

Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemiticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará

Geology, petrography and geochemistry of Archean Tonalitic and Trondhjemitic Associations from Vila Jussara, Carajás Province, Pará

Alice Cunha da Silva¹, Roberto Dall'Agnol¹, Fabriciana Vieira Guimarães¹, Davis Carvalho de Oliveira¹

¹Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil

Resumo: Entre os granitoides arqueanos que afloram no Subdomínio de Transição da Província Carajás, nas proximidades de Vila Jussara, destacam-se duas unidades, designadas de Tonalito São Carlos e Trondhjemito Colorado. Ambas são marcadas por intensa recristalização, principalmente dos cristais de quartzo e plagioclásio. O Tonalito São Carlos (~2,93 Ga) é formado principalmente por hornblenda-biotita-tonalitos, com padrão estrutural NE-SW a N-S. Diverge geoquimicamente do Trondhjemito Colorado por ser empobrecido em sílica e enriquecido nos óxidos constituintes dos minerais máficos. Possui baixo fracionamento de elementos terras raras (ETR) pesados e anomalias de Eu discretas a ausentes. Suas características não permitem associá-lo com as típicas suítes TTG arqueanas, tampouco à Suíte Sanukitoide Rio Maria. O Trondhjemito Colorado (2,87 Ga) é uma associação tonalítica-trondhjemitica-granodiorítica (TTG), com foliação E-W a NW-SE, localmente N-S, com mergulhos fortes. São rochas homogêneas petrograficamente, formadas por biotita-tonalitos/trondhjemitos, contendo também epidoto. Suas características geoquímicas são compatíveis com aquelas dos TTG arqueanos. Os ETR mostram acentuado fracionamento de ETR pesados, com dois tipos de padrões, um com anomalias de Eu negativas discretas ou até ausentes, e um segundo com anomalias de Eu positivas, acompanhadas por decréscimo em ETR leves.

Palavras-chave: Província Carajás. Subdomínio de Transição. Arqueano. TTG. Tonalito.

Abstract: The Archean granitoids exposed near Vila Jussara, in the Transition Subdomain of the Carajás Province are diversified and include the São Carlos Tonalite and Colorado Trondhjemite, named in this work. Both are marked by strong recrystallization, mainly of quartz and plagioclase. The São Carlos Tonalite (~2.93 Ga) is formed mainly by hornblende-biotite tonalite, with NE-SW to N-S-trending foliation. Compared to the Colorado Trondhjemite, it is depleted in silica and enriched in the oxides of the mafic minerals constituents, has low fractionation of heavy Rare Earth Elements (REE) and discrete to absent Eu anomalies. Its characteristics are distinct from those of typical Archean TTG suites and differ also of the Rio Maria Sanukitoid Suite. The Colorado Trondhjemite (2.87 Ga) is composed of epidote-bearing biotite trondhjemites with subordinate tonalites and rare granodiorites (TTG), with steeply-dipping foliation trending E-W to NW-SE, locally N-S. The Colorado trondhjemite geochemical characteristics are consistent with those of Archean TTG suites. It show pronounced HREE fractionation with high (La/Yb)_N and two types of REE patterns, one with discrete negative to nearly absent Eu anomalies, and a second one with strong positive Eu anomalies, in most cases, accompanied by a slight decrease in LREE.

Keywords: Carajás Province. Transition Subdomain. Archean. TTG. Tonalite.

SILVA, A. C., R. DALL'AGNOL, F. V. GUIMARÃES & D. C. OLIVEIRA, 2014. Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemiticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(1): 13-45. Autor para correspondência: Roberto Dall'Agnol. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. Av. Augusto Corrêa, 1. Belém, PA, Brasil. CEP 66075-100 (robdal@ufpa.br).

Recebido em 15/03/2013

Aprovado em 12/03/2014

Responsabilidade editorial: Fernando Jacques Althoff



INTRODUÇÃO

A Província Carajás é o principal segmento arqueano do Cráton Amazônico, sendo dividida nos domínios Rio Maria e Carajás (Figura 1). O Subdomínio de Transição, embora pertencente ao Domínio Carajás, foi interpretado inicialmente como sendo um terreno similar ao Domínio Rio Maria, porém afetado pelos eventos neoarqueanos atuantes exclusivamente no

Domínio Carajás (Dall'Agnol *et al.*, 2006). Entretanto, estudos desenvolvidos na região de Canaã dos Carajás, no extremo norte do Subdomínio de Transição, sugeriram uma evolução distinta daquela área em relação ao Domínio Rio Maria (Feio *et al.*, 2013). Portanto, esse subdomínio é uma região chave para o entendimento da compartimentação e da evolução tectônica da Província Carajás. Ele é formado por diversas

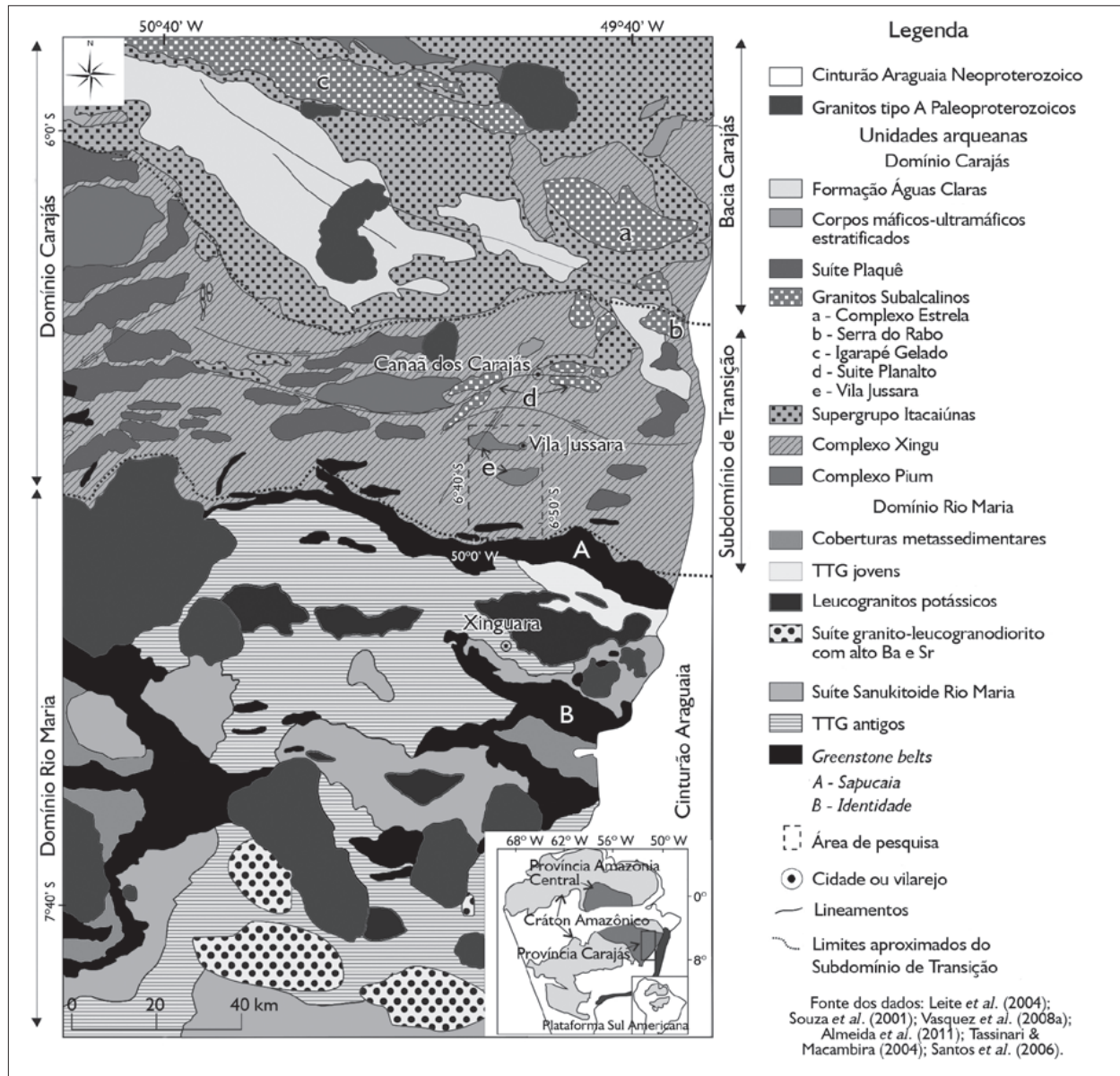


Figura 1. Mapa geológico da Província Carajás (modificado a partir de Feio *et al.*, 2013).

unidades arqueanas, com idades entre 3,0 a 2,72 Ga, com dominância de granitoides, que eram anteriormente em sua grande maioria incluídos no Complexo Xingu, mas que, com o avanço das pesquisas nesta região, vêm sendo caracterizados e individualizados (D. C. Oliveira *et al.*, 2010; A. C. Silva *et al.*, 2010; Feio *et al.*, 2013). Sabe-se hoje que esses granitoides são muito variados em composição e provavelmente também em idades, sugerindo evolução e origem distintas. Portanto, são essenciais avanços no conhecimento desses diferentes granitoides arqueanos para o entendimento do papel do Subdomínio de Transição da Província Carajás. Além disso, tem sido dada grande atenção na literatura internacional à diversidade de granitoides arqueanos (Sylvester, 1994; Martin, 1994; Champion & Sheraton, 1997; Smithies & Champion, 2000; Moyen *et al.*, 2003; Lobach-Zhuchenko *et al.*, 2005; Champion & Smithies, 2007; Oliveira *et al.*, 2009; Barros *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2011; Feio *et al.*, 2012, 2013; Feio & Dall'Agnol, 2012; Moyen & Martin, 2012) e, por consequência, têm sido feitos esforços para aprimorar sua caracterização e definição de processos de formação de seus magmas.

Este trabalho visa caracterizar a geologia, petrografia e geoquímica de duas associações granitoides arqueanas identificadas nas proximidades de Vila Jussara, no sudeste do Pará (Encarte da Figura 1). A primeira, aqui designada Tonalito São Carlos, é formada por anfibólio-biotita-tonalitos, e a outra, denominada Trondhjemito Colorado, compreende tonalito-trondhjemitos, com granodioritos subordinados. Visa-se com isso estabelecer comparações entre os granitoides arqueanos estudados e aqueles da Província Carajás, e avançar no entendimento da compartimentação e evolução tectônica do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás e das suas relações com o Domínio Rio Maria. Esta pesquisa deve permitir igualmente situar os granitoides estudados em relação às principais associações arqueanas.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás (Santos *et al.*, 2000), dividida entre os domínios Carajás e Rio Maria (Figura 1; Vasquez *et al.*, 2008a), situa-se na porção sudeste do Cráton Amazônico,

sendo considerada como o domínio oriental da Província Amazônia Central por Tassinari & Macambira (2004).

O Domínio Rio Maria é composto por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas, com idades que variam de 2,98 a 2,90 Ga (Macambira & Lancelot, 1992; Pimentel & Machado, 1994), e diversos grupos de granitoides arqueanos: granitoides da série tonalito-trondhjemito-granodiorito – TTG (Althoff *et al.*, 2000; Leite *et al.*, 2004; Dall'Agnol *et al.*, 2006; Guimarães *et al.*, 2010; Almeida *et al.*, 2011), com idades entre 2,98-2,86 Ga (Tabela 1); granitoides das séries sanukitoides de alto Mg da Suíte Rio Maria (Medeiros & Dall'Agnol, 1988; Souza & Dall'Agnol, 1996; Althoff *et al.*, 2000; Leite *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2006, 2009; M. A. Oliveira *et al.*, 2010), que possuem idades de ~2,87 Ga; leucogranodioritos e leucomonzogranitos da Suíte Guarantã, representados pelos plútons Guarantã, Azulona e Trairão (~2,87 Ga; Althoff *et al.*, 2000; Almeida *et al.*, 2010, 2013); e leucogranitos potássicos, representados pelos granitos Xinguará, Mata Surrão e similares (Leite & Dall'Agnol, 1997; Duarte *et al.*, 1991; Althoff *et al.*, 2000), que forneceram idades de 2,87 a 2,86 Ga (Leite *et al.*, 2004; Almeida *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.*, 1992; Lafon *et al.*, 1994; Althoff *et al.*, 1998). Foi individualizado, ainda, o Quartzo-diorito Parazônia (correspondente ao Tonalito Parazônia de Huhn *et al.*, 1988), que forneceu uma idade de 2.875 ± 2 Ma e foi incluído na Suíte Sanukitoide Rio Maria (Guimarães *et al.*, no prelo).

Sem considerar os estudos mais recentes, muitos deles ainda inéditos, as seguintes unidades haviam sido identificadas em mapeamentos regionais no Subdomínio de Transição (Figura 1; Araújo & Maia, 1991): Ortogranulito Chicrim-Cateté (Vasquez *et al.*, 2008a); Diopsídio-Norito Pium (Hirata *et al.*, 1982; Pidgeon *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2008) com idades de 3,0 e 2,85 Ga (Pidgeon *et al.*, 2000) e caráter granulítico ou magmático ainda gerando controvérsias (Vasquez *et al.*, 2008b; Feio *et al.*, 2012); Complexo Xingu (Silva *et al.*, 1974; Machado *et al.*, 1991), formado predominantemente por rochas granitoides cujas idades variam de 2,97 a 2,86 Ga (Tabela 1); Suíte Intrusiva Cateté (Macambira & Vale, 1997) de 2,76 Ga (Lafon *et al.*, 2000), Suíte Pedra Branca (Gomes & Dall'Agnol, 2007), com idade de ~2,75 Ga (Sardinha

et al., 2004; Feio *et al.*, 2013); e pelas Suítes Plaquê e Planalto, com idades entre 2,74 e 2,72 Ga (Avelar *et al.*, 1999; Huhn *et al.*, 1999; Sardinha *et al.*, 2004; Vasquez *et al.*, 2008a; D. C. Oliveira *et al.*, 2010; Feio *et al.*, 2012, 2013).

Mapeamentos geológicos mais detalhados e um número expressivo de datações geocronológicas adicionais levaram à identificação de novas unidades na região de Canaã dos Carajás, porção norte do Subdomínio de Transição (ver

Tabela 1. Síntese dos dados geocronológicos das associações tonalítico-trondhjêmíticas do Domínio Rio Maria e da região de Canaã dos Carajás do Subdomínio de Transição. Abreviaturas: L = LA-ICP-MS; T = ID-TIMS; Pb-Pb = Evaporação de Pb; zr = zircão; tit = titanita; * O Complexo Xingu foi incluído porque engloba um grande volume de rochas TTG. Fonte dos dados: 1) Leite *et al.* (2004); 2) Pimentel & Machado (1994); 3) Rolando & Macambira (2003); 4) Macambira *et al.* (2000); 5) Vasquez *et al.* (2008a); 6) Almeida *et al.* (2011); 7) Machado *et al.* (1991); 8) Avelar *et al.* (1999); 9) Feio *et al.* (2013); 10) Sardinha *et al.* (2004); 11) A. C. Silva *et al.* (2010).

	Unidade litoestratigráfica	Idade de formação (Ma)	Método
Domínio Rio Maria	Trondhjemitó Água Fria	2.864 ± 21^1	Pb-Pb zr
		2.843 ± 10^6	U-Pb zr
	Tonalito Mariazinha	2.912 ± 5^6	U-Pb zr
		$2.925 \pm 3^6, 2.917 \pm 5^6, 2.924 \pm 2^1$	Pb-Pb zr
	Complexo Tonalítico Caracol	$2.948 \pm 5, 2.936 \pm 3^1$	Pb-Pb zr
		$2.857 \pm 13, 2.900 \pm 21^4$	Pb-Pb zr
	Trondhjemitó Mogno	$2.871 \pm ?^2$	U-Pb tit
		2.961 ± 2^6	Pb-Pb zr
		2.961 ± 16^6	U-Pb zr
		2.968 ± 2^6	Pb-Pb zr
		2.972 ± 9^6	U-Pb zr
		$2.959 \pm 5, 2.959 \pm 2^6$	Pb-Pb zr
		2.964 ± 2^5	Pb-Pb zr
	Tonalito Arco Verde	2.948 ± 7^3	Pb-Pb zr
		$2.953 \pm 8, 2.926 \pm 2^6$	Pb-Pb zr
		$2.948 \pm 4, 2.941 \pm 5^6$	U-Pb zr
		2.937 ± 3^6	Pb-Pb zr
		2.973 ± 11^6	Pb-Pb zr
Subdomínio de Transição	Suíte Pedra Branca	2.749 ± 6^{10}	Pb-Pb zr
		2.765 ± 39^{10}	U-Pb T zr
		2.750 ± 5^9	U-Pb L zr
	Trondhjemitó Rio Verde	2.820 ± 22^9	U-Pb L zr
		2.869 ± 4^9	Pb-Pb zr
		2.929 ± 3^9	Pb-Pb zr
		2.923 ± 15^9	U-Pb L zr
		2.872 ± 16^8	Pb-Pb zr
	Complexo Xingu*	2.859 ± 2^7	U-Pb T zr
		2.872 ± 2^{11}	Pb-Pb zr
		2.974 ± 15^8	Pb-Pb zr



mapa geológico em Feio *et al.*, 2013; Figura 2): Tonalito Bacaba (Moreto *et al.*, 2011), com idade próxima de 3,0 Ga; Granito Canaã dos Carajás (2,96 Ga; Feio *et al.*, 2013); Trondhjemitó Rio Verde, formado há cerca de 2,87-2,85 Ga (Feio *et al.*, 2013); Complexo Tonalítico Campina Verde (2,87 a 2,85 Ga; Feio *et al.*, 2013); granitos Bom Jesus (3,0 a 2,83 Ga), Cruzadão (2,85 Ga) e Serra Dourada (2,83 Ga), todos estudados por Feio & Dall'Agnol, 2012 e Feio *et al.*, 2013). Além das unidades mencionadas, foram estudadas ainda na região as Suítes Pedra Branca e Planalto (Feio *et al.*, 2012, 2013).

Em torno de 1,88 Ga, toda a província foi palco de magmatismo granítico anorogênico, representado pelos corpos graníticos das Suítes Jamon e Serra dos Carajás e por diques félsicos a máficos contemporâneos (Barros *et al.*, 1995; Silva Jr. *et al.*, 1999; Dall'Agnol *et al.*, 2005; Almeida *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2009).

GEOCRONOLOGIA DOS GRANITOIDES ARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS

Não cabe aqui uma revisão detalhada dos dados geocronológicos disponíveis sobre todas as variedades de granitoides arqueanos já identificados na Província Carajás, mas é importante sumarizar as informações existentes sobre associações similares às selecionadas para estudo no presente trabalho, ou seja, o Tonalito São Carlos e o Trondhjemitó Colorado, que são apresentadas a seguir.

Granitoides TTG da Província Carajás

O magmatismo TTG é amplamente exposto na Província Carajás, sendo representado no Domínio Rio Maria por quatro suítes formadas durante o intervalo entre 2,98 e 2,92 Ga (Tabela 1): 1) Tonalito Arco Verde (2,98-2,93 Ga; Macambira & Lafon, 1995; Rolando & Macambira, 2003; Almeida *et al.*,

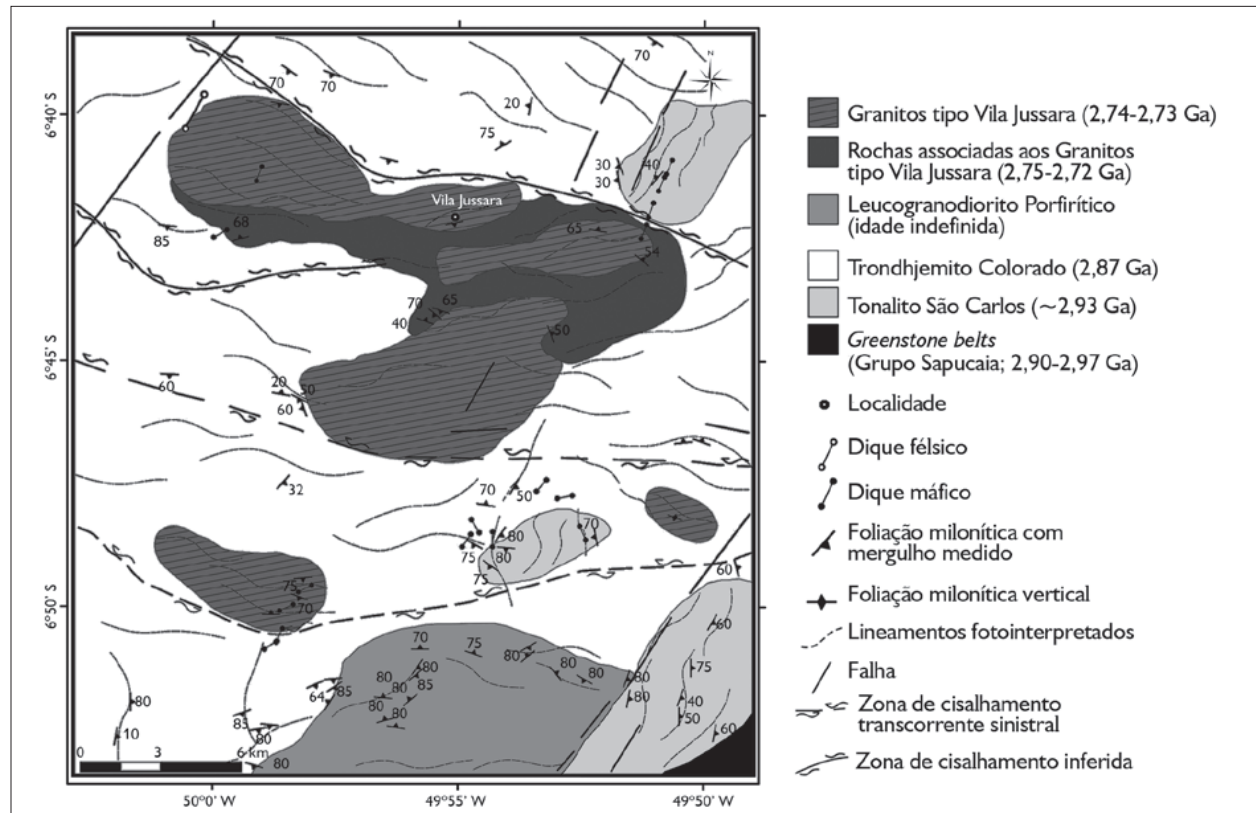


Figura 2. Mapa geológico da área situada nas cercanias de Vila Jussara, SE do Pará (modificado a partir de Araújo & Maia, 1991; A. C. Silva *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2010; M. L. T. Silva *et al.*, 2010).

2011); 2) Trondhjemito Mogno (~2,96 Ga; Almeida *et al.*, 2011); 3) Complexo Tonalítico Caracol (2,95-2,93 Ga; Leite *et al.*, 2004); 4) Tonalito Mariazinha (~2,92 Ga; Guimarães *et al.*, 2010; Almeida *et al.*, 2011). Além dessas suítes, foi identificada uma associação TTG mais jovem, denominada de Trondhjemito Água Fria (~2,86 Ga; Leite *et al.*, 2004). Segundo Almeida *et al.* (2011), geoquimicamente, podem ser distinguidos três grupos de granitoides TTG no domínio Rio Maria: 1) grupo com altas razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta, representado principalmente pelo Trondhjemito Mogno e Tonalito Mariazinha; 2) grupo com moderadas razões La/Yb, que engloba a maior parte das amostras do Tonalito Caracol e Trondhjemito Água Fria, mas também parte daquelas das demais unidades; 3) grupo com baixas razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta, onde dominam as rochas do Tonalito Arco Verde. Apesar das dominâncias mencionadas, todas as unidades apresentam variações composicionais, não podem ser enquadradas em um único grupo e, no caso dos Tonalitos Arco Verde e Caracol, suas amostras se distribuem pelos três grupos.

Na região de Canaã dos Carajás do Subdomínio de Transição, apenas o Trondhjemito Rio Verde, com idades de ~2,87 a 2,85 Ga, foi considerado similar às séries TTG (Feio *et al.*, 2013). Além desta unidade, foi individualizada uma segunda associação tonalítico-trondhjemitica, a Suíte

Pedra Branca, de idade neoarqueana e características geoquímicas inteiramente distintas dos típicos TTG arqueanos (Gomes & Dall'Agnol, 2007; Feio *et al.*, 2013).

Biotita-anfibólio-tonalitos/granodioritos da Província Carajás

As associações granitoides arqueanas do Domínio Rio Maria que mais se aproximam em termos mineralógicos dos anfibólio-tonalitos identificados na área estudada são as associações sanukitoides, formadas predominantemente por granodioritos, porém com variações para termos intermediários, quartzo-dioríticos a quartzo-monzodioríticos. Tais rochas costumam ter anfibólio como principal fase ferromagnésiana e são representadas pela Suíte Rio Maria (Oliveira *et al.*, 2009; M. A. Oliveira *et al.*, 2010) e pelo Quartzo-diorito Parazônia (Guimarães *et al.*, no prelo). Diversos tipos litológicos dessas unidades foram datados, e os resultados obtidos são muito similares e sempre próximos de 2,87 Ga (Tabela 2 e referências apresentadas na mesma). Em termos do que se conhece sobre o Domínio Carajás, as principais associações com as características mencionadas são o Tonalito Bacaba (Moreto *et al.*, 2011) e o Complexo Tonalítico Campina Verde (Feio *et al.*, 2013). Além disso, a oeste da área estudada, foram descritas associações de

Tabela 2. Síntese dos principais dados geocronológicos sobre as associações tonalítico-granodioríticas com anfibólio da Província Carajás. Abreviaturas: L = LA-ICP-MS; Pb-Pb = Evaporação de Pb; U-Pb = Urânio-Chumbo; zr = zircão; tit = titanita. Fonte dos dados: 1) Dall'Agnol *et al.* (1999); 2) Pimentel & Machado (1994); 3) Rolando & Macambira (2003); 4) Guimarães *et al.* (no prelo); 5) Feio *et al.* (2013); 6) Moreto *et al.* (2011); 7) Macambira & Lancelot (1996).

	Unidade litoestratigráfica	Idade de formação (Ma)	Método
Domínio Rio Maria – Suíte Rio Maria	Granodiorito Rio Maria	2.874 + 9/-10 ⁷	U-Pb zr
	Granodiorito Rio Maria	2.872 ± 5 ²	U-Pb zr, tit
	Granodiorito Rio Maria	2.877 ± 6 ³	Pb-Pb zr
	Granodiorito Rio Maria (Quartzo-diorito)	2.878 ± 4 ¹	Pb-Pb zr
	Quartzo-diorito Parazônia	2.876 ± 2 ⁴	Pb-Pb zr
Subdomínio de Transição	Complexo Tonalítico Campina Verde	2.872 ± 1 ⁵	Pb-Pb zr
		2.850 ± 7 ⁵	U-Pb L zr
	Tonalito Bacaba	2.997 ± 5 ⁶	U-Pb L zr
		2.993 ± 7 ⁶	U-Pb L zr
		3.005 ± 8 ⁶	U-Pb L zr



rochas afins nas proximidades de Água Azul do Norte (Gabriel *et al.*, 2010), que forneceram idade Pb-Pb em zircão de $2.884 \pm 1,7$ Ma (Sousa *et al.*, 2010).

GEOLOGIA DA ÁREA ESTUDADA

ASPECTOS GERAIS

A. C. Silva *et al.* (2010) e Santos *et al.* (2010) identificaram em mapeamentos geológicos em escala 1:50.000, efetuados nas proximidades de Vila Jussara, diversos granitoides arqueanos até então não individualizados e englobados indistintamente no Complexo Xingu. O mapeamento permitiu melhor visualização das feições estruturais, relações de campo e área de ocorrência dessas rochas (Figura 2). Entre os granitoides identificados, destacam-se anfibólio-biotita-tonalitos e biotita-tonalito/trondhjemitos com granodioritos subordinados (TTG), para os quais se estão propondo, neste trabalho, respectivamente, as designações de Tonalito São Carlos e Trondhjemito Colorado. As melhores exposições do Tonalito São Carlos se situam no extremo sudeste, e aquelas do Trondhjemito Colorado no extremo sudoeste e centro-oeste da área mapeada (Figura 2). Essas duas associações granitoides, foco central do presente trabalho, distinguem-se por suas idades, orientação estrutural e assinatura geoquímica, como será demonstrado adiante. Além dessas unidades, há na área estudada ocorrências expressivas de Granitoides Vila Jussara, anteriormente correlacionados aos granitos da Suíte Planalto (M. L. T. Silva *et al.*, 2010), leucogranodioritos porfíricos, similares ao Leucogranodiorito Pantanal (Teixeira *et al.*, 2013) e diques máficos e félsicos (Figura 2) que não serão discutidos em detalhe no presente trabalho. Zonas de cisalhamento orientadas em torno de E-W afetaram as unidades arqueanas e causaram a milonitização dos diferentes granitoides.

Greenstone belts (Grupo Sapucaia, Supergupo Andorinhas)

As ocorrências de *greenstone belts* na área de trabalho são bastante restritas e, excetuando-se as exposições

identificadas no extremo sudeste da mesma (Figura 2), não são representáveis na escala de mapeamento adotada neste trabalho. Xenólitos presentes nos diferentes granitoides arqueanos foram interpretados como sendo anfibolitos derivados dos *greenstone belts*.

Tonalito São Carlos

É composto por rochas de aspecto homogêneo, com bandamento composicional pouco evidente. A unidade é constituída por três *stocks* alongados segundo NE-SW que se distribuem na porção leste da área mapeada e fornecem baixos valores radiométricos nos mapas aeroradiométricos. Suas rochas exibem foliações dominantes nesse mesmo *trend*, com variações em torno de N-S ou que tendem a se amoldar aos limites dos corpos. Engloba enclaves máficos, e seus contatos com as demais unidades são marcados por lineamentos expressivos, interpretados como falhamentos, ou não se acham expostos no terreno. Dados geocronológicos preliminares (F. V. Guimarães, comunicação pessoal) forneceram idade de $2.934 \pm 8,6$ Ma (Pb-Pb em zircão por evaporação) para amostra representativa deste granitoide.

Trondhjemito Colorado

É a unidade com maior distribuição na área de pesquisa e se caracteriza por definir baixos valores radiométricos em levantamentos aeroradiométricos. Suas rochas são bandadas e, de modo localizado, intensamente dobradas. O bandamento define foliação geralmente orientada segundo o *trend* regional E-W ou, localmente, próximo de N-S, com mergulhos fortes. Bandas de cisalhamento modificam a trajetória da deformação. Enclaves máficos de composição anfibolítica e tonalítica/quartzo-diorítica alongados conforme a foliação da rocha são comuns. Veios e vênulas quartzo-feldspáticas concordantes e discordantes em relação à foliação intersectam as rochas desta unidade. Trabalhos anteriores (A. C. Silva *et al.*, 2010) revelaram idade de 2.872 ± 2 Ma (Pb-Pb em zircão) para essas rochas.

Leucogranodiorito Porfirítico

Ocorre como um *stock* na porção sul da área (Figura 2) e suas rochas apresentam foliação orientada predominantemente próximo de E-W ou, muito localmente, NE-SW. Fornece valores radiométricos ligeiramente superiores aos dos tonalitos São Carlos e Colorado. As relações de contato com as demais unidades não foram observadas, e o seu posicionamento estratigráfico acima do Trondhjemitico Colorado representa uma interpretação preliminar. Dados geocronológicos (F. V. Guimarães, comunicação pessoal) e estudos mais detalhados desse granitoide estão sendo efetuados em corpos expostos a leste da área mapeada (Teixeira *et al.*, 2013).

Granitoides Vila Jussara

Esses granitoides afloram em cinco corpos alinhados segundo E-W na porção centro-norte da área de pesquisa, os quais fornecem anomalias radiométricas positivas nos canais de Th, U e contagem total, e foram atribuídos anteriormente à Suíte Planalto (Silva, 2009; D. C. Oliveira *et al.*, 2010). As rochas dominantes são biotita-anfibólio-granitos que formam as porções centrais dos corpos maiores ou a totalidade dos corpos menores (Figura 2). Na porção central da área, os corpos são zonados e os granitos são envolvidos por granodioritos e, subordinadamente, tonalitos. As foliações presentes nessas últimas variedades se orientam geralmente segundo NW-SE a E-W e acompanham o padrão observado nos granitos. Estudos geocronológicos preliminares em biotita-anfibólio-granodioritos/tonalitos forneceram idades variáveis entre 2.720 Ma e 2.750 Ma (F. V. Guimarães, comunicação pessoal) e confirmam a contemporaneidade entre estas rochas e os granitos Vila Jussara, que possuem idades semelhantes (2.754 ± 2 Ma, M. L. T. Silva *et al.*, 2010; 2.734 ± 2 Ma, D. C. Oliveira *et al.*, 2010). O estudo dos granitos dominantes na associação não se enquadra entre os objetivos do presente trabalho, porém a caracterização dos granodioritos e tonalitos associados a eles se reveste de grande importância para permitir sua comparação com os demais granitoides tonalíticos estudados e justificar assim a sua eventual distinção.

PETROGRAFIA

COMPOSIÇÕES MODAIS E CLASSIFICAÇÃO

O estudo petrográfico revelou variações composicionais discretas tanto no Tonalito São Carlos quanto no Trondhjemitico Colorado (Tabelas 3 e 4, respectivamente). Foram realizadas seis análises modais em amostras do Tonalito São Carlos e quinze análises no Trondhjemitico Colorado, cujos resultados foram lançados nos diagramas Q-A-P (Streckeisen, 1976) e Q-(A+P)-M' (Figura 3).

Conforme Le Maitre (2002), o Tonalito São Carlos é constituído por anfibólio-biotita-tonalito, na quase totalidade das amostras, e biotita-anfibólio-tonalito (Tabela 3, Figura 3). Os minerais máficos variam entre 11,7 e 24,9% (média de 17,5 %), plagioclásio entre 54,3 e 66,6% (média de 59%), quartzo entre 32,4 e 45,6% (média de 40,6%) e feldspato alcalino, quando presente, de 0,8 a 0,9%. Opacos, allanita, titanita, zircão e apatita são as fases acessórias. A alteração secundária é no geral pouco expressiva, sendo marcada pela formação de epidoto, carbonato e clorita, mas se observa forte escapolitização em algumas amostras. Mostram comportamento similar ao da série cálcio-alcálica trondhjemitica de baixo potássio ou cálcio-alcálica tonalítica-trondhjemitica (Figura 3).

As rochas do Trondhjemitico Colorado variam de tonalitos a trondhjemitos, com granodioritos subordinados, mas ainda com composições próximas a trondhjemiticas, e portanto serão tratadas como tal (Figura 3). Os tonalitos possuem média dos máficos de 14,5%, enquanto os trondhjemitos ficam com média de 7,4% e os granodioritos de 4,2%. O plagioclásio nessa unidade varia de 41,4 a 60,1% (média de 53,3%), quartzo varia entre 20,5 e 38,2% (média de 32,5%), feldspato potássico entre 0 e 7,8% (média de 2,8%). A biotita e o epidoto são os principais minerais ferromagnesianos. O anfibólio ocorre apenas como fase acessória e em uma única amostra de granodiorito. A muscovita ocorre em algumas amostras, e o aumento em seu conteúdo modal parece estar diretamente relacionado ao aumento no conteúdo de

Tabela 3. Composições modais do Tonalito São Carlos. Legendas: * = amostra com análise química; (p) = mineral magmático; (s) = mineral secundário; - = mineral não observado na amostra; Tr = mineral presente na rocha, mas não registrado na contagem modal; ** = recalculado a 100%. Estimativa obtida através da contagem de aproximadamente 2.000 pontos por amostra.

Litologia	(Epidoto)-anfibólio-biotita-tonalito					
Amostra	AMP-92*	AMP-80A*	AFD-26/ CDGW-115*	AFD-13A*	AFD-30A*	ADE-15*
Mineral						
Plagioclásio	50	45,3	53,9	47,5	43,9	48,2
Quartzo	38	36,5	26,2	26,7	36,9	35,1
Feldspato potássico	-	-	0,8	0,6	-	-
Anfibólio	7	1,4	1,1	11,4	1,5	5,2
Biotita	4	14,3	16,2	12,8	11,5	9,5
Epidoto (p)	-	0,9	0,9	-	3,6	1,2
Allanita	-	-	-	-	0,4	-
Opacos	0,7	-	Tr	0,7	0,1	Tr
Titanita	-	Tr	-	Tr	0,2	0,1
Apatita	-	-	-	-	Tr	0,1
Zircão	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	-
Epidotos (s)	-	1,1	0,7	0,1	-	-
Clorita (s)	0,1	0,1	-	-	-	Tr
Carbonato (s)	-	1,1	-	Tr	-	-
Escapolita (s)	-	-	-	-	1,6	-
A+P	50	45,3	54,7	48,1	43,9	48,2
Máficos	11,8	16,7	18,2	24,9	17,3	16,1
Plagioclásio**	56,82	55,38	66,63	63,50	54,33	57,86
Quartzo**	43,18	44,62	32,39	35,70	45,67	42,14
Feldspato alcalino**	-	-	0,99	0,80	-	-

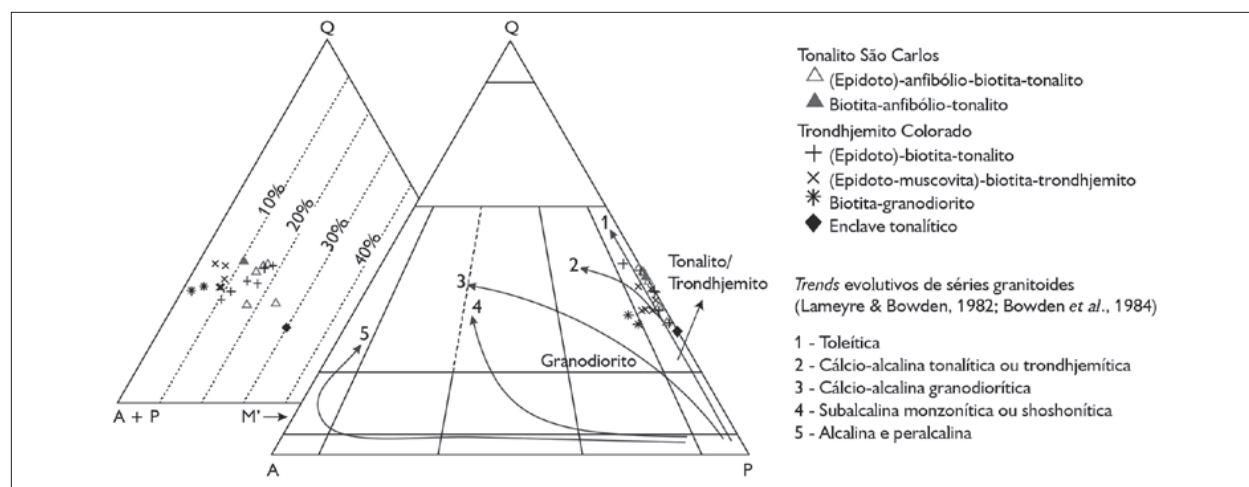


Figura 3. Diagramas modais Q-A-P e Q-(A+P)-M' (Streckeisen, 1976) para as rochas estudadas.

Tabela 4. Composições modais do Trondhjemitó Colorado. Legendas: * = amostra com análise química; (p) = mineral magmático; (s) = mineral secundário; - = mineral não observado na amostra; Tr = mineral presente na rocha, mas não registrado na contagem modal; ** = recalculado a 100%. Estimativa obtida através da contagem de aproximadamente 2.000 pontos por amostra.

Litologia	(Epidoto)-biotita-tonalito						Enclave (tonalito)	(Epidoto-muscovita)-biotita-trondhjemitó						Biotita- granodiorito	
Amostra	AFD-14*	AMP-34B*	AMP-79A	AMP-90B	AMP-99*	MAR-70A*	MAR-101A*	ADE-01A*	AFD-19*	AFD-20*	AMP-60*	MAR-85*	MAR-102*	AFD-17*	AMP-88B*
Mineral															
Plagioclásio	52,2	55,7	60,1	41,4	46,1	49,6	48,1	55,4	57	54,2	56,6	52,4	54,5	58,8	54,9
Quartzo	33,7	30,4	28,4	37,7	37,1	32,5	20,5	32,1	32	31,5	38,2	37,6	33	30,5	32
Feldspato potássico	-	1,2	0,6	2,6	0,2	-	-	3,7	2,5	4,3	0,4	2,5	0,8	7,1	7,8
Anfibólio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
Biotita	13,8	10,2	9,7	14,6	15,5	13,5	26,4	7,1	7,7	7,6	4	5	7,6	1,9	4,3
Muscovita (p)	-	0,9	-	Tr	-	0,9	2,1	-	-	0,9	0,5	0,5	2,4	0,8	-
Epidoto (p)	Tr	0,9	0,2	0,3	Tr	2,9	1,9	0,4	Tr	1	Tr	0,9	0,5	0,1	-
Allanita	-	-	-	0,1	-	-	Tr	0,1	0,2	Tr	-	0,4	0,1	Tr	-
Opacos	0,1	0,2	0,1	1,4	0,5	0,2	0,6	0,7	0,4	Tr	-	0,3	Tr	0,1	Tr
Titanita	-	0,2	Tr	1,5	0,3	Tr	-	0,2	-	-	-	Tr	-	-	0,1
Apatita	Tr	-	0,5	-	Tr	Tr	-	Tr	Tr	-	-	-	-	-	-
Zircão	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	-	-	Tr	Tr	Tr	-	Tr	-	-	Tr
Epidoto (s)	Tr	Tr	0,1	-	-	Tr	-	Tr	Tr	0,1	-	0,1	0,1	Tr	0,5
Muscovita (s)	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr	0,1	-	0,1	-	Tr	-
Clorita (s)	Tr	-	-	Tr	-	-	-	-	Tr	-	-	-	-	-	-
Carbonato (s)	Tr	-	-	-	-	-	Tr	-	Tr	-	-	-	0,2	-	-
Escapolita (s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr	0,4	-
A+P	52,2	56,9	60,7	44	46,3	49,6	48,1	59,1	59,5	58,5	57	54,9	55,3	65,9	62,7
Máficos	13,9	11,5	10,5	17,9	16,3	16,6	28,9	8,5	8,3	8,6	4	6,6	8,2	2,1	4,5
Plagioclásio**	60,77	63,8	67,45	50,67	55,28	60,41	70,12	60,75	62,3	60,22	59,45	56,65	61,72	61	57,97
Quartzo**	39,23	34,82	31,87	46,14	44,48	39,59	29,88	35,2	34,97	35	40,13	40,65	37,37	31,64	33,79
Feldspato alcalino**	-	1,37	0,67	3,18	0,24	-	-	4,06	2,73	4,78	0,42	2,70	0,91	7,37	8,24

epidoto magmático. Os minerais acessórios são allanita, opacos, titanita, apatita e zircão, e as fases secundárias são epidotos, muscovita, carbonato, clorita e escapolita. O Trondhjemitó Colorado exibe comportamento similar ao da série cálcio-alcalina trondhjêmítica de baixo potássio ou cálcio-alcalina tonalítica-trondhjêmítica (Figura 3).

ASPECTOS TEXTURAIS

Tonalito São Carlos

Macroscopicamente são rochas homogêneas, com foliação incipiente. Exibem textura granular a granoblástica, inequigranular, com fenocristais ou porfiroclastos de

granulação média de plagioclásio e anfibólio em matriz fina, fortemente recristalizada (Figura 4A), o que causa obliteração de suas características magmáticas primárias. Exibem, por vezes, microbandamento composicional, com alternância de bandas enriquecidas em minerais félsicos e outras em máficos.

O plagioclásio ocorre como cristais hipidiomórficos, inequigranulares, de granulação média, ou como porfiroclastos oclares de contornos irregulares envoltos por finos cristais de plagioclásio, quartzo, biotita e anfibólio provenientes de recristalização (Figura 4A). Os cristais finos de plagioclásio da matriz exibem, assim como o quartzo, texturas em mosaico. As maclas de deformação predominam sobre as maclas de crescimento e *kinks* são comuns. Em algumas amostras observa-se forte saussuritização.

O quartzo é sempre recristalizado, formando subgrãos e neogrãos, e definindo agregados de cristais finos intensamente estirados conforme a foliação da rocha, os quais contornam os fenocristais de plagioclásio e anfibólio.

O feldspato alcalino mostra disposição intersticial e constitui cristais xenomórficos, com granulação fina ou raramente média, dispersos na rocha ou presentes no interior do plagioclásio, possivelmente representando antipertitas.

Os cristais de anfibólio são hipidiomórficos, inequigranulares, de granulação média, localmente fina. Formam fenocristais com textura poiquilítica (Figura 4B), com inclusões de plagioclásio, biotita e opacos, e mostram substituição localizada para biotita.

A biotita forma cristais hipidiomórficos finos, associada aos agregados de anfibólio, titanita e opacos orientados conforme a foliação da rocha. Ocorre, ainda, inclusa em plagioclásio e anfibólio.

O epidoto forma cristais subautomórficos de granulação fina que geralmente se desenvolvem como coroas em torno de cristais subautomórficos de allanita.

A titanita ocorre como cristais hipidiomórficos a automórficos, de granulação fina, muitas vezes associados a opacos ou formando coroas que envolvem os cristais dos mesmos. Minerais opacos são hipidiomórficos finos

e estão associados a titanita e anfibólio. Apatita, zircão e monazita (?) aparecem como diminutos cristais inclusos em plagioclásio, anfibólio e biotita.

Epidoto, carbonato e escapolita são produtos da alteração do plagioclásio, e a clorita é originada a partir da biotita.

Trondhjemito Colorado

Macroscopicamente mostra bandamento composicional definido pela alternância de bandas de coloração cinza-escuro (tonalíticas) a cinza-claro (trondhjemíticas). Exibe textura granular a granoblástica poligonal média a fina, com fenocristais ou porfiroclastos de plagioclásio (Figura 4C). São marcantes a intensa deformação e recristalização a que foram submetidas tais rochas e que originaram texturas protomiloníticas a miloníticas. Elas afetam principalmente os cristais de plagioclásio e quartzo, os quais desenvolvem subgrãos e neogrãos, muitas vezes mascarando a textura original. Possuem microbandamento composicional definido pela alternância de bandas quartzo-feldspáticas com níveis relativamente enriquecidos em micas.

Os cristais de plagioclásio são inequigranulares e tiveram suas feições texturais ígneas obliteradas pela recristalização. Dois tipos de cristais são observados: porfiroclastos ovalados de granulação média e contornos irregulares, que constituem resquícios do plagioclásio original, e cristais finos, com textura em mosaico, que envolvem e tendem a contornar os cristais maiores. O zoneamento composicional é pouco evidente e as maclas podem ser de crescimento e também de deformação, predominando as primeiras. Nas porções mais deformadas são observadas microfraturas e *kinks*.

O quartzo é o mineral mais afetado pela recristalização. Forma principalmente agregados de cristais finos dispostos ao redor de porfiroclastos de plagioclásio, produto de cominuição. Persistem, no entanto, alguns cristais xenomórficos médios a finos, estirados e com forte extinção ondulante, os quais exibem subgrãos e neogrãos em suas bordas.

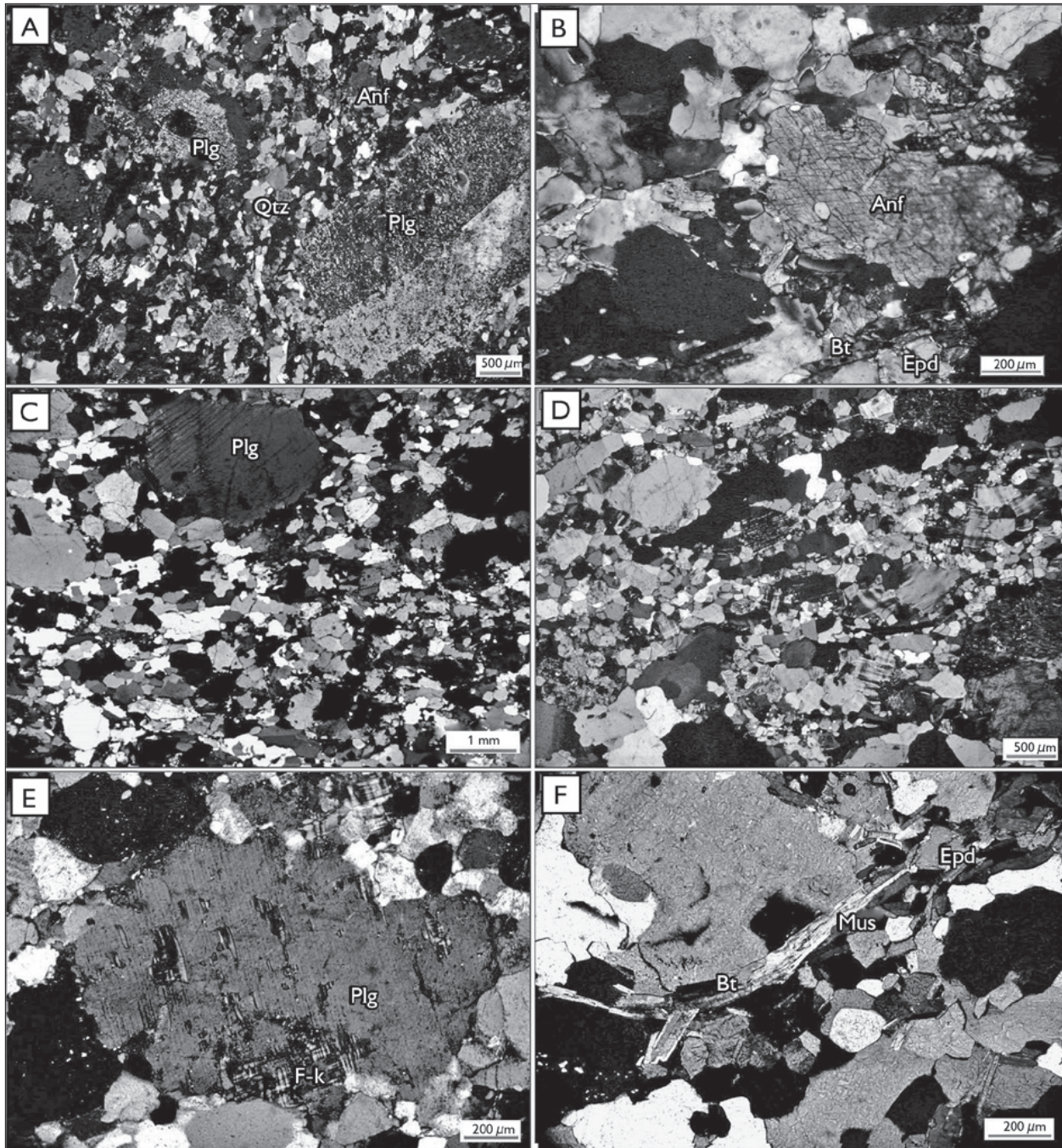


Figura 4. Aspectos texturais (fotomicrografias em nicóis cruzados) do Tonalito São Carlos (A e B) e do Trondhjemito Colorado (C a F). A) Aspecto geral do anfibólio-biotita-tonalito, mostrando porfiroclastos ovalados de plagioclásio fortemente alterados com recristalização ao longo de suas bordas (AMP-92); B) anfibólio associado a biotita e epidoto (AMP-80A); C) porfiroclastos ovalados de plagioclásio em matriz quartzo-feldspática fina, recristalizada (AMP-99); D) grãos xenomórficos finos de feldspato alcalino na matriz (AMP-74D); E) fenocristal de plagioclásio com manchas irregulares de feldspato potássico (MAR-58); F) muscovita e biotita orientadas que mostram contatos retos, contornam cristal de plagioclásio e possuem associado cristal idiomórfico de epidoto (MAR-101B). Legendas: Anf = anfibólio; Bt = biotita; Epd = epidoto; F-k = feldspato potássico; Mus = muscovita; Plg = plagioclásio; Qtz = quartzo.

Os cristais de feldspato alcalino são finos, intersticiais, xenomórficos e possuem contatos curvos (Figura 4D). São tardios na cristalização magmática e também foram afetados pela recristalização, formando cristais em mosaico. Apenas nas variedades granodioríticas constatou-se a presença escassa de lamelas sódicas (pertitas). São comuns manchas irregulares finas de feldspato alcalino em cristais de plagioclásio, que podem representar antipertitas ou substituição do plagioclásio pelo feldspato potássico (Figura 4E).

A biotita forma agregados de lamelas de granulação fina a média, orientadas conforme a foliação da rocha, associadas com muscovita e epidoto, com os quais possui contatos retos. As micas geralmente se amoldam aos cristais de plagioclásio e podem formar *microkinks* (Figura 4F). Particularmente, a biotita pode estar inclusa em fenocristais de plagioclásio. Os cristais de epidoto magmático são hipidiomórficos a idiomórficos e, por vezes, mostram zoneamento composicional ou formam coroas em torno de allanita.

Os minerais acessórios são: allanita em cristais hipidiomórficos a automórficos, finos, por vezes zonados; opacos em cristais finos hipidiomórficos a automórficos, os quais podem apresentar coroas de titanita e epidoto. A titanita ocorre, ainda, em cristais finos isolados; apatita e zircão formam diminutos cristais prismáticos hipidiomórficos a idiomórficos, inclusos em plagioclásio, biotita e quartzo.

Os produtos de alteração secundária são micas brancas, carbonato, epidoto e escapolita, formados a partir do plagioclásio, e clorita, produto de alteração da biotita.

Enclaves

Enclaves de composição anfibolítica e tonalítica são encontrados no interior das rochas do Trondhjemit Colorado. São fragmentos alongados, que possuem a mesma orientação da foliação da rocha.

Enclaves anfibolíticos

Esses enclaves mostram características petrográficas que permitem correlacioná-los aos *greenstone belts*. São rochas

bastante deformadas, com granulação fina a muito fina, com níveis ricos em anfibólio, biotita e opacos, intercalados a níveis predominantemente félsicos (quartzo-feldspáticos). Duas variedades de anfibolitos podem ser reconhecidas: uma com granulação fina, que possui anfibólio e biotita como minerais máficos dominantes, e outra com granulação muito fina, que possui somente anfibólio como mineral máfico e tem como característica principal a substituição do plagioclásio por epidoto e carbonato.

Enclaves tonalíticos

Tais enclaves possuem dimensões centimétricas, formas alongadas e apresentam contatos irregulares com a encaixante com evidências de reabsorção. São bastante deformados e possuem granulação fina a muito fina. Mostram associação mineralógica similar à das encaixantes, porém os enclaves diferem pelo maior conteúdo modal de minerais máficos, que atingem proporção em torno de 30%.

Microestruturas

As amostras do Tonalito São Carlos e do Trondhjemit Colorado se encontram recristalizadas, mas a recristalização é mais intensa no primeiro. As rochas de ambas as unidades exibem textura granular a granoblástica e mostram foliação penetrativa, caracterizada pela orientação preferencial dos minerais máficos e do quartzo, em geral contornando porfiroclastos ovalados de plagioclásio, que se encontram envolvidos por finos cristais resultantes de redução do tamanho de grão e recristalização.

Os aspectos texturais descritos acima indicam que as rochas estudadas passaram por dois estágios de deformação, num dos quais os efeitos dinâmicos causados por esforços orientados prevaleceram sobre os efeitos termais, enquanto um segundo estágio, dominado por efeitos térmicos, foi responsável pela recristalização dos minerais e desenvolvimento de texturas em mosaico (Passchier & Trouw, 1996; Vernon, 2004).

Os efeitos da recristalização dinâmica nas rochas são indicados pelo caráter bimodal de sua granulação,

pelo desenvolvimento de foliação e pela forma ocelar dos plagioclásios com feições de movimentação. As micas revelam os efeitos da deformação, sobretudo por meio da orientação e dobramento dos seus cristais. No plagioclásio, os aspectos mais marcantes são a granulação bimodal com porfiroclastos médios ovalados circundados em suas bordas por agregados de finos cristais provenientes de recristalização, a presença comum de maclas de deformação e, finalmente, a ausência de zoneamento composicional em seus cristais, que sugere ter sido sua composição homogeneizada. Os efeitos da deformação são, porém, ainda mais marcantes no quartzo, cujos cristais começam por mostrar extinção ondulante, sofrem microgranulação e desenvolvem subgrãos dispostos segundo fitas alongadas. A migração de limites de grãos é indicada pelos contatos serrilhados e irregulares dos cristais neoformados e pela geração de novos grãos de granulação semelhante.

O fato de a deformação ser claramente dúctil e de a recristalização ter afetado não só o quartzo, mas também o plagioclásio, revela que foram atingidas temperaturas elevadas, provavelmente situadas no intervalo entre 500 °C e 650 °C durante o processo (Passchier & Trouw, 1996; Vernon, 2004).

A recristalização estática atuou no sentido de estabilizar a energia do sistema após cessado o esforço. Sua atuação é revelada pela textura em mosaico, presente em grande parte das amostras estudadas e responsável pela textura granoblástica conferida a elas.

GEOQUÍMICA

Foram realizadas análises químicas de elementos maiores, menores e traço, incluindo terras raras, em seis amostras do Tonalito São Carlos (Tabela 5) e em 14 amostras representativas do Trondhjemitico Colorado (Tabela 6). As análises químicas foram realizadas no laboratório Acme Analytical Laboratories Ltd. Os elementos maiores e menores foram analisados por Inductively Coupled Plasma-Emission Spectrometry (ICP-ES) e os elementos-traço, incluindo os elementos terras raras,

foram analisados por Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS). Os pacotes analíticos utilizados foram 4A e 4B, sendo os métodos empregados e os limites de detecção informados em ACMELABS (s.d.).

ELEMENTOS MAIORES E MENORES

No Tonalito São Carlos, o conteúdo de sílica é moderado (62,5 a 67,8%) e o de alumina relativamente elevado (15,6 a 16,4%; Tabela 5). A média do somatório dos teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Mn} + \text{TiO}_2$ é alta (ca. 7%). O conteúdo médio de CaO é de 4,5%, tendo sido obtido o valor mínimo de 3,9% na única amostra da variedade biotita-anfibólio-tonalito analisada, a qual apresenta valor máximo de sílica (67,8%) e menor conteúdo modal de máficos (11,7%; Tabela 3). Os conteúdos de Na_2O oscilam em torno de 4,5% e os de K_2O são baixos ($\leq 1,52\%$), o que leva a uma razão $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ média de 0,31.

No Trondhjemitico Colorado, os conteúdos de sílica variam de 68,8% a 73,1%, não havendo diferenças muito marcantes nas variedades, embora seja clara a tendência ao crescimento dos tonalitos para os trondhjemitos, ainda que com superposição (Tabela 6; Figura 5). Os conteúdos de Al_2O_3 no Trondhjemitico Colorado variam de 14,9 a 16,2% e o valor médio é de 15,6% (Tabela 6), o que caracterizaria o conjunto como TTG de alta alumina, segundo Barker (1979). Os valores do somatório dos teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ são baixos (média de 3,3%). O conteúdo médio de CaO é de cerca de 3%. Os conteúdos de Na_2O (4,8 a 5,4%) são elevados para rochas graníticas, mas normais para granitoides sódicos de associação TTG (Moyen & Martin, 2012), e os de K_2O são muito baixos (0,93 a 1,39 % nos tonalitos e trondhjemitos), o que leva a razões $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ em geral inferiores a 0,30, com valor médio de 0,24 (Tabela 6).

Foi analisada uma amostra de cada variedade de enclave. O enclave anfibolítico possui composição básica com 51% de sílica e altos teores de MgO e CaO, ao passo que o enclave tonalítico apresenta conteúdos bem mais elevados de sílica e K_2O (Tabela 6).

Tabela 5. Composições químicas (% em peso) do Tonalito São Carlos. Legenda: $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{anomalia de európio calculada como: } [\text{Eu}/(\text{Eu}^*)] = [(\text{Eu}_N)/((\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)/2)]$.

(Continua)

Litologia	(Epidoto)-anfíbólio-biotita-tonalito					Biotita-anfíbólio-tonalito
Amostras Elementos	AFD-30A	AMP-80A	AFD-13A	AFD-26/ CDGW-115	ADE-15	AMP-92
SiO ₂	62,50	65,40	65,54	65,81	66,75	67,88
TiO ₂	0,52	0,48	0,53	0,44	0,42	0,47
Al ₂ O ₃	15,65	16,18	16,11	16,40	16,34	15,64
Fe ₂ O ₃	6,52	4,78	4,77	4,33	4,04	4,06
MnO	0,10	0,07	0,05	0,07	0,05	0,04
MgO	2,55	1,66	1,91	1,61	1,30	1,46
CaO	5,77	4,22	4,29	4,38	4,23	3,95
Na ₂ O	3,80	4,59	4,64	4,49	4,83	4,50
K ₂ O	1,47	1,52	1,29	1,52	1,16	1,19
P ₂ O ₅	0,16	0,12	0,15	0,15	0,11	0,14
PF	0,8	0,8	0,5	0,6	0,6	0,5
Total	99,84	99,82	99,78	99,8	99,83	99,83
Ba (ppm)	308	490	619	397	545	624
Sr	335,2	375,8	470,5	401,1	421,1	440,5
Rb	53,6	49,1	45,8	67,3	57,1	45,6
Zr	107,4	104,4	129,2	153,8	143,6	172,7
Y	18,1	11,6	12,5	19,3	8,3	3,8
Hf	2,9	3	3,1	4,6	3,4	4,7
Nb	6,9	3,8	5,1	6,6	3,7	3,2
Ta	0,6	0,5	0,5	0,8	0,6	0,4
V	96	62	69	64	57	63
U	0,3	0,2	0,1	1,3	0,6	0,2
Th	3	1,1	1	2	3,5	0,5
Pb	3,3	0,5	0,4	0,8	1,1	0,3
Ni	18,1	14,9	18,3	24,1	8,4	16,4
La	9,40	11,20	26,40	14,60	17	17,60
Ce	21,50	22,60	58,80	20,80	28,90	31,50
Pr	2,91	2,83	7,50	4,14	3,63	3,43
Nd	14,70	12,6	31,80	19,10	13,20	12
Sm	3,53	2,56	5,23	3,83	2,29	1,68
Eu	0,94	0,64	0,86	1,17	0,69	0,63
Gd	3,52	2,45	3,93	3,79	1,86	1,19
Tb	0,55	0,36	0,55	0,54	0,30	0,15



Tabela 5. (Conclusão)

Litologia	(Epidoto)-anfibólio-biotita-tonalito					Biotita-anfibólio-tonalito
Amostras	AFD-30A	AMP-80A	AFD-13A	AFD-26/ CDGW-115	ADE-15	AMP-92
Elementos						
Dy	3,08	1,94	2,77	3,14	1,54	0,72
Ho	0,59	0,38	0,46	0,53	0,30	0,11
Er	1,82	1,10	1,24	1,56	0,80	0,38
Tm	0,28	0,17	0,17	0,25	0,10	0,06
Yb	1,78	0,99	0,86	1,34	0,74	0,24
Lu	0,26	0,15	0,12	0,23	0,10	0,05
A/CNK	0,85	0,96	0,96	0,96	0,97	0,99
#Mg	0,44	0,41	0,44	0,42	0,39	0,42
Rb/Sr	0,16	0,13	0,10	0,17	0,14	0,10
Sr/Ba	1,09	0,77	0,76	1,01	0,77	0,71
Nb/Ta	11,50	7,60	10,20	8,25	6,17	8,00
K ₂ O/Na ₂ O	0,39	0,33	0,28	0,34	0,24	0,26
(La/Yb) _N	3,57	7,64	20,74	7,36	15,52	49,54
Eu/Eu*	0,81	0,77	0,56	0,93	0,99	1,30

Tabela 6. Composição química (% em peso) do Trondhjemitico Colorado. Legendas: Eu/Eu* = anomalia de európio calculada como: [Eu/(Eu*)] = [(Eu_N)/((Sm_N + Gd_N)/2)]; Anf = anfibólio; Ton = tonalito.

(Continua)

Litologia	Enclaves		(Epidoto)-biotita-tonalito				(Epidoto-muscovita)-biotita-trondhjemitico							
Amostras	MAR-71 (Anf)	MAR-101A (Ton)	MAR-70A	AMP-34B	AFD-14	AFD-12/ AMP-99	MAR-102	AMP-88B	AFD-20	AFD-19	ADE-01A	MAR-85	AMP-60	AFD-17
Elementos														
SiO ₂	51,47	63,14	68,81	68,94	70,66	71,71	69,66	69,84	70,20	71,31	71,64	72,85	73,08	73,11
TiO ₂	0,77	0,65	0,38	0,37	0,24	0,30	0,26	0,27	0,25	0,20	0,27	0,22	0,15	0,12
Al ₂ O ₃	14,69	16,31	16,16	15,81	15,78	15,18	16,18	16,08	16,26	15,47	15,18	14,94	15,16	15,05
Fe ₂ O ₃	12,13	6,23	3,25	3,43	2,32	1,89	2,47	2,52	2,20	2,23	2,43	1,82	1,48	1,93
MnO	0,20	0,11	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
MgO	6,80	1,84	1,08	1,01	0,86	0,80	0,68	0,76	0,72	0,61	0,63	0,58	0,41	0,25
CaO	9,03	4,29	3,60	3,06	3,46	3,14	3,03	3,42	2,94	3,12	3,08	2,96	2,73	2,55
Na ₂ O	3,01	4,17	4,70	5,05	4,83	4,82	5,44	5,00	5,48	4,97	5,06	4,98	5,30	5,45
K ₂ O	0,98	2,20	1,24	1,39	1,24	1,35	1,22	1,29	1,33	1,17	1,09	0,93	0,93	0,89
P ₂ O ₅	0,04	0,17	0,08	0,11	0,09	0,11	0,08	0,08	0,06	0,08	0,06	0,03	0,02	0,02
PF	0,60	0,70	0,50	0,60	0,30	0,50	0,80	0,50	0,40	0,70	0,40	0,50	0,60	0,50
Total	99,78	99,77	99,84	99,80	99,82	99,83	99,83	99,80	99,86	99,86	99,83	99,83	99,88	99,90
Ba (ppm)	96,0	723	459	714	518	538,0	609	558	385	329	525	405	260	209



Tabela 6.

(Conclusão)

Litologia	Enclaves		(Epidoto)-biotita-tonalito				(Epidoto-muscovita)-biotita-trondhjemito							
Amostras	MAR-71 (Anf)	MAR-101A (Ton)	MAR-70A	AMP-34B	AFD-14	AFD-12/ AMP-99	MAR-102	AMP-88B	AFD-20	AFD-19	ADE-01A	MAR-85	AMP-60	AFD-17
Elementos														
Sr	179,5	450,8	436,6	617,9	582,4	582,9	530,1	830,2	421,1	489	532,1	554,8	606,2	456,6
Rb	13,3	62,6	56,6	72,8	40,7	47,9	28,9	36,3	49,3	37,4	41,9	43,8	27,0	32,2
Zr	49,7	137,6	99,5	132,6	140,5	152,8	110,9	111,2	116,6	114	130,1	201,4	79,0	73,3
Y	17,3	17,2	2,0	5,2	2,0	3,8	3,9	1,9	3,4	1,3	2,2	1,9	0,7	2,8
Hf	1,9	3,8	3,0	3,5	3,6	3,9	3,0	2,9	3,0	3,2	3,5	5,4	2,3	3,0
Nb	3,1	4,1	3,3	5,1	2,2	2,3	2,1	1,4	5,2	2,2	1,9	2,2	1,9	3,4
Ta	0,3	0,7	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	0,5
V	242	76,0	38,0	41,0	23,0	21,0	20,0	30,0	32,0	41,0	28,0	16,0	12,0	33,0
U	0,4	0,8	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,4	0,1	0,6	0,4	0,2	0,9
Th	1,4	3,3	10,2	5,0	15,6	3,0	3,0	1,8	4,7	1,0	3,4	20,3	0,2	7,3
Pb	0,6	1,4	3,5	1,8	3,7	1,3	1,4	2,0	1,3	0,8	2,1	4,9	0,3	4,0
La	8,40	22,00	38,00	19,50	58,80	22,00	23,00	16,60	24,60	13,50	22,30	49,90	3,50	2,90
Ce	20,40	42,80	59,30	35,50	100,1	36,40	27,70	28,60	43,50	21,00	39,10	90,30	5,70	4,60
Pr	2,62	5,16	6,30	4,18	9,20	3,39	4,17	2,89	4,90	2,04	3,86	8,49	0,54	0,55
Nd	9,90	20,90	21,90	15,00	25,80	10,80	16,50	10,30	15,60	6,60	13,50	28,10	1,80	2,00
Sm	2,48	4,17	2,30	2,27	2,32	0,96	2,16	1,13	2,37	0,77	1,43	2,85	0,29	0,39
Eu	0,88	1,09	0,53	0,59	0,66	0,55	0,60	0,46	0,60	0,59	0,61	0,60	0,37	0,54
Gd	3,02	3,70	1,19	1,56	1,10	0,59	1,46	0,59	1,15	0,41	0,75	1,23	0,26	0,38
Tb	0,53	0,60	0,11	0,22	0,10	0,07	0,16	0,08	0,15	0,05	0,09	0,11	0,04	0,07
Dy	3,09	3,20	0,41	0,96	0,44	0,31	0,73	0,40	0,68	0,24	0,38	0,42	0,14	0,35
Ho	0,67	0,64	0,06	0,22	0,05	0,08	0,10	0,04	0,11	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05
Er	1,97	1,91	0,14	0,43	0,17	0,23	0,38	0,10	0,28	0,14	0,18	0,15	0,09	0,19
Tm	0,31	0,28	0,02	0,08	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04	< 0,01	0,03	0,03	< 0,01	0,03
Yb	2,05	1,84	0,07	0,30	0,14	0,16	0,18	0,14	0,10	< 0,05	0,20	0,17	< 0,05	0,15
Lu	0,28	0,25	0,04	0,07	0,02	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,06
A/CNK	0,65	0,96	1,03	1,03	1,01	1,01	1,03	1,02	1,03	1,02	1,01	1,02	1,03	1,03
#Mg	0,53	0,37	0,40	0,37	0,42	0,46	0,35	0,37	0,39	0,35	0,34	0,39	0,35	0,20
Rb/Sr	0,07	0,14	0,13	0,12	0,07	0,08	0,05	0,04	0,12	0,08	0,08	0,08	0,04	0,07
Sr/Ba	1,87	0,62	0,95	0,87	1,12	1,08	0,87	1,49	1,09	1,49	1,01	1,37	2,33	2,18
Nb/Ta	10,33	5,86	11,00	12,75	4,40	4,60	7,00	3,50	10,40	3,14	4,75	3,67	6,33	6,80
K ₂ O/Na ₂ O	0,33	0,53	0,26	0,28	0,26	0,28	0,22	0,26	0,24	0,24	0,22	0,19	0,18	0,16
(La/Yb) _N	2,77	8,08	367,17	43,91	283,6	92,94	86,32	80,06	166,3	> 270	75,39	198,5	> 70	13,06
Eu/Eu*	0,98	0,83	0,88	0,91	1,11	2,08	0,98	1,55	0,98	2,9	1,62	0,84	4,04	4,24



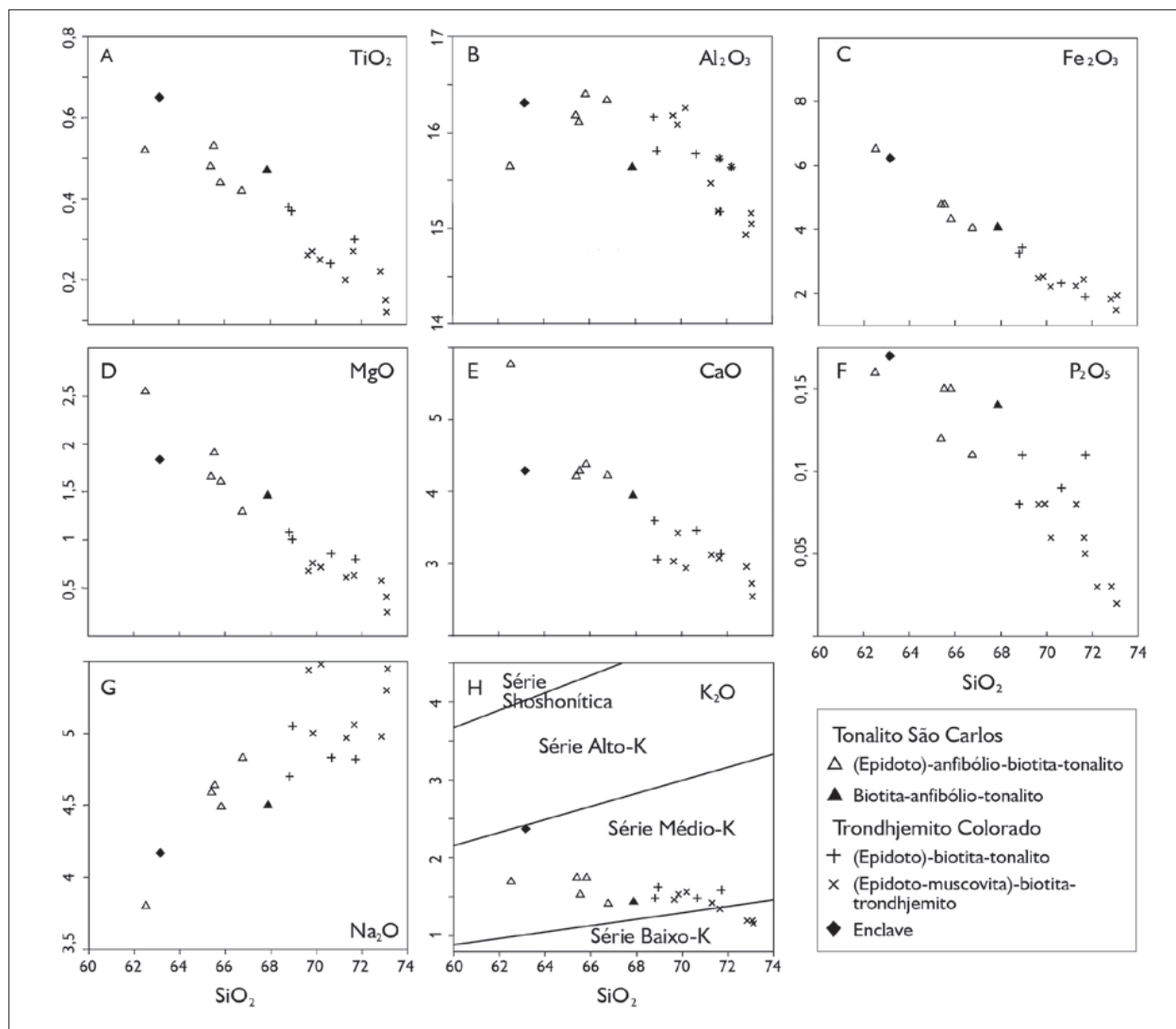


Figura 5. Diagramas de Harker para os óxidos (% em peso) de elementos maiores de amostras representativas do Tonalito São Carlos e Trondhjemitico Colorado. Campos no diagrama SiO_2 - K_2O conforme Peccerillo & Taylor (1976).

Diagramas de Harker (Figura 5) revelam que os óxidos TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , P_2O_5 e K_2O (Figuras 5A, 5C-5F, 5H) mostram em ambas as unidades de correlação negativa com sílica, Al_2O_3 mostra correlação positiva com SiO_2 no caso do Tonalito São Carlos (Figura 5B) e Na_2O para ambos os granitoides. Apesar da coincidência em termos de correlação com a sílica para os dois granitoides, constata-se *trends* com inclinações distintas no caso de TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O e K_2O (Figuras 5A, 5F-5H).

ELEMENTOS-TRAÇO

O comportamento dos elementos-traço em diagramas de Harker (Figura 6) no Tonalito São Carlos e no Trondhjemitico Colorado mostra-se bastante diversificado.

De modo geral, no Tonalito São Carlos, Ba, Sr e Zr mostram correlação positiva com sílica (Figuras 6A-6B, 6D) e, portanto, comportamento compatível, enquanto Rb, Y e Yb (Figuras 6C, 6E-6F) exibem correlação negativa e comportamento incompatível. Já no Trondhjemitico

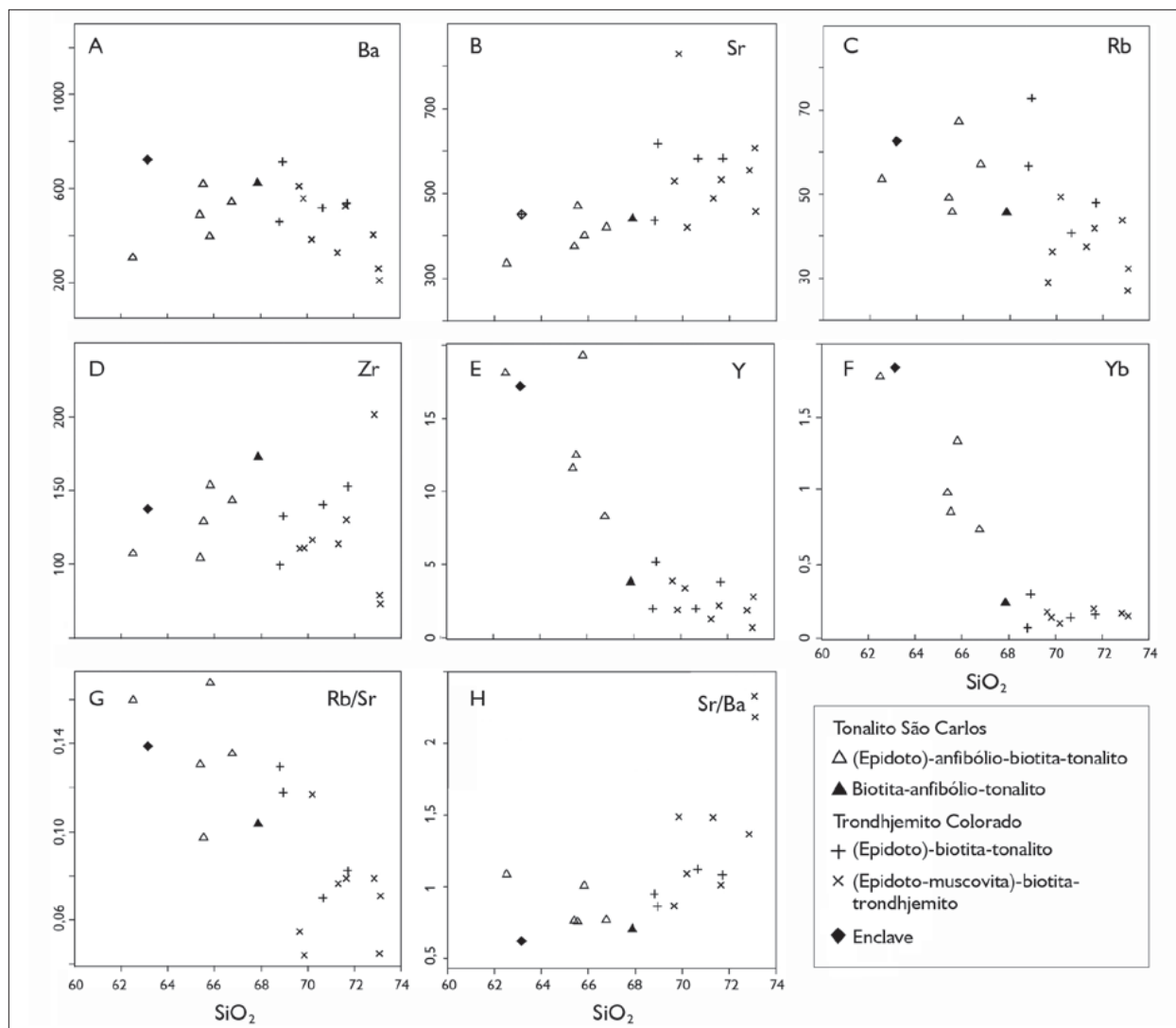


Figura 6. Diagramas de Harker para os elementos-traço de amostras representativas do Tonalito São Carlos e Trondhjemito Colorado. SiO₂ em % em peso e elementos-traço em ppm.

Colorado, Ba, Rb, Zr e Y mostram correlação negativa com sílica (Figuras 6A, 6C-6E), ao passo que o Sr revela correlação positiva (Figura 6B), comportando-se como elemento incompatível, e o Yb não mostra variação significativa (Figura 6F).

A razão Rb/Sr (Figura 6G) é mais baixa e mostra correlação positiva com a sílica no Trondhjemito Colorado, enquanto no Tonalito São Carlos tem correlação negativa. O comportamento da razão Sr/Ba é semelhante, porém

com valores mais elevados no Tonalito São Carlos (Figura 6H) do que no Trondhjemito Colorado e muito baixos nas duas amostras de granodiorito (Tabela 6, Figura 6H).

Elementos terras raras

Os resultados das análises de elementos terras raras (ETR) revelam que o Tonalito São Carlos, em comparação com o Trondhjemito Colorado, apresenta menores valores do somatório de ETR, o que reflete

seus teores mais baixos de ETR leves, ao passo que os seus conteúdos de ETR pesados são mais elevados (Tabelas 5 e 6). Os padrões de ETR, com valores normalizados pelos dos condritos (Evensen *et al.*, 1978), revelam que o (epidoto)-anfíbólio-biotita-tonalito, variedade amplamente dominante no Tonalito São Carlos, tem fracionamento baixo a moderado de ETR pesados em relação aos leves [$3,57 \leq (La/Yb)_N \leq 20,74$; Tabela 5, Figura 7A] e anomalias negativas de Eu discretas, ou mesmo positivas ($0,56 \leq Eu/Eu^* \leq 1,3$).

As amostras analisadas do Trondhjemitico Colorado mostram $(La/Yb)_N$ com variação entre 75,39 e > 367 (valor mínimo da amostra AFD-19), exceto nas amostras AFD-17 (13,06) e AMP-34B (43,91) (Tabela 6), e dois padrões de ETR distintos. O primeiro padrão (Figura 7B) mostra comportamento típico de TTG (Martin, 1987; Condie, 2005; Moyen & Martin, 2012), com acentuado fracionamento de ETR pesados em relação aos leves, e anomalias negativas de Eu pouco marcadas ($0,84 \leq Eu/Eu^* \leq 0,98$). O segundo padrão (Figura 7C) é encontrado em amostras com anomalias positivas de Eu ($1,11 \leq Eu/Eu^* \leq 4,24$) e teores mais reduzidos de ETR leves (Tabela 6), o que implica tendência a apresentarem menor razão $(La/Yb)_N$ e, aparentemente, menor fracionamento de ETR pesados em relação aos leves. As anomalias positivas de Eu ocorrem tanto na variedade tonalítica quanto na trondhjemitica, mas são raras nos tonalitos (Tabela 6). Ambos os padrões exibem concavidade no segmento dos ETR pesados (Figuras 7B-7C), indicando que anfíbólio foi fase importante durante o fracionamento. As amostras de enclaves anfibolíticos e tonalíticos possuem baixas razões $(La/Yb)_N$ e contrastam nesse aspecto com os trondhjemitos e tonalitos.

CARACTERIZAÇÃO DA SÉRIE MAGMÁTICA

As rochas do Tonalito São Carlos são metaluminosas e as do Trondhjemitico Colorado são fracamente peraluminosas (Tabelas 5 e 6; Figura 8A, diagrama baseado no índice de Shand proposto por Maniar & Piccoli, 1989). No diagrama

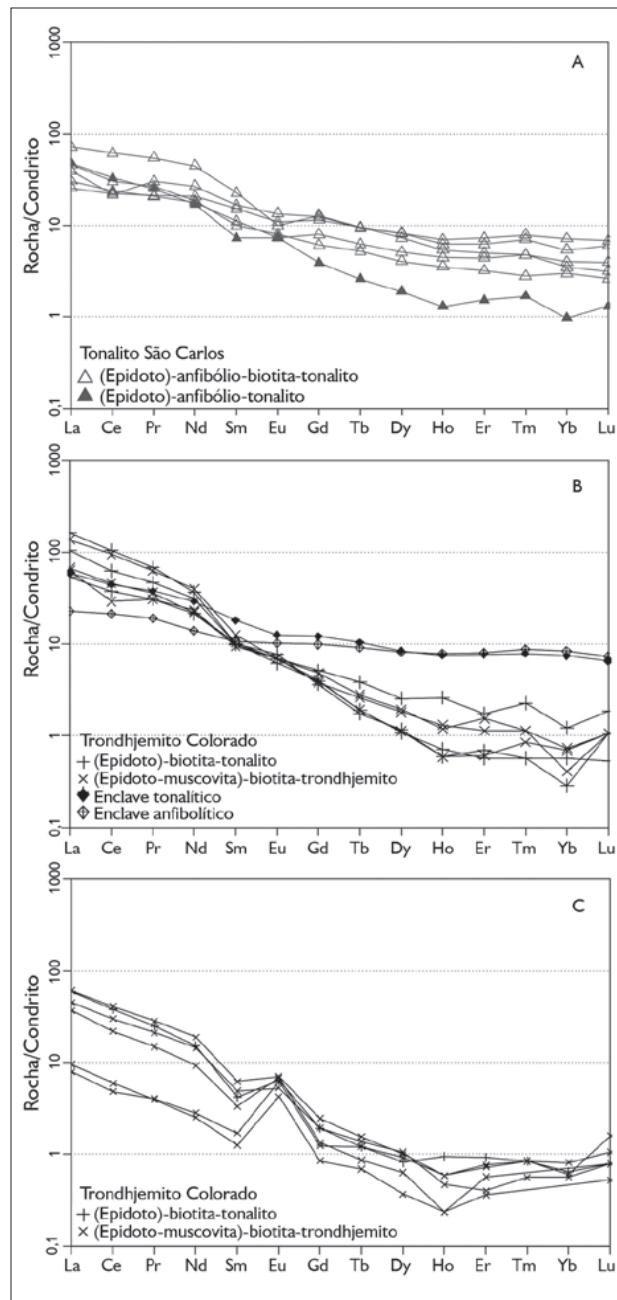


Figura 7. Padrões de ETR de granitoides arqueanos da área de Vila Jussara normalizados em relação ao condrito (Evensen *et al.*, 1978). A) Tonalito São Carlos; B) e C) Trondhjemitico Colorado.

AFM (Figura 8B), as amostras das duas associações granitoides se situam no campo da série cálcio-alcálica (Irvine & Baragar, 1971).

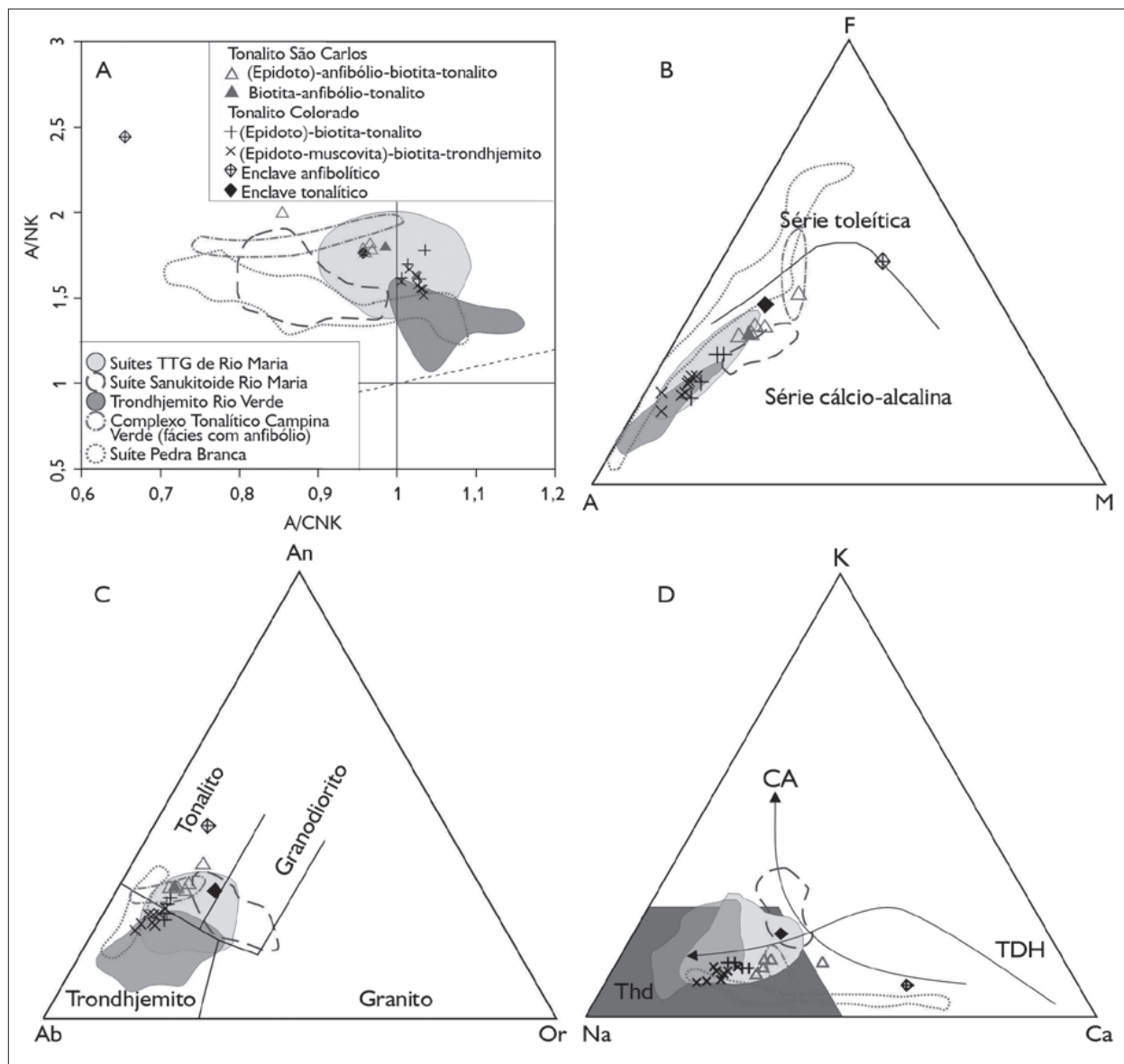


Figura 8. Caracterização geoquímica do Tonalito São Carlos e Trondhjemito Colorado: A) diagrama $[Al_2O_3]/(Na_2O+K_2O)_{mol}$ versus $[Al_2O_3]/(CaO+Na_2O+K_2O)_{mol}$ (Maniar & Piccoli, 1989); B) diagrama AFM (A = Na_2O+K_2O ; F = $FeO+0,9*Fe_2O_3$; M = MgO ; campos de Irvine & Baragar, 1971); C) diagrama An-Ab-Or normativo (campos de Barker, 1979); D) diagrama K-Na-Ca (*trends* CA = cálcio-alcalino e TDH = trondhjemítico, segundo Barker & Arth, 1976; campo Thd conforme Martin, 1994). Fonte dos dados dos campos: Suíte TTG de Rio Maria – Almeida *et al.* (2011); Suíte Sanukitoide Rio Maria – Oliveira *et al.* (2009); Trondhjemito Rio Verde, Complexo Tonalítico Campina Verde e Suíte Pedra Branca – G. R. L. Feio, comunicação pessoal).

No diagrama normativo An-Ab-Or (Figura 8C), as amostras do Trondhjemito Colorado ocupam principalmente o campo dos trondhjemitos, com raras amostras no campo dos tonalitos, tal como ocorre com as típicas séries TTG

arqueanas. Nesse diagrama, o Tonalito São Carlos plota no campo dos tonalitos. No diagrama K_2O versus SiO_2 (Figura 5H), as amostras do Tonalito São Carlos plotam no campo das séries de médio-K, enquanto as do Trondhjemito Colorado

caem preferencialmente nesse mesmo campo, porém adentram aquele das rochas de baixo-K.

No diagrama K-Na-Ca (Figura 8D), as amostras de ambas as unidades caem no campo dos trondhjemitos arqueanos (Martin, 1994; Moyen & Martin, 2012), em consequência dos seus baixos conteúdos de K_2O . Apenas uma amostra do Tonalito São Carlos plota fora daquele campo e mais próxima do *trend* cálcio-alcálico (Barker & Arth, 1976).

No Trondhjemitito Colorado, excetuando-se duas amostras, o número de magnésio (#Mg) varia de 0,34 a 0,46 (Tabela 6). Já no Tonalito São Carlos, os valores de #Mg apresentam menor variação (0,39 a 0,44, Tabela 5) e se superpõem com o intervalo superior do Trondhjemitito Colorado.

DISCUSSÕES

COMPARAÇÕES ENTRE O TONALITO SÃO CARLOS E O TRONDHJEMITO COLORADO

Além da diferença de idade indicada por dados geocronológicos preliminares (Tonalito São Carlos, cerca de 2,93 Ga, F. V. Guimarães, comunicação pessoal; Trondhjemitito Colorado, cerca de 2,87 Ga, A. C. Silva *et al.*, 2010), as associações granitoides graníticas estudadas neste trabalho diferem em seus aspectos estruturais, petrográficos e geoquímicos. O Trondhjemitito Colorado se distingue do Tonalito São Carlos por apresentar padrão estrutural dominante E-W a NW-SE, concordante com o padrão regional, enquanto o último possui padrão estrutural dominante NE-SW a N-S. Petrograficamente, essas unidades divergem em termos de suas composições modais, pela ausência de anfibólio no Trondhjemitito Colorado, ao passo que este mineral está presente em quantidade significativa no Tonalito São Carlos, ainda que seja menos abundante que a biotita. Os aspectos texturais são semelhantes nas rochas das duas unidades, porém a recristalização é mais pronunciada no Tonalito São Carlos em relação ao Trondhjemitito Colorado.

As diferenças mais marcantes entre as unidades são expressas em termos de seus comportamentos geoquímicos. O Trondhjemitito Colorado apresenta todas as características geoquímicas das típicas suítes TTG arqueanas (Martin, 1994), conforme recentemente revistas por Moyen & Martin (2012, em sua Tabela 1). Já o Tonalito São Carlos não demonstra afinidade com tais suítes em diversos diagramas geoquímicos apresentados (Figuras 7-8). Uma avaliação mais detalhada, feita em comparação aos critérios empregados na definição de TTG (Moyen & Martin, 2012), mostra que: eles possuem em geral teores de sílica (62 a 68%) compatíveis com os de TTG, mas situados no intervalo inferior da série ($> 64\%$ e, geralmente, $> 70\%$); seus conteúdos médios de $Fe_2O_3 + MnO + MgO + TiO_2$ são superiores a 5%, o que reflete seu caráter mais máfico quando comparados aos TTG; seus conteúdos de Al_2O_3 e K_2O e os valores das razões K_2O/Na_2O são compatíveis com os observados em TTG; suas razões $(La/Yb)_N$ e suas razões Sr/Y (geralmente inferiores a 50) são menores que as características dos TTG (Tabela 5). Conclui-se que o Tonalito São Carlos não constitui uma típica associação TTG.

COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS-TRAÇO E SUAS IMPLICAÇÕES

Os padrões de ETR do Tonalito São Carlos indicam que não houve fracionamento expressivo de fases enriquecidas em ETR pesados como, por exemplo, anfibólio e granada, nem tampouco de plagioclásio, durante sua evolução magmática. O comportamento incompatível de Sr, Ba e Zr constitui evidência adicional de que não houve fracionamento expressivo de plagioclásio, feldspato potássico e zircão durante a geração do magma ou sua diferenciação.

Os aspectos coincidentes nos dois padrões de ETR observados no Trondhjemitito Colorado, acentuado fracionamento de ETR e concavidade no segmento de ETR pesados podem ser explicados por expressivo fracionamento de anfibólio e, eventualmente, granada.

A ausência de anomalias negativas de Eu expressivas revela, por sua vez, que o plagioclásio não pode ter sido retido no resíduo de fusão nem fracionado de modo significativo durante a evolução do magma. A presença de anomalias positivas marcantes de Eu em grande número de amostras não pode ser explicada por eventual acumulação de cristais de plagioclásio, para a qual não se dispõe de nenhuma evidência petrográfica (conforme dados modais; Tabela 4). Uma possível explicação, que leva em conta o fato de o empobrecimento ser acentuado em ETR leves e não se observar nos ETR pesados, seria a de que teria havido desestabilização e remoção, nessas rochas, de fases minerais enriquecidas em ETR leves e com coeficientes de partição menos elevados para Eu e ETR pesados. Uma fase com essas características é a allanita (Henderson, 1984; Hanson, 1989; H. Martin, comunicação pessoal), que está presente nas rochas estudadas. Pode-se admitir que a allanita tenha sofrido desestabilização, talvez preferencialmente ao longo de zonas de cisalhamento, durante o evento de deformação e intensa recristalização neoarqueano, que afetou o Trondhjemitó Colorado de idade mesoarqueana (Figura 2). Esse processo faria com que os ETR leves fossem em grande parte removidos, mas afetaria muito menos os ETR pesados e Eu, o que justificaria o aparecimento de acentuadas anomalias positivas de Eu (Figura 7C). Em outras palavras, as rochas com padrões clássicos de TTG seriam aquelas menos alteradas por esse processo, ao passo que aquelas com anomalias positivas de Eu e empobrecimento em ETR leves seriam as mais afetadas.

COMPARAÇÕES COM GRANITOIDES DO DOMÍNIO RIO MARIA, DE CANAÃ DOS CARAJÁS E DE OUTROS CRÁTONS

Como o Tonalito São Carlos não parece corresponder a uma típica associação TTG, procurou-se compará-lo com outras associações de granitoides arqueanos, em particular com aquelas portadoras de anfibólio. Assim, foram escolhidas para comparações a Suíte Sanukitoide

Rio Maria, do Domínio homônimo, e o Complexo Tonalítico Campina Verde e a Suíte Pedra Branca da área de Canaã dos Carajás, no extremo norte do Subdomínio de Transição. Para comparações com o Trondhjemitó Colorado, foram selecionadas as suítes TTG do Domínio Rio Maria (Leite *et al.*, 2004; Almeida *et al.*, 2011) e o Trondhjemitó Rio Verde do Subdomínio do Transição (Feio *et al.*, 2013). Optou-se por fazer uma abordagem conjunta de todas as suítes TTG do Domínio Rio Maria, tanto da geração mais antiga (2,98 a 2,92 Ga) quanto da geração mais jovem (cerca de 2,86 Ga), pelo fato de estas possuírem características gerais similares.

O Trondhjemitó Colorado é similar em termos de composição modal das associações TTG de Rio Maria e do Subdomínio de Transição, pois ambas são formadas por tonalitos e trondhjemitos, com granodioritos subordinados, e contêm como principais minerais ferromagnesianos biotita e epidoto magmático. Entretanto, as diferentes associações TTG de ambos os domínios exibem comportamento geoquímico contrastante em relação a determinados aspectos. Almeida *et al.* (2011) mostraram que os TTG de Rio Maria pertencem à série alto- Al_2O_3 , plotam no campo médio-K, possuem caráter cálcio-alcálico e, na classificação de Barker (1979), são tonalitos a trondhjemitos com raros granodioritos. São pobres em ferromagnesianos ($Fe_2O_3 + MnO + MgO + TiO_2 \leq 5\%$), mostram valores de A/CNK entre 0,9 e 1,1, têm razões K_2O/Na_2O geralmente $< 0,5$, moderado #Mg e caráter sódico (diagrama K-Na-Ca; Barker & Arth, 1976). As características supracitadas são típicas de rochas TTG (Martin, 1994; Moyen & Martin, 2012), repetem-se, com poucas exceções, na associação TTG de Canaã dos Carajás, no Trondhjemitó Rio Verde (Feio *et al.*, 2013) e também são observadas no Trondhjemitó Colorado (Figura 8 e Tabela 6).

No Domínio Rio Maria, as suítes TTG foram divididas por Almeida *et al.* (2011) em grupos com alta, média e baixa razão La/Yb, as quais não apresentam correspondência direta com as diferentes unidades, ou seja, amostras de uma mesma unidade podem pertencer a diferentes

grupos. Tal contraste composicional não foi observado nas rochas estudadas, as quais se situam sobrepostas ou próximas ao campo do grupo com altas razões $(La/Yb)_N$ e Sr/Y (Figuras 9A-9B), com exceção da amostra (AFD-17) e de dois enclaves que possuem, respectivamente, razão La/Yb média ou baixa. Relação um pouco distinta foi observada no Trondhjemito Rio Verde (Feio *et al.*, 2012), cujas rochas possuem razão $(La/Yb)_N$ e Yb moderados (Figura 9A), e se dividem em subgrupos em razão dos variados valores de Sr/Y (Figura 9B). As comparações geoquímicas revelam que o Trondhjemito Colorado possui maior afinidade geoquímica com as associações TTG do grupo com elevado Sr e altas razões $(La/Yb)_N$ e Sr/Y , representadas, principalmente, pelo Trondhjemito Mogno e Tonalito Mariazinha (Almeida *et al.*, 2011).

Como o Tonalito São Carlos possui anfibólio e biotita como principais minerais ferromagnesianos e se distingue dos TTG, optou-se por compará-lo com associações arqueanas da Província Carajás que apresentam essas mesmas características, tais como a Suíte Sanukitoide Rio Maria, o Complexo Tonalítico Campina Verde e a Suíte Pedra Branca.

O termo 'sanukitoide' tem sido aplicado na literatura para designar associações graníticas (ou de granitoides) arqueanas que possuem valores elevados de $\#Mg$ e altos conteúdos de Cr , Ni , P , LILE (Sr , Ba) e ETR leves (Stern *et al.*, 1989; Stern & Hanson, 1991; Halla, 2005; Martin *et al.*, 2005; Lobach-Zhuchenko *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2009, 2011; Heilimo *et al.*, 2010). Uma primeira diferença vem do fato de que na Suíte Rio Maria há dominância de granodioritos, ao passo que no Tonalito São Carlos há somente ocorrência de tonalitos. Além disso, os diagramas de classificação da série magmática (Figura 8) revelam diferenças significativas entre essas unidades. Ambas são formadas por rochas metaluminosas (Figura 8A), que incidem no campo cálcio-alcalino no diagrama AFM (Figura 8B). No entanto, a Suíte Rio Maria é constituída principalmente por granodioritos, com tonalitos subordinados (Figura 8C), e no diagrama K-Na-Ca se alinha segundo o *trend* das séries cálcio-alcalinas (Figura 8D), enquanto as amostras do Tonalito São Carlos não seguem os *trends* clássicos desse diagrama e incidem no campo trondhjêmico.

Os contrastes entre essas duas associações granitoides são mais visíveis em diagramas binários que

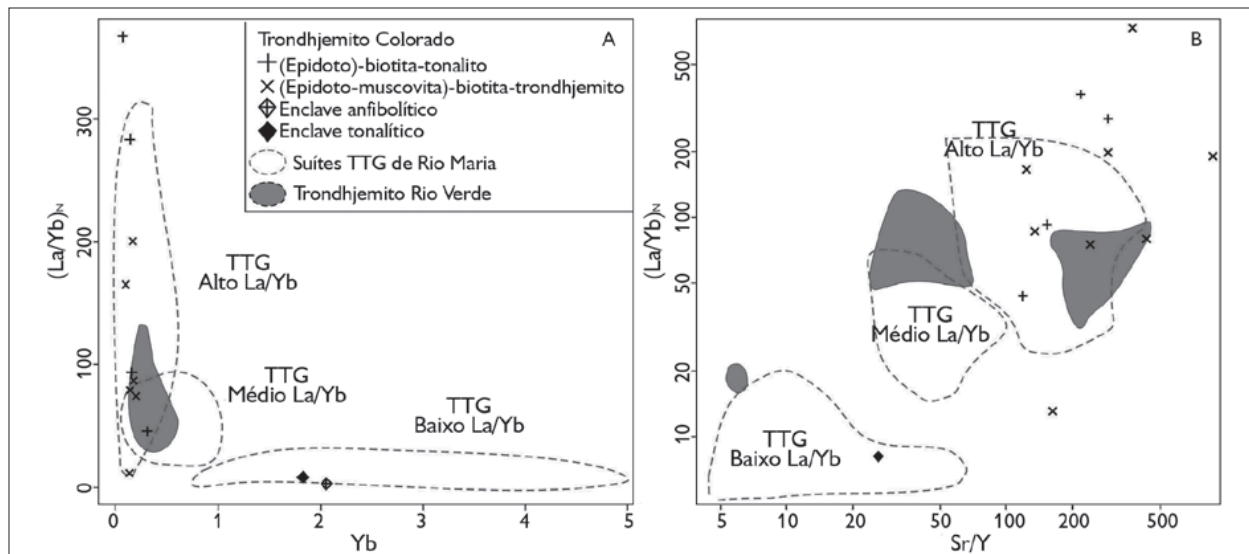


Figura 9. Diagramas binários para comparação entre os TTG do Domínio Rio Maria e os estudados: A) diagrama Yb versus $(La/Yb)_N$; B) diagrama Sr/Y versus $(La/Yb)_N$. Fonte dos dados dos campos: Suítas TTG de Rio Maria – Almeida *et al.* (2011); Trondhjemito Rio Verde – G. R. L. Feio, comunicação pessoal.

visam a comparar elementos críticos na definição de sanukitoides (Figura 10). Nos diagramas SiO_2 versus $\# \text{Mg}$ e Ni versus $\# \text{Mg}$ (Figuras 10A-10B), percebe-se que o conteúdo de sílica do Tonalito São Carlos se superpõe com o das amostras mais evoluídas da Suíte Rio Maria, porém os valores de $\# \text{Mg}$ e Ni são inferiores no Tonalito São Carlos. De modo análogo, constata-se que os conteúdos de Sr e Rb e os valores da razão Rb/Sr (Figuras 10C-10D)

são igualmente menores no Tonalito São Carlos. As diferenças mencionadas entre as composições das rochas das duas unidades indicam que o Tonalito São Carlos não possui afinidade com as suítes sanukitoides em geral e não poderia, portanto, ser correlacionado com a Suíte Rio Maria. Isso é reforçado pelo contraste entre as idades dessas mesmas unidades (2,93 Ga – Tonalito São Carlos; 2,87 Ga – Suíte Rio Maria; Tabela 2).

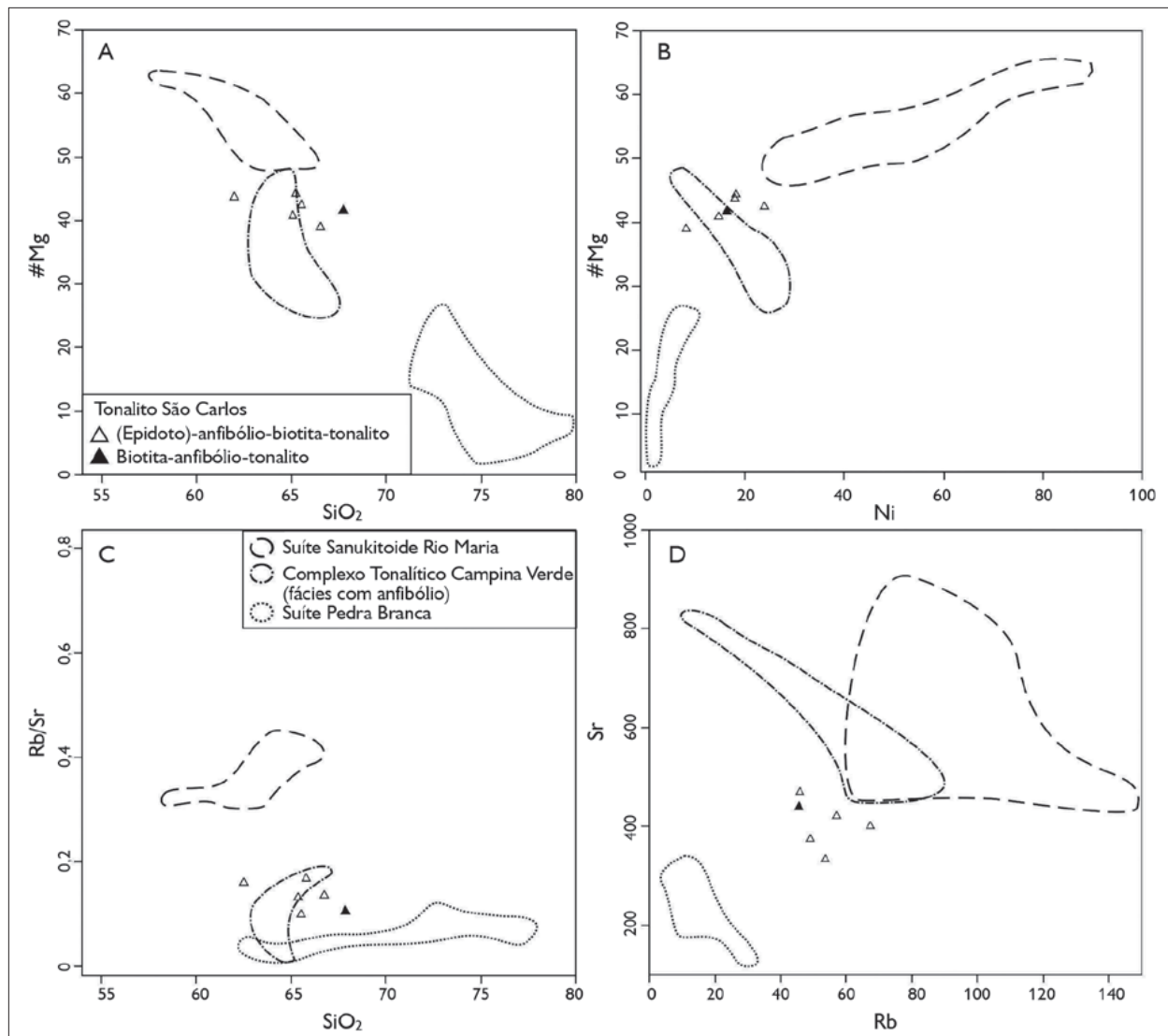


Figura 10. Diagramas geoquímicos para comparações entre o Tonalito São Carlos e granitoides arqueanos com anfibólio da Província Carajás: A) SiO_2 versus $\# \text{Mg}$; B) Ni versus $\# \text{Mg}$; C) SiO_2 versus Rb/Sr ; D) Rb versus Sr . Fontes dos dados dos campos: Suíte Sanukitoide Rio Maria – Oliveira *et al.* (2009); Complexo Tonalítico Campina Verde e Suíte Pedra Branca – G. R. L. Feio (comunicação pessoal).

O Complexo Tonalítico Campina Verde apresenta duas associações distintas, uma das quais formada por variedades contendo anfibólio e biotita como principais minerais ferromagnesianos e outra que possui apenas biotita (Feio *et al.*, 2013). A primeira é metaluminosa e possui maior semelhança petrográfica com o Tonalito São Carlos, enquanto a segunda é peraluminosa e difere bastante dele, o que reduz o interesse da comparação. As informações disponíveis sobre essa unidade ainda são muito limitadas, mas aparentemente há analogias geoquímicas significativas entre as suas fácies com anfibólio e o Tonalito São Carlos. Os biotita-hornblenda-tonalitos do Complexo se situam em campos idênticos aos ocupados pelo Tonalito São Carlos nos diagramas An-Ab-Or, K-Na-Ca, AFM e K_2O-SiO_2 (Feio *et al.*, 2013, suas Figuras 4A, 4C, 5B-5C, respectivamente). Além disso, as razões Sr/Y e os padrões de ETR desses dois granitoides são bastante similares, embora as amostras do Complexo Campina Verde mostrem razões $(La/Yb)_N$ comparativamente mais elevadas (20 a 50). Conclui-se que há interesse em aprofundar a comparação entre esses dois granitoides, embora as idades de 2,87 e 2,85 Ga obtidas por Feio *et al.* (2013) indiquem que o complexo é mais jovem que o Tonalito São Carlos (~2,93 Ga; F. V. Guimarães, comunicação pessoal).

A Suíte Pedra Branca apresenta características geoquímicas particulares. Exibe razões Rb/Sr menores que 0,1 (Figura 10C), baixíssimos conteúdos de K_2O , Rb e Sr (Figuras 8, 10D), e altos teores de Y, Zr e TiO_2 , feições estas muito distintas daquelas apresentadas pelo Tonalito São Carlos (Figuras 8, 10). Esses aspectos e sua idade neoarqueana (~2,75 Ga; Feio *et al.*, 2013) invalidam sua correlação com o Tonalito São Carlos.

Martin & Moyen (2002) admitem uma variação composicional dos TTG arqueanos ao longo do tempo geológico. Os TTG do final do Mesoarqueano e Neoarqueano (< 3,0 Ga) apresentariam, segundo eles, valores mais elevados de #Mg, Cr, Ni, Sr e (Na_2O+CaO) , que seriam reflexo da maior profundidade

da fusão em zonas de subducção, a qual traria maiores possibilidades de interação das fusões TTG com o manto peridotítico. Isso aconteceria em TTG do final do arqueano, porque o grau geotérmico era menor e as fusões ocorriam em maiores profundidades, de modo similar ao que ocorre atualmente com os adakitos. Tais condições não parecem razoáveis para a formação do magma gerador do Tonalito São Carlos, porque suas amostras não possuem valores de #Mg (Figura 11B), Cr e Ni elevados, e seus padrões de ETR apresentam fracionamento pouco acentuado de ETR pesados (Figura 7A), o que não é condizente com a geração de seu magma em condições de altas pressões.

Moyen *et al.* (2003) admitem a hipótese de uma mudança progressiva de TTG típicos para sanukitoides e chamaram as rochas de composição intermediária entre as duas séries de 'TTG enriquecidos'. Como o Tonalito São Carlos não apresenta composição típica de TTG, é interessante verificar se o mesmo não poderia corresponder aos TTG enriquecidos. As Figuras 11A-11B mostram diagramas de discriminação para elementos maiores e traço, com campos definidos por Moyen *et al.* (2003) para diversos granitoides arqueanos do Cráton Dharwar e de outros crátons do mundo, incluindo TTG típicos, TTG enriquecidos e sanukitoides. As amostras do Tonalito São Carlos e Trondhjemitico Colorado foram plotadas nesses diagramas para comparação. As composições do Trondhjemitico Colorado e Tonalito São Carlos incidem nos campos das composições de rochas TTG em todos os diagramas e não há coincidência, portanto, entre a distribuição de amostras do Tonalito São Carlos e o campo dos TTG enriquecidos. Além disso, constata-se que as amostras do Tonalito São Carlos não se situam entre aquelas do Trondhjemitico Colorado e o campo das associações sanukitoides, como seria de esperar caso fossem rochas transicionais entre as duas séries. Conclui-se que o Tonalito São Carlos não corresponde geoquimicamente aos TTG enriquecidos, conforme definidos por Moyen *et al.* (2003).

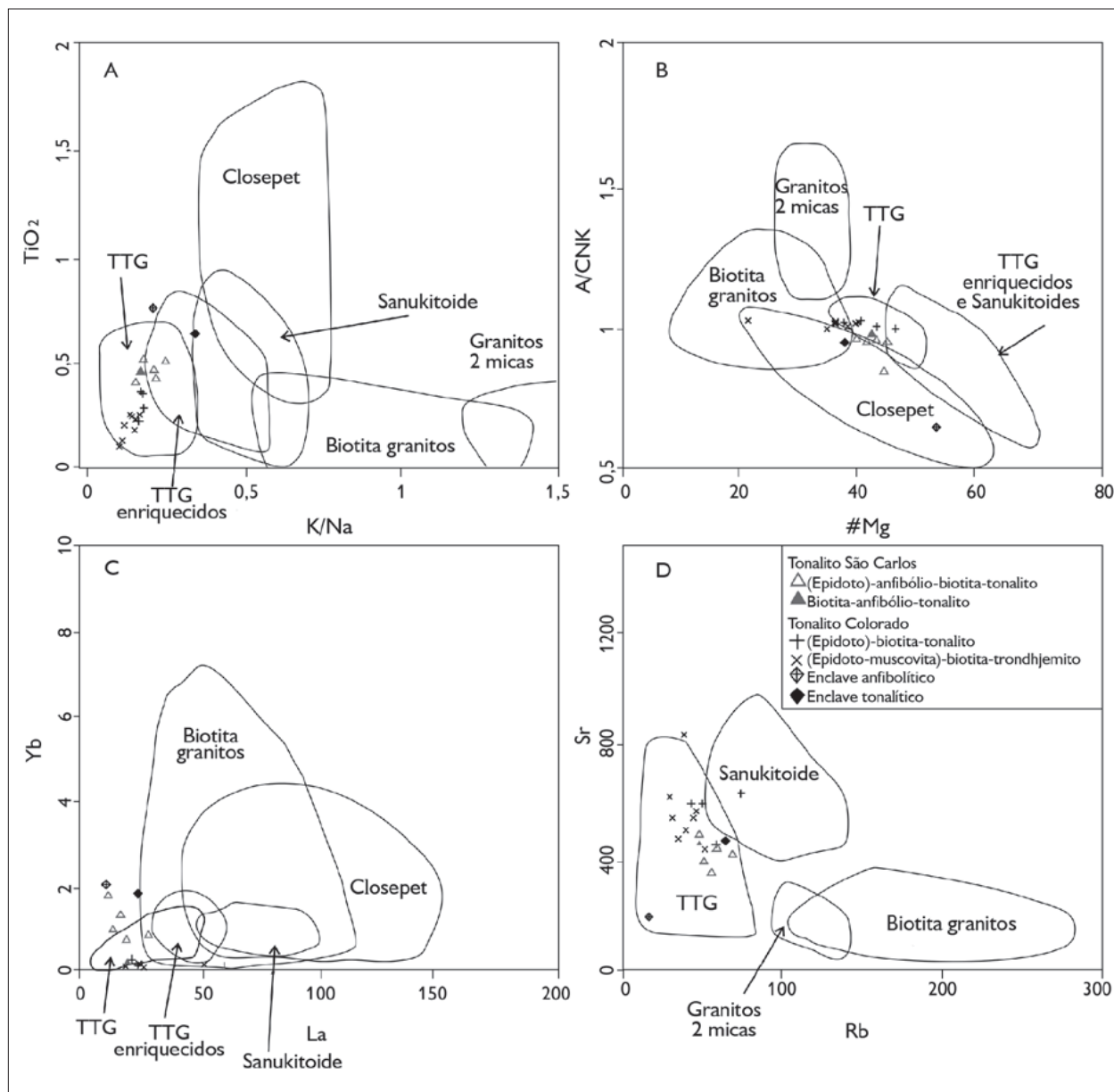


Figura 11. Diagramas de variação para comparação das associações arqueanas de outros crátons com o Tonalito São Carlos e Trondhjemito Colorado: A) diagrama K/Na versus TiO₂; B) diagrama #Mg versus A/CNK; C) diagrama La versus Yb; D) diagrama Rb versus Sr. Diferentes campos definidos com base em Moyen *et al.* (2003).

IMPLICAÇÕES PARA A EVOLUÇÃO DO SUBDOMÍNIO DE TRANSIÇÃO

O Tonalito São Carlos e o Trondhjemito Colorado, expostos nas proximidades de Vila Jussara, mostram características que podem contribuir para o entendimento

da evolução do Subdomínio de Transição e, por extensão, da Província Carajás.

O Tonalito São Carlos é a associação litológica com maiores particularidades. Seus corpos são orientados NE-SW e suas rochas exibem foliações de

direção NE-SW a N-S, portanto claramente discordantes do padrão regional E-W a NW-SE. Dados preliminares indicam idade de cerca de 2,93 Ga para esse granitoide, que foi afetado por intensa recristalização. Essa idade e seu padrão estrutural poderiam sugerir uma possível correlação com o Tonalito Mariazinha (Guimarães *et al.*, 2010; Almeida *et al.*, 2011). Entretanto, ele é distinto das associações TTG em suas características mineralógicas e geoquímicas e, excetuando-se uma possível semelhança com o Complexo Campina Verde, não se conhecem rochas similares até então em toda a província. É possível que essa unidade represente fragmentos mais antigos de crosta mesoarqueana que foram parcialmente preservados durante o intenso evento deformacional neoarqueano que forneceu a configuração atual do Subdomínio de Transição.

Caso venha a ser confirmada a idade preliminar do Trondhjemitico Colorado, ela implica a existência, no Subdomínio de Transição, de um volume expressivo de TTG com idade similar à dos TTG mais jovens do Domínio Rio Maria, ora representados exclusivamente pelas ocorrências modestas em termos de distribuição areal do Trondhjemitico Água Fria. Isso pode implicar um possível fortalecimento para a hipótese de que o Subdomínio de Transição represente uma extensão do Domínio Rio Maria retrabalhada durante os eventos neoarqueanos atuantes no Domínio Carajás (Dall'Agnol *et al.*, 2006). Entretanto, qualquer conclusão nesse sentido seria prematura, pois há necessidade de se avançar na obtenção de dados geocronológicos e isotópicos para poder concluir algo a respeito disso. Por outro lado, a presença desse volume expressivo de TTG na área estudada revela que a mesma difere na sua configuração geológica da área de Canaã dos Carajás, onde os TTG ocupam área restrita, enquanto os granitos *stricto sensu* possuem ampla distribuição.

CONCLUSÕES

Trabalhos de campo, aliados a estudo petrográfico e geoquímico, permitem a identificação de diversos granitoides arqueanos, entre os quais duas associações

tonalíticas que recebem denominação formal no presente trabalho: Tonalito São Carlos e Trondhjemitico Colorado. Os dados apresentados e discutidos neste trabalho permitem concluir que:

- O Tonalito São Carlos e o Trondhjemitico Colorado têm idades contrastantes e diferem em suas feições estruturais, petrográficas e geoquímicas;
- O Trondhjemitico Colorado apresenta foliações orientadas segundo o *trend* regional E-W, com mergulhos moderados a fortes, enquanto no Tonalito São Carlos as foliações se orientam segundo N-S a NE-SW e exibem mergulhos moderados a subverticais;
- O Trondhjemitico Colorado possui biotita como principal mineral varietal e é constituído principalmente por trondhjemitos e tonalitos, com granodioritos subordinados, ao passo que o Tonalito São Carlos tem anfibólio e biotita. Ambas as associações foram afetadas por intensa deformação em regime dúctil, responsável por suas feições protomiloníticas a miloníticas, seguida de acentuada recristalização térmica;
- O Tonalito São Carlos possui comportamento geoquímico particular, que não permite associá-lo com as associações TTG nem tampouco com as suítes sanukitoides da Província Carajás. Apesar das limitações dos dados disponíveis, há evidências que indicam sua semelhança com as variedades portadoras de anfibólio do Complexo Campina Verde descrito em Canaã dos Carajás;
- As rochas do Trondhjemitico Colorado possuem características geoquímicas que permitem associá-los às típicas suítes TTG arqueanas. Sua assinatura geoquímica indica similaridades com o grupo de TTG portadores de altas razões $(La/Yb)_N$ e Sr/Y e, mais particularmente, com o Trondhjemitico Mogno e Tonalito Mariazinha do Domínio Rio Maria, e com o Trondhjemitico Rio Verde, da área de Canaã dos Carajás.
- Os padrões de ETR e as variações observadas nas razões $(La/Yb)_N$ e Sr/Y indicam que, no caso do Tonalito São Carlos, não houve fracionamento

expressivo de minerais enriquecidos em ETR pesados, tais como hornblenda e granada, nem tampouco de plagioclásio. Já no caso do Trondhjemito Colorado, há fortes evidências de que fases minerais com elevados coeficientes de partição para ETR pesados tiveram papel importante no fracionamento, não tendo sido acompanhadas pelo plagioclásio. O empobrecimento marcante em ETR leves, acompanhado do surgimento de expressivas anomalias positivas de Eu em muitas amostras do Trondhjemito Colorado, é explicado pela desestabilização de allanita e remoção de seus constituintes do sistema. Isso se deu provavelmente durante a atuação do intenso evento de deformação e recristalização que afetou as rochas deste granitoide no Neoarqueano.

- Os dados geológicos revelam que o Subdomínio de Transição possui uma evolução complexa, ainda não esclarecida. O grande volume de TTG de idade mesoarqueana reforça a hipótese de possível ligação evolutiva entre a área estudada e o Domínio Rio Maria e, ao mesmo tempo, limita sua correlação com a área de Canaã dos Carajás, no extremo norte do Subdomínio de Transição.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides da Universidade Federal do Pará (GPPG-IG-UFA), pelo apoio nas diversas etapas deste trabalho; ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (IG e PPGG-UFA) pelo suporte técnico; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por concessão de bolsas de doutorado (F. V. Guimarães) e de produtividade em pesquisa (R. Dall'Agnol) e por apoio financeiro (Processo nº 484524/2007-0); ao convênio Vale/FAPESPA edital 01/2010, ICAAF: 053/2011 pelo apoio financeiro. Este trabalho é uma contribuição

para o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) de Geociências da Amazônia (GEOCIAM – CNPq/MCT/FAPESPA – Processo nº 573733/2008-2) e para o projeto IGCP-SIDA 599.

REFERÊNCIAS

ACMELABS, s. d. **AcemeLabs™**: a bureau veritas group company. Disponível em: <www.acmelab.com>. Acesso em: Fevereiro 2013.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL & D. C. OLIVEIRA, 2006. Geologia, petrografia e geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. **Revista Brasileira de Geociências** 36(2): 282-295.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL, S. B. DIAS & F. J. ALTHOFF, 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. **Lithos** 120(3-4): 235-257.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL, M. A. OLIVEIRA, M. J. B. MACAMBIRA, M. M. PIMENTEL, O. T. RÄMÖ, F. V. GUIMARÃES & A. A. S. LEITE, 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(1-2): 201-221.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL & A. A. S. LEITE, 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 42: 103-126.

ALTHOFF, F. J., P. BARBEY, M. J. B. MACAMBIRA, T. SCHELLER, J. LETERRIER, R. DALL'AGNOL & J. M. LAFON, 1998. La croissance du craton sud-amazonien (région de Rio Maria, Brésil). **Résumés de la Réunion des Sciences de la Terre**: 62.

ALTHOFF, F. J., P. BARBEY & A.-M. BOULLIER, 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(3-4): 187-206.

ARAÚJO, O. J. B. & R. G. N. MAIA, 1991. **Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Serra dos Carajás, folha SB.22-Z-A, Estado do Pará**. Texto explicativo: 1-164. DNPM/CPRM, Brasília.

AVELAR, V. G., J. M. LAFON, F. C. CORREIA JR. & E. M. B. MACAMBIRA, 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências** 29(4): 453-460.

BARKER, F., 1979. Trondhjemites: definition, environment and hypotheses of origin. In: F. BARKER (Ed.): **Trondhjemites, dacites and related rocks**: 1-12. Elsevier, Amsterdam.

- BARKER, F. & J. G. ARTH, 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemite-basalt suites. **Geology** 4(10): 596-600.
- BARROS, C. E. M., R. DALL'AGNOL, E. A. P. VIEIRA & M. S. MAGALHÃES, 1995. Granito Central da Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra** 7: 93-123.
- BARROS, C. E. M., A. S. SARDINHA, J. P. O. BARBOSA, M. J. B. MACAMBIRA, P. BARBEY & A. M. BOULLIER, 2009. Structure, petrology, geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. **The Canadian Mineralogist** 47: 1423-1440.
- BOWDEN, P., R. A. BATCHELOR, B. W. CHAPELL, J. DIDIER & J. LAMEYRE, 1984. Petrological, geochemical and source criteria for the classification of granitic rocks: a discussion. **Physics of the Earth and Planetary Interiors** 35(1-3): 1-11.
- CHAMPION, D. C. & J. W. SHERATON, 1997. Geochemistry and Nd isotope systematics of Archaean granites of the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. **Precambrian Research** 83(1-3): 109-132.
- CHAMPION, D. C. & R. H. SMITHIES, 2007. Geochemistry of Paleoproterozoic Granites of the East Pilbara Terrane, Pilbara Craton, Western Australia: implications for Early Archean Crustal Growth. In: M. J. VAN KRAENDONK, R. H. SMITHIES & V. C. BENNETT (Eds.): **Earth's oldest rocks: developments in Precambrian Geology**: 15: 369-410. Elsevier, Amsterdam.
- CONDIE, K. C., 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? **Lithos** 80(1-4): 33-44.
- DALL'AGNOL, R., O. T. RÄMÖ, M. S. MAGALHÃES & M. J. B. MACAMBIRA, 1999. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. **Lithos** 46(3): 431-462.
- DALL'AGNOL, R., N. P. TEIXEIRA, O. T. RÄMÖ, C. A. V. MOURA, M. J. B. MACAMBIRA & D. C. OLIVEIRA, 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. **Lithos** 80: 101-129.
- DALL'AGNOL, R., M. A. OLIVEIRA, J. A. C. ALMEIDA, F. J. ALTHOFF, A. A. S. LEITE, D. C. OLIVEIRA & C. E. M. BARROS, 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. In: R. DALL'AGNOL, L. T. ROSA-COSTA & E. L. KLEIN (Eds.): **Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian craton**: 97-150. PRONEX-UFPA/SBG-NO, Belém.
- DUARTE, K. D., E. D. PEREIRA, R. DALL'AGNOL & J. M. LAFON, 1991. Geologia e geocronologia do Granito Mata Surrão – sudoeste de Rio Maria (PA). **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 3: 7-20.
- EVENSEN, N. M., P. T. HAMILTON & R. K. O'NIONS, 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 42(8): 1199-1212.
- FEIO, G. R. L. & R. DALL'AGNOL, 2012. Geochemistry and petrogenesis of the granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás province, Brazil: implications for the origin of Archean granites. **Lithos** 154: 33-52.
- FEIO, G. R. L., R. DALL'AGNOL, E. L. DANTAS, M. J. B. MACAMBIRA, A. C. B. GOMES, A. S. SARDINHA, D. C. OLIVEIRA, R. D. SANTOS & P. A. SANTOS, 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? **Lithos** 151: 57-73.
- FEIO, G. R. L., R. DALL'AGNOL, E. L. DANTAS, M. J. B. MACAMBIRA, J. O. S. SANTOS, F. J. ALTHOFF & J. E. B. SOARES, 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.
- GABRIEL, E. O., D. C. OLIVEIRA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geocronológica de ortopiroxênio-trondhjemitos (leucoenderbitos) da região de Vila Cedere III, Canaã dos Carajás-PA, Província Mineral de Carajás. **Resumos do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- GOMES, A. C. B. & R. DALL'AGNOL, 2007. Nova associação tonalítica-trondhjemitica Neoarqueana na região de Canaã dos Carajás: TTGs com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. **Revista Brasileira de Geociências** 37(1): 182-193.
- GUIMARÃES, F. V. G., R. DALL'AGNOL, J. A. C. ALMEIDA & M. A. OLIVEIRA, 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do Trondhjemito Mogno e Tonalito Mariázinha, Terreno Granito-Greenstone mesoarqueano de Rio Maria, SE do Pará. **Revista Brasileira de Geociências** 40(2): 196-211.
- GUIMARÃES, F. V. G., R. DALL'AGNOL, M. A. OLIVEIRA & J. A. C. ALMEIDA, no prelo. Geologia, petrografia e geoquímica do quartzodiorito Parazônia e granodiorito Grotão, terreno granito-greenstone de Rio Maria – Pará. **Revista Brasileira de Geociências**.
- HALLA, J., 2005. Late Archean high-Mg granitoids (sanukitoids) in the Southern Karelian craton, Eastern Finland. **Lithos** 79: 161-178.
- HANSON, G. N., 1989. An approach to trace element modeling using a simple igneous system as an example. **Reviews in Mineralogy** 21(1): 79-97.
- HEILIMO, E., J. HALLA & P. HÖLTTÄ, 2010. Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoarchean western Karelian Province (Finland). **Lithos** 115(1-4): 27-39.
- HENDERSON, P., 1984. **Rare earth element geochemistry**: 1-510. Elsevier, New York.

- HIRATA, W. K., J. C. RIGON, A. A. C. CORDEIRO & E. M. MEIRELES, 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 1: 100-110.
- HUHN, S. R. B., A. B. S. SANTOS, A. F. AMARAL, E. J. LEDSHAM, J. L. GOUVEIA, L. B. P. MARTINS, R. M. G. MONTALVÃO & V. G. COSTA, 1988. O terreno *granito-greenstone* da região de Rio Maria – Sul do Pará. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 35(3): 1438-1453.
- HUHN, S. B., M. J. B. MACAMBIRA & R. DALL'AGNOL, 1999. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Arqueano Planalto, região da Serra do Rabo, Carajás – PA. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 6(1): 463-466.
- IRVINE, T. N. & W. R. A. BARAGAR, 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. **Canadian Journal of Earth Sciences** 8(5): 523-548.
- LAFON, J. M., E. RODRIGUES & K. D. DUARTE, 1994. Le granite Mata Surrão: un magmatisme monzogranitique contemporain des associations tonalitiques-trondhjemitiques-granodioritiques archéennes de la région de Rio Maria (Amazonie Orientale, Brésil). **Sciences de la Terre et des Planètes** 318(2): 642-649.
- LAFON, J. M., M. J. B. MACAMBIRA & R. T. PIDGEON, 2000. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). **Abstracts of the International Geological Congress** 31: 1 CD-ROM.
- LAMEYRE, J. & P. BOWDEN, 1982. Plutonic rock type series: discrimination of various granitoid series and related rocks. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** 14(1-2): 169-186.
- LE MAITRE, R. W. (Ed.), 2002. **Igneous rocks: a classification and glossary of terms**: 1-193. Cambridge University Press, London.
- LEITE, A. A. S. & R. DALL'AGNOL, 1997. Geologia e petrografia do maciço granítico Arqueano Xinguara e de suas encaixantes – SE do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra** 9: 43-81.
- LEITE, A. A. S., R. DALL'AGNOL, M. J. B. MACAMBIRA & F. J. ALTHOFF, 2004. Geologia e geocronologia dos granitoides Arqueanos da região de Xinguara-PA e suas implicações na evolução do terreno granito-greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. **Revista Brasileira de Geociências** 34(4): 447-458.
- LOBACH-ZHUCHENKO, S. B., H. R. ROLLINSON, V. P. CHEKULAEV, N. A. ARESTOVA, A. V. KOVALENKO, V. V. IVANIKOV, N. S. GUSEVA, S. A. SERGEEV, D. I. MATUKOV & K. E. JARVIS, 2005. The Archaean sanukitoid series of the Baltic Shield: geological setting, geochemical characteristics and implications for their origin. **Lithos** 79(1-2): 107-128.
- MACAMBIRA, M. J. B. & J. LANCELOT, 1992. Idade U-Pb em zircões de metavulcânica do *greenstone* do Supergupo Andorinhas: delimitante da estratigrafia arqueana de Carajás, Estado do Pará. **Resumos Expandidos do Congresso Brasileiro de Geologia** 37(2): 188-189.
- MACAMBIRA, M. J. B. & J. M. LAFON, 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra** 7: 263-288.
- MACAMBIRA, M. J. B. & J. R. LANCELOT, 1996. Time constraints for the formation of the Archaean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. **International Geology Review** 38(12): 1134-1142.
- MACAMBIRA, E. M. B. & A. G. VALE, 1997. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. São Félix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará: 1-384. DNPM/CPRM, Brasília.
- MACAMBIRA, M. J. B., J. B. S. COSTA, F. J. ALTHOFF, J. M. LAFON, J. C. V. MELO & A. SANTOS, 2000. New geochronological data for the Rio Maria TTG terrane: implications for the time constraints of the crustal formation of the Carajás Province, Brazil. **Abstracts of the International Geological Congress** 31: 1 CD-ROM.
- MACHADO, N., Z. LINDENMAYER, T. E. KROGH & D. LINDENMAYER, 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research** 49(3-4): 329-354.
- MANIAR, P. D. & P. M. PICCOLLI, 1989. Tectonic discrimination of granitoids. **The Geological Society of America Bulletin** 101(5): 635-643.
- MARTIN, H., 1987. Petrogenesis of Archaean trondhjemitic, tonalitic, and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. **Journal of Petrology** 28(5): 921-953.
- MARTIN, H., 1994. The Archaean grey gneisses and the gneisses of continental crust. In: K. C. CONDIE (Ed.): **Archaean crustal evolution**: 205-259. Elsevier (Developments in Precambrian Geology 11), Amsterdam.
- MARTIN, H. & J. F. MOYEN, 2002. Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the Earth. **Geology** 30(4): 319-322.
- MARTIN, H., R. H. SMITHIES, R. RAPP, J.-F. MOYEN & D. CHAMPION, 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemitic-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. **Lithos** 79(1-2): 1-24.
- MEDEIROS, H. & R. DALL'AGNOL, 1988. Petrologia da porção leste do Batólito Granodiorítico Rio Maria, sudeste do Pará. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 35(3): 1488-1499.
- MORETO, C. P. N., L. V. S. MONTEIRO, R. P. XAVIER, W. S. AMARAL, T. J. S. SANTOS, C. JULIANI & C. R. SOUZA FILHO, 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenic implications. **Mineralium Deposita** 46(7): 789-811.
- MOYEN, J. F., H. MARTIN, M. JAYANANDA & B. AUVRAY, 2003. Late Archaean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India). **Precambrian Research** 127(1-3): 103-123.

- MOYEN, J. F. & H. MARTIN, 2012. Forty years of TTG research. **Lithos** 148: 312-336.
- OLIVEIRA, D. C., P. J. L. SANTOS, E. O. GABRIEL, D. S. RODRIGUES, A. C. FARELIN, M. L. T. SILVA, S. D. SOUSA, R. V. SANTOS, A. C. SILVA, M. C. SOUZA, R. D. SANTOS & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás – Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL & F. J. ALTHOFF, 2006. Petrografia e geoquímica do Granodiorito Rio Maria da região de Bannach e comparações com as demais ocorrências no terreno Granito-Greenstone de Rio Maria – Pará. **Revista Brasileira de Geociências** 36(2): 313-326.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL, F. J. ALTHOFF & A. A. S. LEITE, 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 27: 146-160.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL & B. SCAILLET, 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean Sanukitoid rocks, southeastern Amazonian Craton, Brazil. **Journal of Petrology** 51(10): 2121-2148.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL & J. A. C. ALMEIDA, 2011. Petrology of the Mesoarchean Rio Maria suite and the discrimination of the sanukitoid series. **Lithos** 127(1-2): 192-209.
- PASSCHIER, C. W. & R. A. J. TROUW, 1996. **Microtectonics**: 1-289. Springer Verlag, Berlin.
- PECCERILLO, A. & S. R. TAYLOR, 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. **Contributions to Mineralogy and Petrology** 58(1): 63-81.
- PIDGEON, R. T., M. J. B. MACAMBIRA & J. M. LAFON, 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology** 166(1-2): 159-171.
- PIMENTEL, M. M. & N. MACHADO, 1994. Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. **Boletim de Resumos Expandidos do Congresso Brasileiro de Geologia** 38(2): 390-391.
- RODRIGUES, E. S., J. M. LAFON & T. SCHELLER, 1992. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. **Resumos Expandidos do Congresso Brasileiro de Geologia** 37(2): 183-184.
- ROLANDO, A. P. & M. J. B. MACAMBIRA, 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: **Expanded Abstracts of the South American Symposium on Isotope Geology** 4: 1 CD-ROM.
- SANTOS, J. O. S., L. A. HARTMANN, H. E. GAUDETTE, D. I. GROVES, N. J. MCNAUGHTON & I. R. FLETCHER, 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Gondwana Research** 3(4): 453-488.
- SANTOS, J. O. S., L. A. HARTMANN, S. R. RIKER, M. M. SOUZA, M. E. ALMEIDA & N. J. MCNAUGHTON, 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. **Resumo Expandido do Simpósio de Geologia da Amazônia** 9: 1 CD-ROM.
- SANTOS, P. J. L., D. C. OLIVEIRA, M. A. GALARZA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da região de Nova Canadá, município de Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás. **Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SANTOS, R. D., D. C. OLIVEIRA & R. M. K. BORGES, 2008. Geologia e petrografia das rochas máficas e ultramáficas do complexo Pium – Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 44: 1-535.
- SARDINHA, A. S., R. DALL'AGNOL, A. C. B. GOMES, M. J. B. MACAMBIRA & M. A. GALARZA, 2004. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em zircão de granitoides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 42: 1 CD-ROM.
- SILVA, A. C., D. C. OLIVEIRA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Individualização e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu, região de Vila Jussara, município de Água Azul do Norte – PA, Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SILVA, G. G., M. I. C. LIMA, A. R. F. ANDRADE, R. S. ISSLER & G. GUIMARÃES, 1974. Geologia. In: BRASIL. **Projeto RADAMBRASIL**: Folha SB.22, Araguaia e parte de SC.22, Tocantins; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da Terra: 1: 1-143. Programa de Integração Nacional (Levantamento de Recursos Naturais, 4), Rio de Janeiro.
- SILVA, M. L. T., 2009. **Geologia, petrografia e geocronologia do magmatismo de alto K da região de Vila Jussara, NE do município de água Azul do Norte - Província Mineral de Carajás**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Marabá.
- SILVA, M. L. T., D. C. OLIVEIRA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Geologia, petrografia e geocronologia do magmatismo de alto K da região de Vila Jussara, Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás. **Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SILVA JR., R. O., R. DALL'AGNOL & E. P. OLIVEIRA, 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozóicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. **Geochimica Brasiliensis** 13(2): 163-181.

- SMITHIES, R. H. & D. C. CHAMPION, 2000. The Archaean high-Mg diorite suite: links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for early Archaean crustal growth. **Journal of Petrology** 41(12): 1653-1671.
- SOUZA, S. D., D. C. OLIVEIRA, E. O. GABRIEL & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da porção a leste da cidade de Água Azul do Norte (PA) – Província Mineral de Carajás. **Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SOUZA, Z. S. & R. DALL'AGNOL, 1996. Caracterização geoquímica e tectônica de rochas metavulcânicas de "greenstone belts" arqueanos da região de Rio Maria, SE do Pará. **Boletim IG-USP, Publicação especial** 18: 97-101.
- SOUZA Z. S., A. POTREL, J. M. LAFON, F. J. ALTHOFF, M. M. PIMENTEL, R. DALL'AGNOL & C. G. OLIVEIRA, 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajas Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. **Precambrian Research** 109(3-4): 293-315.
- STERN, R. A., G. N. HANSON & S. B. SHIRLEY, 1989. Petrogenesis of mantle derived, LILE-enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in southwestern Superior Province. **Canadian Journal of Earth Sciences** 26(9): 1688-1712.
- STERN, R. A. & G. N. HANSON, 1991. Archean high-Mg granodiorite: a derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin. **Journal of Petrology** 32(1): 201-238.
- STRECKEISEN, A. L., 1976. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews** 12(1): 1-33.
- SYLVESTER, P. J., 1994. Archaean granite plutons. In: K. CONDIE (Ed.): **Archean crustal evolution**: 261-314. Elsevier, Amsterdam.
- TASSINARI, C. C. G. & M. J. B. MACAMBIRA, 2004. Evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: V. MANTESSO-NETO, A. BARTORELLI, C. D. R. CARNEIRO & B. B. BRITO NEVES (Orgs.): **Geologia do continente sul americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: 471-486. BECA, São Paulo.
- TEIXEIRA, M. F. B., R. DALL'AGNOL, A. C. SILVA & P. A. SANTOS, 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área a Norte de Sapucaia, Província Carajás, Pará: implicações petrogenéticas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 8(3): 291-323.
- VASQUEZ, M. L., L. R. ROSA-COSTA, C. G. SILVA, P. F. RICCI, J. O. BARBOSA, E. L. KLEIN, E. S. LOPES, E. B. MACAMBIRA, C. L. CHAVES, J. M. CARVALHO, J. G. OLIVEIRA, G. C. ANJOS & H. R. SILVA, 2008a. Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. In: M. L. VASQUES & L. T. ROSA-COSTA (Orgs.): **Escala 1:1.000.000**: 1-329. CPRM, Belém.
- VASQUEZ, M. L., M. J. B. MACAMBIRA & R. A. ARMSTRONG, 2008b. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic evolution. **Precambrian Research** 161(3-4): 279-302.
- VERNON, R. H., 2004. **A practical guide to rock microstructure**: 1-594. Cambridge University Press, Cambridge.

