monzogranito; DCR-33B=N° da amostra analisada;  $\Sigma$ =Sn+W+Nb+Ta+Ce. Fonte: Autor.

Tabela 4: Análises semiquantitativas de MEV-EDS representativas de titanitas primárias do Granito Bannach (GBANN).

Granito		GBANN (oxidado)					
Rocha/Amostra		ABMG/ADR-55					
Elem. (% peso)		Titanita Primária					Média
O	39,8	36,0	33,6	35,7	36,4	35,4	<b>36,2</b>
Mg	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	<b>0,2</b>
Al	2,5	3,2	3,3	3,5	3,2	2,9	<b>3,11</b>
Si	12,1	13,1	14,6	12,8	13,1	13,1	<b>13,1</b>
Ca	15,7	20,5	20,9	20,5	19,6	20,2	<b>19,5</b>
Ti	18,9	18,7	18,6	18,3	18,4	19,9	<b>18,8</b>
Mn	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	<b>0,1</b>
Fe	4,5	2,8	3,3	3,0	3,4	3,0	<b>3,3</b>
Y	1,8	2,5	2,3	2,7	2,4	1,9	<b>2,3</b>
Nb	0,6	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	<b>0,2</b>
Ce	1,1	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	<b>0,6</b>
Ta	0,5	0,8	0,7	0,4	0,6	0,5	<b>0,6</b>
Sn	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>
W	0,7	0,8	0,6	1,0	0,9	1,2	<b>0,9</b>
F	0,2	0,8	1,0	1,0	0,9	0,5	<b>0,7</b>
Total	99,2	100,0	100,0	100,0	99,9	99,9	<b>99,8</b>
Ca+Ti	34,6	39,2	39,5	38,8	38,0	40,1	<b>38,4</b>
Al+Fe	7,0	6,0	6,7	6,4	6,7	6,0	<b>6,5</b>
Fe/Al	1,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	<b>1,1</b>
Sn+W	0,9	0,8	0,7	1,2	0,9	1,3	<b>1,0</b>
$\Sigma$	3,1	2,2	2,0	2,3	2,0	3,0	<b>2,4</b>

ABMG=anfíbólio-biotita monzogranito; DCR-33B=N° da amostra analisada;  $\Sigma$ =Sn+W+Nb+Ta+Ce.  
Fonte: Autor.

O diagrama Ti *versus* Al (Figura 14A) mostra um *trend* de enriquecimento em Al e de empobrecimento em Ti das titanitas dos corpos oxidados GRED e GBANN, com maior enriquecimento destas últimas. As titanitas primárias do GSQ são comparativamente mais enriquecidas em Ti e mostram menor variação nos conteúdos de Al. No diagrama Ti *versus* Al+Fe (Figura 14B), o *trend* negativo se mantém, demonstrando que Fe e Al substituem de modo mais intenso o Ti das titanitas do GBANN, seguido das titanitas do GRED e GSQ.

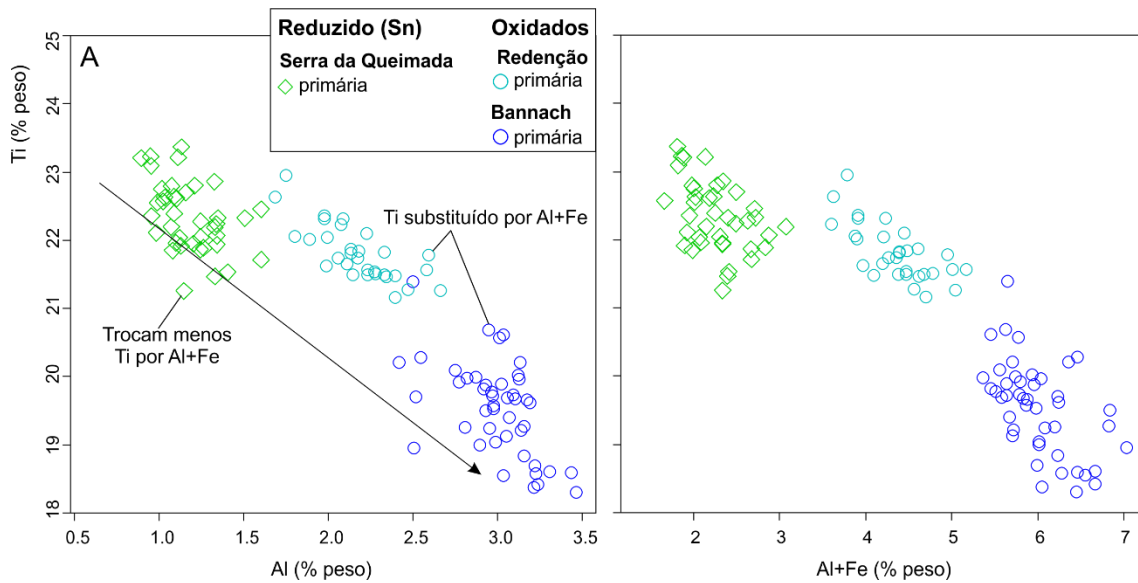


Figura 14 - Diagramas (A) Ti x Al e (B) Ti x Fe de titanitas primárias de granitos oxidados (GBANN e GRED) e reduzido (GSQ). Fonte: Autor.

Nos diagramas da Figura 15A, B e C, observa-se o maior enriquecimento em Al+Fe das titanitas primárias do GBANN e GRED, conforme demonstrado na Figura 14. Nota-se também que as titanitas primárias do GSQ são mais enriquecidas em Sn+W e se comportam de maneira similar às titanitas secundárias dos granitos reduzidos (Figuras 12 e 13).

Na Figura 14D as titanitas primárias dos GRED e GBANN mostram, além de concentrações mais elevadas em Al+Fe, conteúdos mais elevados de Y; a Figura 14E torna mais evidente o enriquecimento em Y ao utilizar a razão Fe/Al. Por outro lado, as titanitas primárias do GSQ apresentam conteúdos mais baixos de Y se aproximam do polo Sn+W+Nd+Ta+Ce.

Al e Fe estão distribuídos proporcionalmente nas titanitas primárias dos granitos oxidados e reduzido (Figura 14F), porém as titanitas do GSQ confirmam seu maior enriquecimento na somatória Sn+W+Nd+Ta+Ce.

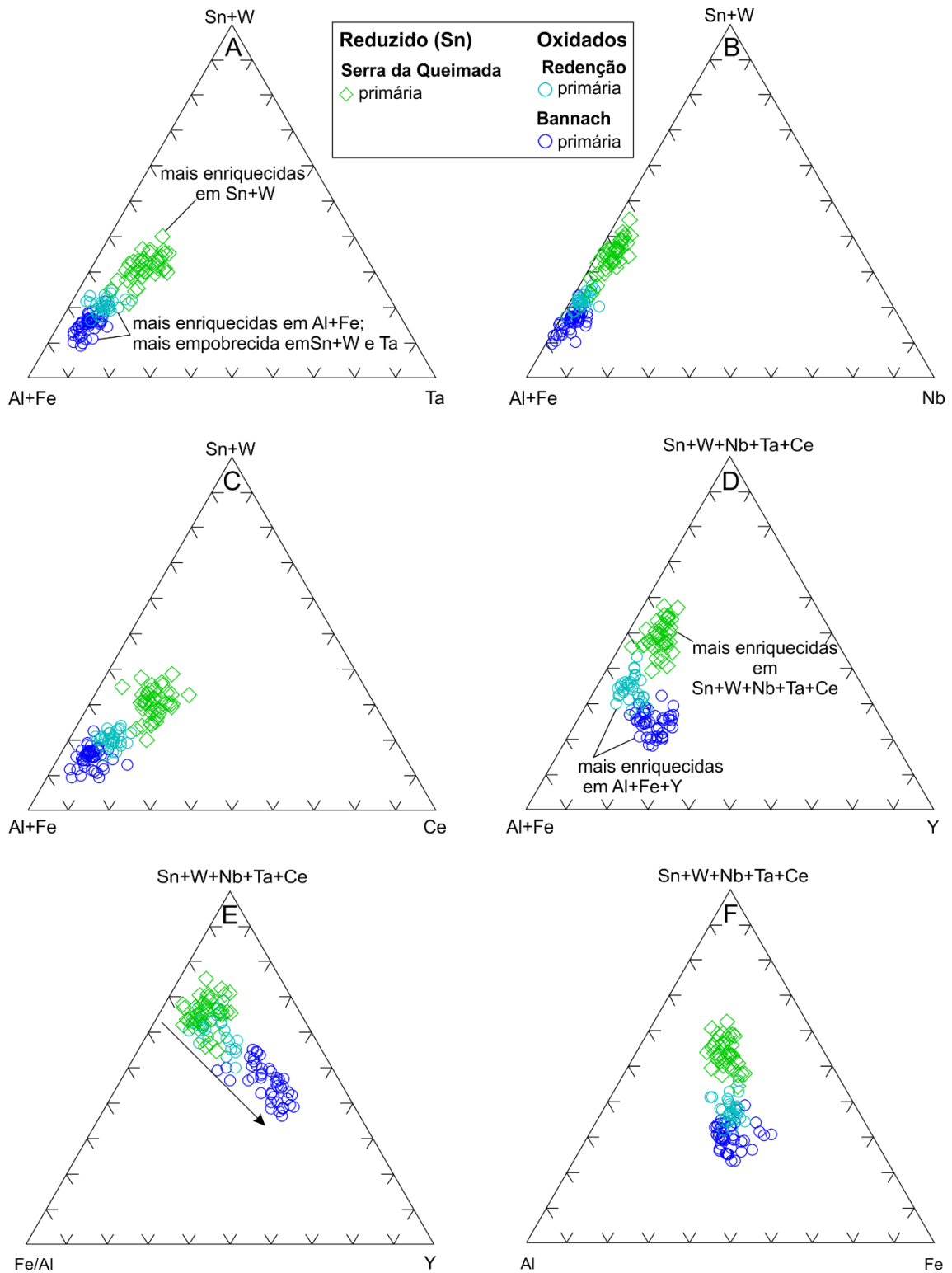


Figura 15- Diagramas (A) Al+Fe x Sn+W x Ta: (B) Al+Fe x Sn+W x Nb: (C) Al+Fe x Sn+W x Ce: (D) Al+Fe x Sn+W+Nb+Ta+Ce x Y; (E) Fe/Al x Sn+W+Nb+Ta+Ce x Y e Al x Fe x Sn+W+Nb+Ta+Ce, (% peso) de titanitas primárias do granito reduzido (GSQ) e oxidados (GBANN e GRED) estudadas. Fonte: Autor.

## 10. COMPARAÇÃO COM OUTRAS TITANITAS

A Tabela 5 mostra análises de titanitas primárias e secundárias, provenientes da alteração de cristais de clorita, do granito estanífero Qitianling, sul da China (Xie *et al.* 2010) e de granitos Proterozoicos do SE da Suécia (Morad *et al.* 2009), bem como dados representativos das titanitas deste estudo baseados na fórmula química calculada para 5 átomos de oxigênio por unidade de fórmula (apfu). A Figura 16 mostra imagens de ERE e o comportamento dessas titanitas em termos de conteúdos de Ti, Al e Fe.

As titanitas primárias dos granitos utilizados para comparação não apresentam substituições evidentes do Ti pelo Al e Fe e se aproximam das titanitas primárias dos granitos Serra da Queimada e Redenção, as quais mostram maior espalhamento indicando substituições mais intensas. As titanitas secundárias mostram maior variação em termos de Ti, Al e Fe, sugerindo substituições mais intensas entre esses elementos, e se superpõem às titanitas de alteração da clorita obtidas nas titanitas deste estudo.

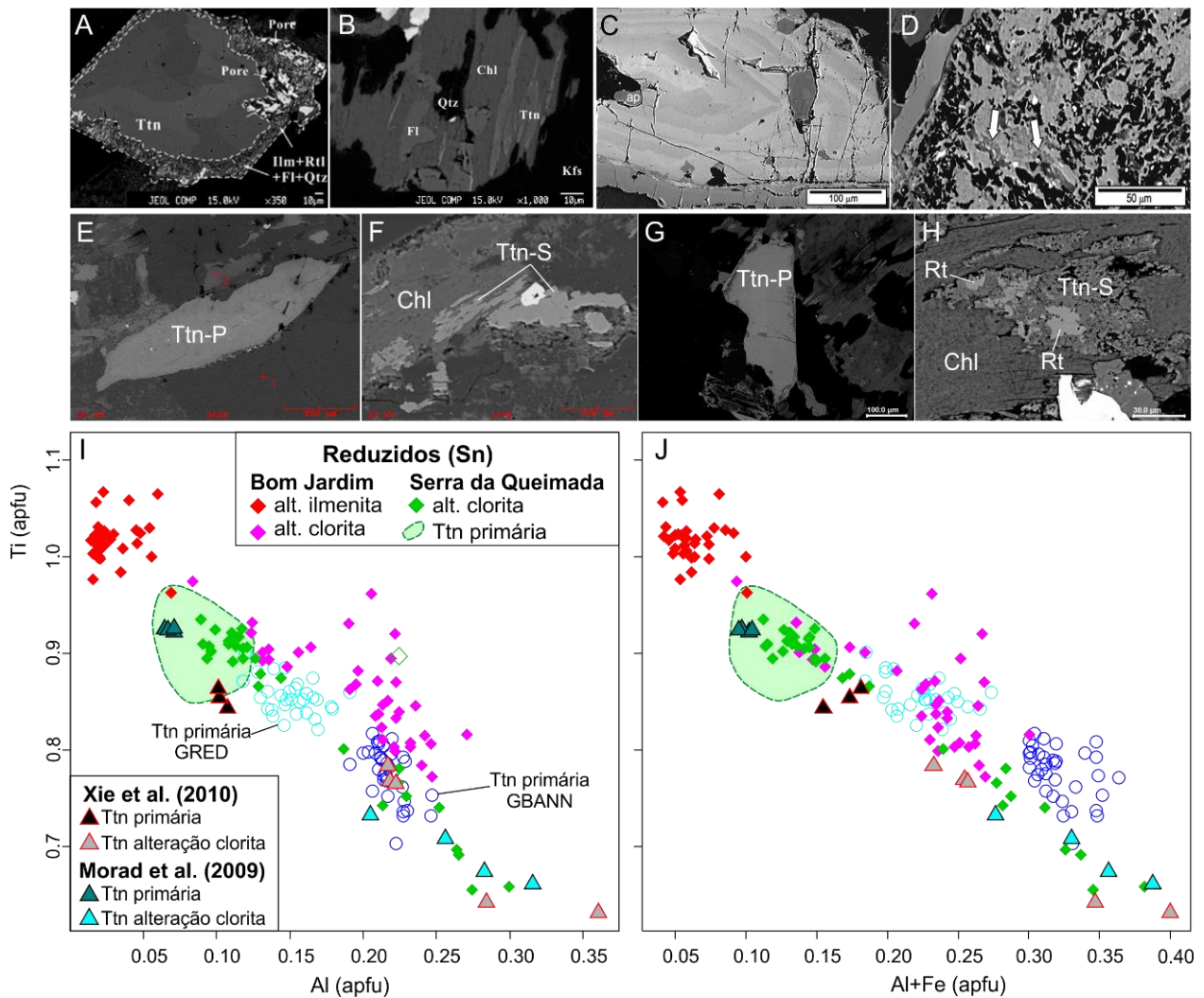


Figura 16- Imagens de ERE de titanitas primárias e secundárias. A e B: Granito estanífero Qitianling, sul da China (Xie *et al.* 2010); Ttn=titanita primária, Ilm=ilmenita; Rtl=rutilo; Chl=clorita. C e D: granitos Proterozoicos do SE da Suécia (Morad *et al.* 2009); setas brancas=titanitas secundárias. E e F: Titanita primária (Ttn-P) e secundária (Ttn-S), Granito reduzido Serra da Queimada. G: Titanita primária, Granito oxidado Redenção. H: Titanita secundária, Granito reduzido Bom jardim. I e J: Diagramas comparativos Ti versus Al (apfu) e Ti versus Al+Fe (apfu). Fonte: Autor.

Tabela 5- Análises comparativas de titanitas primárias e secundárias.

Referência	Tipo	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Total	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Mn	Ca	Na	K	F
Xie et al (2010)	Primárias	30,6	34,2	2,8	1,7	0,0	0,1	29,4	0,0	0,0	0,6	99,5	1,002	0,843	0,107	0,048	0,001	0,002	1,032	0,001	0,0	0,066
		30,2	33,9	2,6	2,6	0,1	0,1	27,6	0,0	0,0	0,5	97,5	1,011	0,853	0,102	0,071	0,003	0,003	0,990	0,001	0,0	0,051
		29,9	34,6	2,6	2,9	0,1	0,1	28,4	0,0	0,0	0,4	99,1	0,991	0,863	0,101	0,080	0,002	0,003	1,009	0,0	0,0	0,046
	Secundária III	31,6	26,2	9,6	1,5	0,3	0,0	26,4	0,1	0,0	2,1	97,7	1,010	0,631	0,361	0,039	0,012	0,001	0,905	0,004	0,001	0,217
		31,9	26,6	7,5	2,3	0,0	0,0	29,0	0,0	0,0	1,8	99,2	1,024	0,642	0,284	0,063	0,001	0,001	0,996	0,001	0,0	0,180
		31,0	32,1	5,7	0,6	0,1	0,0	27,2	0,0	0,0	1,2	97,8	1,008	0,783	0,217	0,015	0,003	0,0	0,946	0,0	0,0	0,125
		29,4	30,4	5,5	1,4	0,0	0,0	28,1	0,0	0,0	1,1	96,0	0,987	0,767	0,218	0,038	0,001	0,0	1,010	0,001	0,0	0,116
		29,5	30,3	5,5	1,3	0,0	0,0	28,0	0,0	0,0	1,0	95,6	0,992	0,766	0,219	0,037	0,001	0,001	1,008	0,0	0,0	0,105
		29,8	36,5	1,8	1,1	na	0,0	28,2	0,0	0,0	na	97,5	1,001	0,922	0,071	0,031	na	0,0	1,015	0,0	0,0	na
Morad et al (2009)	Primárias	29,9	36,9	1,7	1,1	na	0,1	28,7	0,0	0,0	na	98,4	0,996	0,925	0,067	0,031	na	0,0	1,025	0,0	0,0	na
		29,8	36,7	1,7	1,0	na	0,1	28,7	0,0	0,0	na	98,0	0,997	0,924	0,067	0,028	na	0,0	1,029	0,0	0,0	na
		29,6	36,7	1,8	1,2	na	0,0	28,7	0,0	0,0	na	98,1	0,991	0,924	0,071	0,034	na	0,0	1,029	0,0	0,0	na
		30,6	27,7	6,4	2,6	na	0,0	28,8	0,0	0,0	na	96,1	1,039	0,708	0,256	0,074	na	0,0	1,048	0,0	0,0	na
		31,7	28,5	5,1	2,5	na	0,0	26,9	0,2	0,0	na	95,0	1,082	0,732	0,205	0,071	na	0,0	0,984	0,015	0,0	na
	secundárias	31,1	25,6	7,8	2,5	na	0,0	26,6	0,0	0,7	na	94,4	1,068	0,661	0,316	0,072	na	0,0	0,979	0,0	0,03	na
		31,5	26,5	7,1	2,6	na	0,0	28,3	0,0	0,0	na	96,0	1,065	0,674	0,283	0,073	na	0,0	1,025	0,0	0,0	na
		26,1	30,8	5,3	3,7	0,3	0,1	27,4	0,0	0,0	0,8	94,6	0,889	0,789	0,213	0,104	0,014	0,004	1,000	0,0	0,0	0,086
		26,7	31,3	5,1	3,5	0,4	0,0	26,1	0,0	0,0	0,9	93,9	0,904	0,797	0,203	0,098	0,022	0,0	0,946	0,0	0,0	0,094
GBANN	Primárias	26,2	31,5	5,4	3,2	0,5	0,2	27,3	0,0	0,0	0,0	94,4	0,898	0,812	0,219	0,091	0,026	0,006	1,004	0,0	0,0	0,0
		25,1	31,6	5,2	3,3	0,4	0,2	27,9	0,0	0,0	1,1	94,9	0,853	0,808	0,210	0,093	0,022	0,006	1,018	0,0	0,0	0,121
		25,9	31,1	5,3	3,2	0,4	0,2	28,5	0,0	0,0	1,1	95,7	0,877	0,791	0,212	0,092	0,019	0,006	1,034	0,0	0,0	0,117
		26,4	32,7	4,2	2,7	0,3	0,2	28,6	0,0	0,0	0,9	96,0	0,893	0,832	0,167	0,077	0,016	0,005	1,037	0,0	0,0	0,092
		24,9	34,0	4,1	2,5	0,5	0,3	29,1	0,0	0,0	0,7	96,1	0,849	0,874	0,166	0,071	0,023	0,008	1,065	0,0	0,0	0,077
GRED	Primárias	25,7	33,7	3,8	2,5	0,3	0,3	28,8	0,0	0,0	0,6	95,7	0,876	0,863	0,154	0,071	0,016	0,008	1,052	0,0	0,0	0,065
		26,9	34,6	3,5	2,3	0,1	0,2	29,5	0,0	0,0	0,0	97,0	0,914	0,884	0,139	0,066	0,006	0,004	1,075	0,0	0,0	0,000
		26,6	33,7	3,7	2,7	0,1	0,2	29,4	0,0	0,0	0,4	96,7	0,902	0,861	0,150	0,076	0,005	0,005	1,070	0,0	0,0	0,040
		25,8	39,9	0,4	1,1	0,1	0,3	29,5	0,0	0,0	0,0	97,1	0,880	1,022	0,017	0,033	0,005	0,007	1,076	0,0	0,0	0,0
		26,0	38,9	0,5	1,5	0,1	0,1	29,5	0,0	0,0	0,0	96,7	0,886	1,000	0,020	0,044	0,003	0,004	1,080	0,0	0,0	0,0
GBJ-SAL 42	Secundárias Alteração Ilmenita	26,1	38,4	0,9	1,0	0,0	0,2	29,6	0,0	0,0	0,2	96,3	0,887	0,984	0,034	0,027	0,002	0,005	1,080	0,0	0,0	0,019
		25,3	38,7	0,5	1,9	0,1	0,1	30,1	0,0	0,0	0,0	96,7	0,869	0,997	0,021	0,054	0,004	0,003	1,106	0,0	0,0	0
		26,4	38,2	0,4	1,3	0,1	0,2	29,5	0,0	0,0	0,2	96,3	0,899	0,976	0,016	0,038	0,005	0,006	1,075	0,0	0,0	0,020
		23,5	39,7	1,3	0,8	0,4	0,2	30,0	0,0	0,0	0,0	95,9	0,812	1,030	0,054	0,024	0,020	0,006	1,107	0,0	0,0	0,0
		27,2	35,8	3,4	0,5	0,0	0,1	30,0	0,0	0,0	0,0	96,9	0,914	0,905	0,136	0,013	0,0	0,003	1,079	0,0	0,0	0,0
	Secundárias Alteração Clorita	26,8	34,8	5,0	0,4	0,6	0,1	29,0	0,0	0,0	0,0	96,6	0,900	0,881	0,196	0,011	0,028	0,004	1,045	0,0	0,0	0,0
		27,4	35,3	3,4	0,4	0,1	0,1	29,4	0,0	0,0	0,0	96,1	0,921	0,893	0,135	0,012	0,003	0,002	1,061	0,0	0,0	0,0
		26,9	35,5	3,3	0,2	0,1	0,1	29,7	0,0	0,0	0,0	95,8	0,908	0,900	0,131	0,007	0,003	0,003	1,074	0,0	0,0	0,0
		26,3	31,5	6,1	0,9	0,5	0,2	28,8	0,0	0,0	1,8	96,0	0,869	0,783	0,240	0,025	0,023	0,004	1,021	0,0	0,0	0,185
		26,1	34,5	5,6	1,7	0,3	0,2	27,7	0,0	0,0	0,5	96,5	0,875	0,870	0,222	0,046	0,014	0,005	0,995	0,0	0,0	0,049
GSQ - SAL 35	Secundárias Alteração Clorita	25,8	30,8	5,7	1,9	0,1	0,1	30,5	0,0	0,0	2,4	97,4	0,853	0,766	0,223	0,054	0,006	0,002	1,080	0,0	0,0	0,248
		27,5	27,0	7,8	3,0	0,9	0,2	28,0	0,0	0,0	3,1	97,6	0,890	0,658	0,299	0,082	0,043	0,006	0,974	0,0	0,0	0,320
		26,0	35,7	2,4	1,1	0,0	0,1	30,3	0,0	0,0	1,3	96,8	0,873	0,902	0,096	0,030	0,000	0,002	1,088	0,0	0,0	0,133
		26,0	36,1	2,8	1,2	0,0	0,1	30,4	0,0	0,0	0,7	97,4	0,877	0,914	0,111	0,034	0,000	0,003	1,098	0,0	0,0	0,075
		26,0	32,2	4,8	1,9	0,2	0,1	29,7	0,0	0,0	2,0	96,8	0,860	0,801	0,187	0,053	0,011	0,003	1,052	0,0	0,0	0,211
		26,8	36,1	2,7	0,9	0,0	0,2	30,2	0,0	0,0	0,7	97,6	0,896	0,909	0,108	0,024	0,0	0,005	1,084	0,0	0,0	0,069
		28,2	36,5	2,0	1,0	0,0	0,2	28,4	0,0	0,0	0,5	96,7	0,945	0,919	0,080	0,028	0,0	0,005	1,019	0,0	0,0	0,049
	Primárias	26,7	36,4	2,5	1,5	0,3	0,2	28,9	0,0	0,0	0,0	96,4	0,911	0,933	0,100	0,041	0,017	0,004	1,055	0,0	0,0	0,0
		28,4	35,6	2,5	1,9	0,1	0,3	27,8	0,0	0,0	0,0	96,5	0,959	0,905	0,098	0,054	0,006	0,008	1,005	0,0	0,0	0,0
		27,3	36,6	2,2	1,3	0,2	0,0	28,7	0,0	0,0	0,0	96,4	0,927	0,936	0,088	0,037	0,011	0,000	1,042	0,0	0,0	0,0
		28,5	36,1	1,8	1,3	0,1	0,2	28,4	0,0	0,0	0,0	96,3	0,963	0,917	0,072	0,036	0,007	0,006	1,027	0,0	0,0	0,0
		28,4	34,4	2,5	1,2	0,3	0,1	27,8	0,0	0,0	0,5	95,5	0,960	0,874	0,101	0,035	0,017	0,004	1,004	0,0	0,0	0,058

Fonte: Autor

## 11. CONCLUSÕES

Os dados obtidos neste trabalho permitiram as seguintes conclusões:

1. Os granitos anorogênicos Bom Jardim e Serra da Queimada são considerados reduzidos e mineralizados em Sn+W. Suas titanitas são anédricas e de origem secundária, formadas a partir da alteração de cristais de ilmenita e clorita, muito provavelmente em decorrência de processos hidrotermais que afetaram essas rochas;
2. Em termos composicionais, as titanitas secundárias dos granitos reduzidos mostram que Al e Fe substituem de forma acentuada o Ti, sendo esta substituição mais intensa nas titanitas provenientes da alteração da clorita e menos intensa nas titanitas formadas pela alteração da ilmenita; todas elas apresentam enriquecimento em Sn+W+Nb+Ta+Ce;
3. No Granito Serra da Queimada foram identificadas localmente titanitas euédricas a subédricas, bem desenvolvidas, morfológica e texturalmente similares às titanitas primárias dos corpos oxidados; entretanto, mostram comportamento geoquímico similar ao encontrado nas titanitas secundárias e se assemelham mais com as titanitas de alteração da ilmenita;
4. Os granitos anorogênicos Bannach e Redenção, de natureza oxidada, apresentam titanitas euédricas e bem desenvolvidas, comumente associadas às fases máficas, com evidências morfológicas e texturais características de origem magmática primária; são mais empobrecidas em Sn+W+Nb+Ta+Ce em comparação com as titanitas primárias do Granito Serra da Queimada, porém apresentam conteúdos mais elevados de Y;
5. A composição de titanitas primárias e secundárias de granitos reduzidos e mineralizados em Sn+W pode ser utilizada preliminarmente como bom indicador deste tipo de mineralização;
6. Embora os dados comparativos apresentados na Figura 16 tenham sido obtidos por metodologias diferentes (MEV-EDS e microsonda eletrônica), os resultados mostraram fortes similaridades em termos de conteúdos de Ti, Al e Fe. Estudos complementares em titanitas de outros corpos reduzidos e oxidados realizados por microsonda eletrônica são necessários para uma avaliação mais precisa dos resultados apresentados.

## 11. REFERÊNCIAS

- Abreu F.A.M. & Ramos C.R. 1974. Estanho do Sul do Pará. *SBG, Congr. Bras. Geol* **28**, 11–23.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews* **17**, 1–29. doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9
- 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* **36**, 282–295. doi.org/10.25249/0375-7536.2006362282295
- 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. doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.026
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., de Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A. 2011. Zircon geochronology, geochemistry 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. doi.org/10.1016/j.precamres.2011.03.004
- Althoff F., 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. doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00103-0
- Barbosa A.A., Lafon J.M. 1996. Geocronologia Pb-Pb e Rb-Sr de granitóides arqueanos da região de Redenção - sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências* **26**, 255–264. doi.org/10.25249/0375-7536.19964255264
- Broska I., Harlov D., Tropper P., Siman P. 2007. Formation of magmatic titanite and titanite-ilmenite phase relations during granite alteration in the Tribeč Mountains, Western Carpathians, Slovakia. *Lithos* **95**, 58–71. doi.org/10.1016/j.lithos.2006.07.012
- Carvalho T.A. 2017. Petrografia, Geoquímica e Suscetibilidade Magnética da Porção Leste do Granito Gradaús, Província Carajás, SE do Pará.
- Che X.D., Linnen R.L., Wang R.C., Groat L.A., Brand A. 2013. Distribution of trace and rare earth elements in titanite from tungsten and molybdenum deposits in Yukon and British Columbia, Canada. *Canadian Mineralogist*, **51**, 415–438. doi.org/10.3749/canmin.51.3.415.
- Cuney M., Marignac C., Weisbrod A. 1992. The Beauvoir topaz-lepidolite albite granite (Massif Central, France): the disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization. *Economic Geology* **87**, 1766–1794. doi.org/10.2113/gsecongeo.87.7.1766
- Cunha I.R.V., Dall’Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajas Province e Amazonian Craton: Implications for the evolution of ferroan Archean. *Journal of South American Earth Sciences* **67**, 100–121. doi.org/10.1016/j.jsames.2016.01.007

- Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Magalhães M.S. 1993. Diagnostic features of the tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **65**, 33–50.
- Dall'Agnol R., Lafon J.M., Macambira M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, amazonian araton: Geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology* **50**, 113–138. doi.org/10.1007/BF01160143
- Dall'Agnol R., Pichavant M., Champenois M. 1997a. Iron-titanium oxide minerals 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**, 325–348.
- Dall'Agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Barros C.E.M., Leite A.A.S., Jorge João X.S. 1997b. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. *CBPM, ISGAM* **2**, 135–142.
- Dall'Agnol R., Scaillet B., Pichavant M. 1999a. An Experimental Study of a Lower Proterozoic A-type Granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology* **40**, 1673–1698. doi.org/10.1093/petroj/40.11.1673
- Dall'Agnol R., Costi H.T., Da A.A. De Magalhães M.S. Teixeira N.P. 1999b. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research* **95**, 9–39. doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00125-9
- Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Rämö O.T., Moura C.A.V., Macambira M.J.B.B. Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos* **80**, 101–129. doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.058
- 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. *Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Abstracts Volume and Field Trips 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**, 215–233. doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.065
- Dall'Agnol R., de Oliveira D.C., Guimarães F.V.O., Eleilson O.G., Feio G.R.L. Lamarão C.N. Althoff F.J., Santos PA., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J.P., Silva C.R. P., Santos R.D. 2013. Geologia do subdomínio de transição do domínio carajás – implicações para a evolução arqueana da província carajás – Pará. *Anais do 13 Simpósio de Geologia da Amazônia*.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 2013. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 3rd ed. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London. doi.org/10.1180/DHZ
- Duarte K.D. 1992. Geologia e geoquímica do granito Mata Surrão (SW de Rio Maria–Pa): um exemplo de granito “stricto sensu” Arqueano. Federal University of Para.
- Eby G.N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology* **20**, 641–644.

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. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos* **151**, 57–73. doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.020

Feio G.R.L., Dall’Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., Soares J.E.B. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research* **227**, 157–185. doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.007

Fernandes C.M.D., Teixeira N.P., Borges R.M.K., Bettencourt J.S. 2006. Química Mineral Da Muscovita De Rochas Graníticas E Greisens Da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera Do Sul Do Pará. *Revista Brasileira de Geociências* **36**, 26–33. doi.org/10.25249/0375-7536.200636s12633

Frost B.R. Chamberlain K.R. Schumacher J.C. 2001. Sphene (titanite): Phase relations and role as a geochronometer. *Chemical Geology* **172**, 131–148. doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00240-0

Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2013. Petrologia magnética dos granodioritos Água Azul e Água Limpa, porção sul do Domínio Carajás - Pará. *Geologia USP. Série Científica* **13**, 89–110. doi.org/10.5327/Z1519-874X201300040005

Gastal M.C.P. 1988. Magmatismo ácido-intermediário do Proterozóico Médio na região de Rio Maria, SE do Pará: discussão quanto à tipologia. *CONG. BRAS. GEOL* **35**, 1132–1146.

Gastal M.C.P. 1987. Mapeamento e Petrologia do Maço Granítico Musa, Rio Maria, Sudeste do Pará. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Tese de Doutorado, 319 p.

Guimarães F.V., Dall’Agnol R., Oliveira D.C., Silva A.C., Teixeira M.F.T., Santos P.A. 2012. Geologia Preliminar da Porção Leste do Subdomínio de Transição da Província Carajás-Pa. *Congr. Bras. de Geol* **46**.

Hayden L.A., Watson E.B., Wark D.A. 2008. A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **155**, 529–540.

Huhn S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledsham E.J., Gouveia J.L., Martins L.B.P., Montalvão R.M.G., Costa V.G. 1988. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria-Sul do Pará, in: Congresso Brasileiro de Geologia. pp. 1438–1452.

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

Ismail R. Ciobanu C.L. Cook N.J. Teale G.S. Giles D. Mumm A.S. Wade B. 2014. Rare earths and other trace elements in minerals from skarn assemblages, Hillside iron oxide-copper-gold deposit, Yorke Peninsula, South Australia. *Lithos*, (**184–187**), 456–477. doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.023.

Juliani C. & Fernandes C.M.D. 2010. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**, 167–179. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.01.016

- King P.L., Sham T.-K., Gordon R.A., Dyar D. 2013. Microbeam X-ray analysis of Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> in Ti-rich minerals: a case study with titanite (sphene) with implications for multivalent trace element substitution in minerals. *Am. Mineral.* **89** (1), 110e119.
- 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. *Comptes rendus de l'Académie des.*
- 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 metalogenéticas. *Revista Brasileira de Geociências* **37**, 693–704. doi.org/10.25249/0375-7536.2007374693704
- Lamarão C.N., Pinho S.CC., Paiva Júnior A.L., Galarza M.A. 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 Sciences* **38**, 159–173. doi.org/10.1016/j.jsames.2012.05.004.
- Lehmann B., Ishihara S., Michel H., Miller J., Rapela C., Sanchez A., Tisl M., Winkelmann L. 1990. The bolivian tin province and regional tin distribution in the central Andes: A reassessment. *Economic Geology* **85**, 1044–1058. doi.org/10.2113/gsecongeo.85.5.1044.
- Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. Belém. *Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. 330p.(Tese de Doutorado).*
- 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.
- Liu Y.M. Xu J.F. Dai T.M. Li X.H. Deng X.G. Wang Q. 2002. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of the Qitianling granite and its geological significances. *Science in China (Ser. D)* **32**, 41–48.
- Macambira E.M.B. & Vale A.G. 1997. São Félix do Xingu: folha SB. 22-YB, Estado do Pará, escala 1: 250.000. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Brasília, CPRM 344.*
- 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.*
- Magalhães M.S., Dall'agnol R., Sauck W.A., Luiz J.G. 1994. Suscetibilidade Magnética: Um Indicador Da Evolução Petrológica De Granitóides Da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências* **24**, 139–149. doi.org/10.25249/0375-7536.1994139149.
- Magalhães M.S. & Dall'agnol R. 1992. Estudos De Minerais Opacos E Suscetibilidade Magnética Nos Granitos Musa E Jamon (Região De Rio Maria - Se Do Pará) E Suas Implicações Petrológicas. *Revista Brasileira de Geociências* **22**, 184–197. doi.org/10.25249/0375-7536.1992184197.
- Melo L.M.C. 2019. “Granito Serra da Queimada, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás: tipologia, aspectos petrológicos e afinidades metalogenéticas”. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências. Dissertação de Mestrado, 62p.

Mesquita C.J.S., Dall’Agnol R., Almeida J.A.C. 2018. Mineral chemistry and crystallization parameters of the A-type Paleoproterozoic Bannach Granite, Carajás Province, Pará, Brazil. *Brazilian Journal of Geology* **48**, 575–601. doi.org/10.1590/2317-4889201820170082.[

Montalvão R.M.G., Bezerra P.E.L., Prado P., Fernandes C.A.C., Silva G.H., Brim R.P. 1982. Características petrográficas e geoquímicas do Granito Redenção e suas possibilidades metalogenéticas. *SBG, Congr. Bras. Geol* **32**, 520–548.

Morad S., El-Ghali M.A.K., Caja M.A., Al-Ramadan K., Mansurbeg H. 2009. Hydrothermal alteration of magmatic titanite: Evidence from Proterozoic granitic rocks, Southeastern Sweden. *Canadian Mineralogist* **47**, 801–811. doi.org/10.3749/canmin.47.4.801

Nadoll P., Mauk J.L., Hayes T.S., Koenig A.E., Box S.E. 2012. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the mesoproterozoic Belt Supergroup, United States. *Economic Geology* **107**, 1275–1292. doi.org/10.2113/econgeo.107.6.1275

Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D., Walshe J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews* **61**, 1–32. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013

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* **2**, 155–172.

Oliveira D.C., Dall’Agnol R., Corrêa da Silva J.B., Almeida J.A.C. 2008. Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons, eastern Amazonian Craton, Brazil: Implications for architecture and zoning of A-type granites. *Journal of South American Earth Sciences* **25**, 100–115. doi.org/10.1016/j.jsames.2007.10.003

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 suite, eastern amazonian craton, Brazil. *Canadian Mineralogist* **47**, 1441–1468. doi.org/10.3749/canmin.47.6.1441

Oliveira D.C., Neves S.P., Trindade R.I.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. doi.org/10.1016/j.tecto.2010.07.018

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. doi.org/10.1093/petrology/egq051

Paiva Júnior 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**, 185–202. doi.org/10.25249/0375-7536.2011412185202

Pan L-C., Hu R-Z., Bi X-W., Li C., Wang X-S., Zhu J-J. 2018. Titanite major and trace element compositions as petrogenetic and metallogenic indicators of Mo ore deposits:

Examples from four granite plutons in the southern Yidun arc, SW China. *American Mineralogist*, 103, 1417–1434. doi.org/10.2138/am-2018-6224

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*. doi.org/10.1093/petrology/25.4.956

Piccoli P., Candela P., Rivers M. 2000. Interpreting magmatic processes from accessory phases: Titanite--a small recorder of large-scale processes. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* **91**, 257–267. doi.org/10.1017/s0263593300007422

Pidgeon R.T., Bosch D., Bruguier O. 1996. Inherited zircon and titanite O-Pb in Archean syenite from southwestern Australia: Implications for U-Pb stability of titanite. *Earth and Planetary Science Letters*, **141**, 187–198.

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

Pinho S.C.C. 2009. *Geologia, petrografia e geoquímica do Granito Bom Jardim, região de São Félix do Xingu, Província Mineral de Carajás*. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém. Dissertação de Mestrado, 121p.

Raimbault L. Cuney M. Azencott C. Duthou J.L. Joron J.L. 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central. *Economic Geology* **90**, 548–576. doi.org/10.2113/gsecongeo.90.3.548.

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. doi.org/10.1086/341761

Robinson D.M., Miller C.F. 1999. Record of magma chamber processes preserved in accessory mineral assemblages, Aztec Wash pluton, Nevada. *American Mineralogist* **84**, 1346–1353. doi.org/10.2138/am-1999-0911

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. (Ed.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Serviço Geológico do Brasil–CPRM/MME, Brasília, pp. 169–226.

Santos R.D., Galarza M.A., Oliveira D.C. 2012. Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium-Província Carajás. *XLVI Congresso Brasileiro de Geologia*.

Santos R.F.S., Oliveira D.C., Silva F.F. 2018. Geocronologia U-Pb, classificação e aspectos evolutivos do Granito Marajoara, Província Carajás. *Geologia USP. Série Científica* **18**, 89–124.

Scaillet B., Pichavant M., Roux J. 1995. Experimental crystallization of leucogranite magmas. *Journal of Petrology* **36**, 663–705. doi.org/10.1093/petrology/36.3.663

Smith M.P. Storey C.D. Jeffries T.E. Ryan C. 2009. In situ U-Pb and trace element analysis

of accessory minerals in the Kiruna District, Norrbotten, Sweden: New constraints on the timing and origin of mineralization. *Journal of Petrology* **50**, 2063–2094. doi.org/10.1093/petrology/egp069.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 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 de Almeida*. São Paulo, pp. 471–485.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes* **22**, 174–182. doi.org/10.1080/00206819709465329

Teixeira N.P. 1999. Contribuição ao estudo das rochas granitóides e mineralizações associadas da Suite Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará.

Teixeira N.P. & Bettencourt J.S. 2000. Velho Guilherme Intrusive Suite. Pará, Brazil: petrogenetic aspects and associated mineralization, in: Intern. Geol. Congr.

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. doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00125-0

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Dall’agnol R., Moura C.A.V., Fernandes C.M.D., Pinho S.C.C. 2005. Geoquímica Dos Granitos Paleoproterozóicos Da Suíte Granítica Velho Guilherme, Província Estanífera Do Sul Do Pará. *Revista Brasileira de Geociências* **35**, 217–226. doi.org/10.25249/0375-7536.2005352217226

Tulloch A.J. 1979. Secondary Ca–Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. *Contrib. Mineral. Petrol.* **69**, 105–117.

Vale A.G. Neves P.N. 1994. O Granito Redenção: Estado do Pará. *SBG, Congr. Bras. Geol* **38**, 149–150.

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.F., dos Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Unidades Litoestratigráficas, in: Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. (Eds.), *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*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Belém, pp. 113–214.

Wang R.C., Xie L., Chen J., Yu A., Wang L., Lu J., Zhu J. 2013. Tin-carrier minerals in metaluminous granites of the western Nanling Range (southern China): Constraints on processes of tin mineralization in oxidized granites. *Journal of Asian Earth Sciences* **74**, 361–372. doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.029

Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **95**, 407–419. doi.org/10.1007/BF00402202

Xie L., Wang R.C., Chen J., Zhu J.C. 2010. Mineralogical evidence for magmatic and hydrothermal processes in the Qitianling oxidized tin-bearing granite (Hunan, South China):

EMP and (MC)-LA-ICPMS investigations of three types of titanite. *Chemical Geology* **276**, 53–68. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.05.020

Xu L., Bi X., Hu R., Tang Y., Wang X., Xu Y. 2015. LA-ICP-MS mineral chemistry of titanite and the geological implications for exploration of porphyry Cu deposits in the Jinshajiang – Red River alkaline igneous belt, SW China. *Mineralogy and Petrology* **109**, 181–200. doi.org/10.1007/s00710-014-0359-x

Zhu J. Trefiak N. Woo T. Huang Y. 2008. An investigation of the adsorption of aromatic hydrocarbons in zeolite Na-Y by solid-state NMR spectroscopy. *Microporous and Mesoporous Materials* **114**, 474–484. doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.01.035.