



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 492

**GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE:
IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA A PROVÍNCIA
CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

MARCELA DA SILVA SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira (UFPA)

**BELÉM
2017**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Santos, Marcela da Silva, 1990-
Granitóides TTG de Água Azul do Norte: implicações
tectônicas para a Província Carajás / Marcela da Silva Santos. –
2017.

xii, 64 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Davis Carvalho de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia
e Geoquímica, Belém, 2017.

1. Geoquímica - Água Azul do Norte (PA). 2. Geologia
Estrutural - Água Azul do Norte (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 551.9098115



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

**GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE:
IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA A PROVÍNCIA
CARAJÁS**


DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
MARCELA DA SILVA SANTOS

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 15/12/2016

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira
(Orientador-UFPA)


Prof. Dr. Cândido Augusto Veloso Moura
(Membro-UFPA)


Prof. Dr. José de Arimatéia Costa de Almeida
(Membro-UNIFESSPA)

Aos meus pais, Marcelino dos Santos
& Maria Divina da Silva Santos

AGRADECIMENTOS

Registro meus sinceros agradecimentos à Deus pela graça alcançada de ter conseguido concluir esse trabalho;

À minha família, em especial aos meus pais que sempre me incentivaram e respeitaram as minhas decisões;

Ao meu orientador Professor Davis Carvalho de Oliveira pela oportunidade de realizar este trabalho e pelos ensinamentos transmitidos durante a minha vida acadêmica;

À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências, e em especial ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, pela infraestrutura disponibilizada, e aos professores, pelo conhecimento transmitidos;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

Aos projetos de pesquisa Vale-FAPESPA (Edital 001/2010 – ICAAF 053/2011) e INCT/Geociam (Processo nº 573733/2008-2) pelo apoio financeiro;

Ao Eleilson Gabriel pelos ensinamentos e sugestões que contribuíram para o enriquecimento do trabalho;

Aos meus colegas de trabalho que fizeram parte do grupo de mapeamento e ajudaram em trabalhos de laboratórios: Pablo Leite, Chrystophe Ronaib, Eleilson Gabriel, Luciano Ribeiro, Jean Machado e Rodrigo Santos.

RESUMO

As rochas que constituem a crosta TTG da área de Água Azul do Norte são predominantemente trondhjemiticas e mostram fortes afinidades geoquímicas com as demais ocorrências TTG do Domínio Carajás (trondhjemitos Rio Verde, Colorado e de Nova Canadá) e diferem daquelas do Domínio Rio Maria (tonalitos Caracol, Arco Verde, Mariazinha, trondhjemitos Mogno e Água Fria) por apresentarem termos mais evoluídos, conteúdos menos expressivos de minerais acessórios primários e serem essencialmente peraluminosas, com ausência de plagioclásio intensamente descalcificado. Apresentam médias e altas razões La/Yb e Sr/Y, e baixas de Nb/Ta, indicando que tais rochas foram formadas a partir da fusão parcial de metabasaltos, previamente transformados em granada-anfibolito, em condições de altas a intermediárias pressões (~1,0-1,5 GPa). Os megas *enclaves* tonalíticos identificados possuem características mineralógicas e geoquímicas particulares, que não permitem associá-los às típicas associações TTG. Exibem anfibólio modal em quantidades expressivas (> 5%), elevados conteúdos de Fe₂O₃, MgO, CaO, Ni e Cr, e ainda, um padrão ETR horizontalizado (baixos valores das razões La/Yb), o que reflete seu caráter menos evoluído quando comparados aos granitoides TTG. Os baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y indicam que estas rochas foram geradas fora do campo de estabilidade da granada, em condições de pressão inferiores àquelas dos granitoides TTG ($\leq 1,0$ GPa). Estes representariam magmas de comportamento transicional entre os típicos TTGs e rochas afins de sanukitoides. O caráter menos evoluídos dos *enclaves* em relação às rochas do Tonalito São Carlos, que até então representaria o fragmento mais antigos da crosta mesoarqueana no Domínio Carajás, juntamente com seu padrão estrutural caótico, sugerem que estes possam representar partes preservadas de uma crosta ainda mais antiga. Os dados estruturais sugerem que a crosta TTG registra pelo menos dois importantes momentos de deformação atuantes na área com eixos de encurtamento principal coincidentes (N10-20°E). O primeiro momento (D1 ~2,93 Ga) é evidenciado pelo bandamento composicional (E-W) gerado por um forte componente de cisalhamento puro durante a colocação dos granitoides TTG. A fase tardia de deformação dúctil (D2 ~2,87 Ga), dada sob condições de metamorfismo de fácies anfibolito médio (550°C), é marcada pela transposição de cisalhamento simples e puro das estruturas pretéritas, e que deram origem aos padrões de foliação NW-SE, N-S, NE-SW e E-W. Esse momento de deformação está diretamente ligado às intrusões tardias de leucogranitos sin a pós-tectônicos de idade mesoarqueana. A deformação transpressiva identificada na área sugere que as convergências de

placa foram atuantes durante o período de 2,93 e 2,87 Ga, sendo que durante a última fase da transpressão, o *strain* foi particionado, com a tensão total de cisalhamento simples acomodado em zonas e bandas de cisalhamento. Uma consequência disso seria a preservação de regiões de baixa deformação entre zonas de cisalhamento, controladas por cisalhamento puro. A existência de uma crosta TTG na região de Água Azul do Norte composicionalmente distinta daquela do Domínio Rio Maria, aliado a um complexo padrão deformacional que quase sempre está associado a processos de migmatização, sugerem que esta porção do Domínio Carajás não representa uma extensão do Domínio Rio Maria, e sim, um fragmento de crosta mesoarqueano independente sem registros da atuação de eventos neoarqueanos, o que também não estaria em conformidade com a definição atribuída ao Subdomínio Sapucaia.

Palavras-chave: TTG. Mesoarqueano. Deformação. Província Carajás. Água Azul do Norte.

ABSTRACT

The rocks that compose the TTG crust from the Água Azul do Norte area are dominantly trondhjemites and are strongly akin to others TTG occurrences in Carajás domain (Rio Verde and Colorado trondhjemites and related rocks from Nova Canadá area), differing from those of the Rio Maria domain (Caracol, Arco Verde, Mariazinha tonalities and Mogno, Água Fria trondhjemites) due the presence of more evolved terms, lower primary accessory minerals contents and for being essentially peraluminous, without strongly decalcified plagioclase. They exhibit moderate to high La/Yb and Sr/Y ratios, and low Nb/Ta ratio, which indicate that they were produced from partial melt of metamafic source, at high to intermediate pressure conditions (~1.0-1.5 GPa). The large tonalitic enclaves indentified have particular mineralogical and geochemical features that do not allow associating them with the typical TTG associations. They exhibit significant amphibole contents (>5%), high Fe₂O₃, MgO, CaO, Ni e Cr contents, and a flat RRE pattern (low La/Yb ratio), which reflect their less evolved character compared with TTG granitoids. The low La/Yb and Sr/Y ratios indicate that they were produced out the garnet stability field, in lower pressure conditions than TTG granitoids (≤ 1.0 GPa), and they could represent magmas with transitional behavior between typical TTG and sanukitoids. The less evolved character of the enclaves compared with the São Carlos tonalite, which represent the oldest fragment of Mesoarchean crust from Carajás domain, associated with their chaotic structural patterns, suggest that these enclaves can represent preserved parts of an even older crust. Structural data suggest that the TTG crust records at least two important deformational moments played in the area with coincident principal shortening axis (N10-20°E). The first moment (D1 ~2,93 Ga) is evidenced for the compositional banding (E-W) formed by a strong pure shear component during the TTG granitoids emplacement. The late phase of ductile deformation (D2 ~2,87 Ga), under medium amphibolite metamorphism facies conditions (550°C), is marked by the transposition of simple and pure shear of the ancient structures, which originated the NW-SE, N-S, NE-SW and E-W foliation patterns. This deformational moment is strongly linked to late intrusions of sin to post-tectonic Mesoarchean leucogranites. The transpressive strain identified in the area suggests that the plates convergence was active between 2.93 and 2.87 Ga, and during the last phase of transpression, the strain was partitioned with the total stress of simple shear being accommodated in shear zones and shear bandings. As consequence, there is the preservation of regions with low deformation among shear zones

controlled by pure shear. The existence of a TTG crust in Água Azul do Norte region compositionally distinct from Rio Maria domain, in addition to a complex deformational pattern that is usually associated with migmatization processes, suggest that this portion of Carajás domain does not represent an extension of the Rio Maria domain, but an independent Mesoarchean crust fragment without records of Neoproterozoic events, which would not be in compliance to the definition attributed to Sapucaia subdomain.

Keywords: TTG. Mesoarchean. Deformation. Carajas Province. Água Azul do Norte.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	2
Figura 2 - Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de estudo.....	5
Figura 3 - Mapa de pontos da área de Água Azul do Norte.....	11

CAPÍTULO II

Figura 1 - Mapas de localização do Cráton Amazônico e da Província Carajás.....	15
Figura 2 - Mapa geológico da área de Água Azul do Norte.....	18
Figura 3 - Aspectos de campo dos granitoides TTG.	19
Figura 4 - Aspectos de campo dos <i>enclaves</i>	20
Figura 5 - Mapa Estrutural da área de Água Azul do Norte.....	22
Figura 6 - Diagramas modais Q-A-P e Q-(A+P)-M' (Le Maitre, 2002).....	26
Figura 7 - Aspectos Microscópicos dos granitoides TTG.....	29
Figura 8 - Aspectos Microscópicos do <i>Enclaves</i>	30
Figura 9 - Diagramas de Harker para elementos maiores de amostras representativas dos granitoides TTG e <i>enclaves</i>	34
Figura 10 - Diagramas de Harker para os elementos traço das amostras representativas dos granitoides TTG e <i>enclaves</i>	35
Figura 11 - Padrões de ETR para as variedades petrográficas estudadas.....	36
Figura 12 - Diagramas de caracterização geoquímica dos granitoides TTG e <i>enclaves</i>	37
Figura 13 – Diagramas geoquímicos comparativos entre os granitoides TTG e <i>enclaves</i> estudados com granitoides arqueanos de outras regiões.	39
Figura 14 - Diagramas de variação para comparação das associações arqueanas de outros crátons com dos granitoides TTG e <i>enclaves</i> estudados, além do Tonalito São Carlos.....	41

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xi
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	9
1.4.1. Pesquisa bibliográfica	9
1.4.2. Mapeamento geológico e geologia estrutural	9
1.4.3. Petrografia e análise microestrutural	9
1.4.4. Geoquímica	10
CAPÍTULO II	12
GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE: IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA A PROVÍNCIA CARAJÁS	12
RESUMO	12
ABSTRACT	13
INTRODUÇÃO	14
CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	16
GEOLOGIA DOS GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE	17
ASPECTOS GERAIS	17
FEIÇÕES ESTRUTURAIS	20
PETROGRAFIA	23
COMPOSIÇÕES MODAIS E CLASSIFICAÇÃO	23
ASPECTOS TEXTURAIS E DEFORMACIONAIS	23

GEOQUÍMICA	31
ELEMENTOS MAIORES E MENORES.....	31
ELEMENTOS-TRAÇO	31
ELEMENTOS TERRAS RARAS.....	35
CARACTERIZAÇÃO DA SÉRIE MAGMÁTICA.....	36
DISCUSSÃO	38
COMPARAÇÕES COM OUTRAS OCORRÊNCIAS TTG E DEFINIÇÃO DA NATUREZA DE FORMAÇÃO	38
PADRÃO ESTRUTURAL E CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO DOS GRANITOIDES DE ÁGUA AZUL DO NORTE.....	42
MODELO DE DEFORMAÇÃO PARA A ÁREA DE ÁGUA AZUL DO NORTE.....	43
CONCLUSÕES	44
AGRADECIMENTOS	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO III	53
2 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS	56

CAPITULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A área de estudo, localizada na região de Água Azul do Norte, sudeste do Estado do Pará (Figura 1), está inserida no contexto geológico da Província Carajás, porção sul do Domínio Carajás, próximo ao limite com o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (Figura 2). Os primeiros trabalhos desenvolvidos nessa região permitiram a individualização das rochas do Complexo Xingu, granitos da Suíte Plaquê, além de ocorrências de *greenstone belts* do Grupo Sapucaia (DOCEGEO 1988, Araújo *et al.* 1988, Araújo & Maia 1991). Posteriormente, com o avanço dos estudos geológicos revelaram que Complexo Xingu, unidade litológica de maior extensão na área, é constituído por diversos tipos de granitoides com idades distintas e afetados por diferentes eventos deformacionais, tais como: associações tonalíticas-trondhjemíticas de afinidade TTG; granitoides de alto-Mg (sanukitoides denominados de Granodioritos Água Azul e Água Limpa); corpos de leucogranodirito-granitos de alto Ba-Sr e pequenas ocorrências de Leucogranitos potássicos; além de diques anfibolíticos e lentes expressivas de actinolita-xistos afins da sequência *greenstone belt* do Grupo Sapucaia (Gabriel & Oliveira 2014, Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016, Sousa *et al.* 2014, Souza 2016).

Apesar do avanço do conhecimento sobre a geologia da área de Água Azul do Norte, ainda não se tem um conhecimento detalhado sobre a crosta TTG que aflora na mesma, uma vez que nos trabalhos ali realizados, tal variedade foi alvo apenas de estudos petrográficos e geoquímicos preliminares, impossibilitando que se conhecesse a extensão da área aflorante desta crosta, e sobretudo, os principais aspectos evolutivos e suas afinidades petrológicas. Além disso, e a indefinição do posicionamento estratigráfico dessas rochas, aliado à falta de estudos comparativos com rochas pertencentes a outras séries TTG dos demais domínios da Província Carajás, impossibilita que se discuta um modelo de evolução para esta porção da província. Além disso, a ausência de dados estruturais e análise microtectônica, inviabiliza o conhecimento da história deformacional registrada na área. As ocorrências de megas *enclaves* tonalíticos com anfibólio modal fortemente deformados encontrados inclusos em granitoides TTG, que até então não haviam sido mapeados, também evidenciam a necessidade de uma melhor caracterização das rochas mapeadas e estudos geológicos mais detalhados.

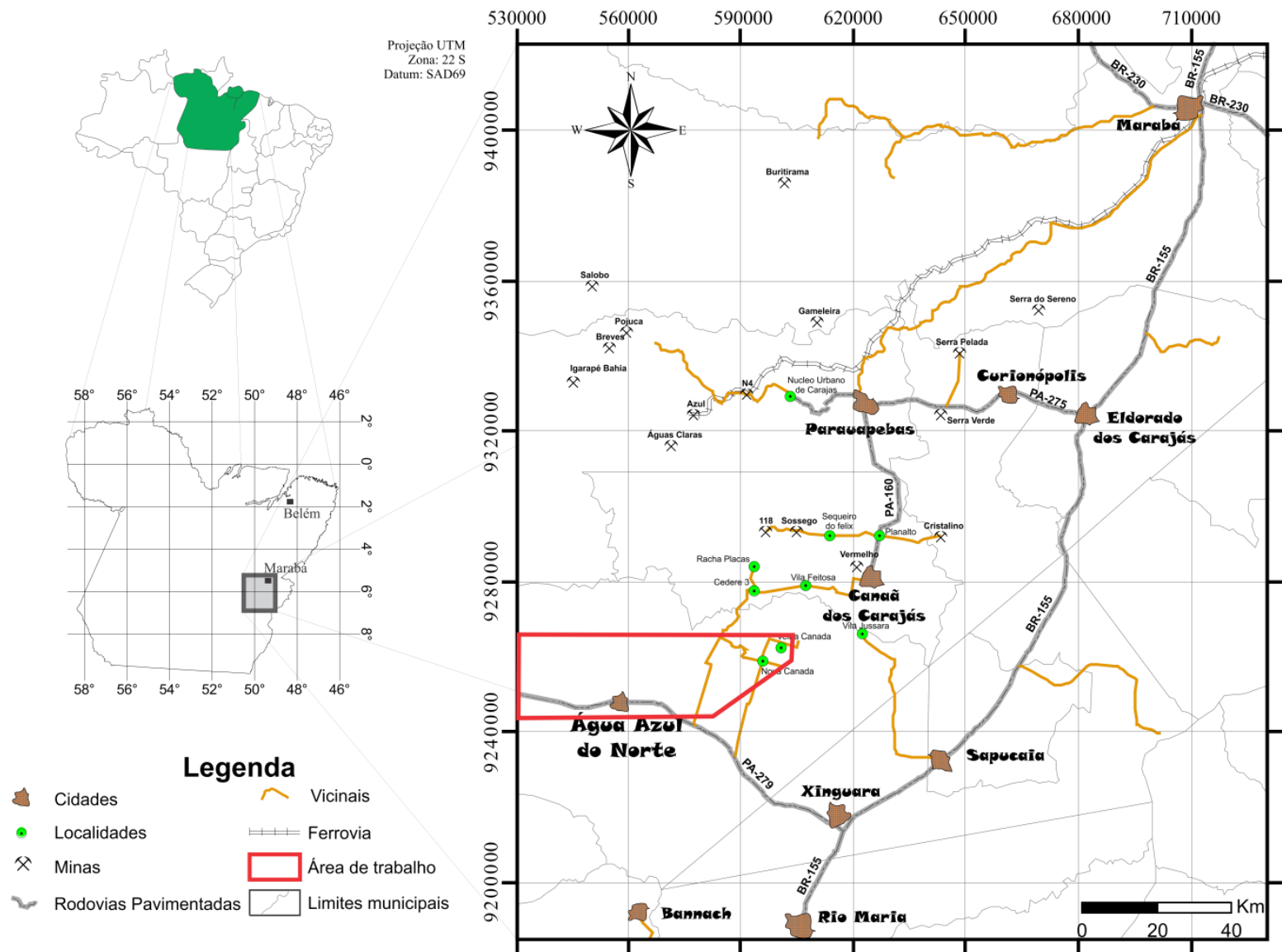


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

A evolução do conhecimento sobre a geologia e a natureza dos granitoides arqueanos da área de Água Azul do Norte, permitirá um avanço considerável para a compreensão dos processos que levaram à formação e estabilização da crosta arqueana dessa região, e poderá auxiliar no melhor entendimento sobre o limite entre os domínios tectônicos sugeridos para a Província Carajás. Afim de descobrir se esta área representa um prolongamento dos Subdomínios Sapucaia ou Canaã dos Carajás, ou se seria um fragmento independente.

Com base no exposto acima, este trabalho visa a partir da integração de dados de campo, petrográficos, estruturais e geoquímicos, aprimorar a caracterização geológica das associações tonalítica-trondhjemíticas de Água Azul do Norte, permitindo dessa forma, a identificação de suas diferentes variedades litológicas, distribuição espacial, relações de contato, bem como definir suas principais feições texturais, assinaturas geoquímicas, idades de cristalização e avaliação de possíveis efeitos de metamorfismo e natureza de deformação que possam ter afetado estas rochas. Para atingir tais objetivos, torna-se ainda necessário, a integração das informações obtidas neste trabalho com aquelas geradas pelo desenvolvimento das Teses de Doutorado de Eleilson Oliveira Gabriel e Pablo José Leite dos Santos. Ambos fazem parte do GPPG / PPGG e estão vinculados às metas e objetivos propostos pelos convênios VALE-FAPESPA (Edital 01/2010 - ICAFF 053/2011), CNPq Universal (Proc. 485806/2013-4) e INCT / GEOCIAM (Proc. 573733 / 2008-2).

Esta dissertação foi estruturada na forma de artigo científico, onde a mesma é constituída de um capítulo introdutório (Capítulo 1) que aborda o contexto geológico regional, objetivos e materiais e métodos utilizados durante a pesquisa. Os principais resultados são apresentados e discutidos na forma de um manuscrito científico (Capítulos 2), que aborda a forma de ocorrência e a caracterização petrográfica, estrutural, geoquímica e deformacional das associações tonalítica-trondhjemítica da área de Água Azul do Norte, intitulado "GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE: IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA A PROVÍNCIA CARAJÁS". O qual deverá ser submetido para publicação na Série Científica Geologia USP. No terceiro e último capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais desta dissertação.

1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Figura 2A), considerada como uma província geocronológica independente por Santos (2003), ou fazendo parte do contexto geológico da Província Amazônia Central de Tassinari & Macambira (2004). Os primeiros trabalhos desenvolvidos nessa região permitiram a individualização das rochas do Complexo Xingu que incluía corpos gnáissicos migmatíticos, granulitos e granitoides diversos, além de rochas supracrustais (Silva *et al.* 1974). No entanto, os ortognaisses mesoarqueanos da porção norte da Província Carajás continuam inseridos neste complexo, onde ainda representa a principal unidade litoestratigráfica. A partir da individualização do Complexo Xingu, várias propostas de compartimentação tectônica foram sugeridas para a Província Carajás (Costa *et al.* 1995; Souza *et al.* 1996; Althoff *et al.* 2000, Santos 2003, Dall’Agnol *et al.* 2013). Originalmente foi subdividida em dois domínios tectônicos distintos, o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM), a sul, e o Bloco Carajás, a norte (Souza *et al.* 1996). Posteriormente, Santos (2003) apresentou as designações de domínios Rio Maria e Carajás (formalizado por Vasquez *et al.* 2008, em revisão à geologia do Estado do Pará) (Figura 2b).

O Bloco ou Domínio Carajás (DC) é constituído na sua porção norte pela Bacia Carajás (BC), sendo sua porção sul denominada informalmente de Domínio de Transição, interpretado como uma possível extensão do TGGRM, afetado pelos eventos neoarqueanos que configuraram a Bacia Carajás (Dall’Agnol *et al.* 2006).

O Domínio Rio Maria (DRM) de idade mesoarqueana (3,0–2,87 Ga) é formado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas de 3,0 e 2,9 Ga (Macambira & Lancelot 1991, Pimentel & Machado 1994, Avelar 1996, Lafon *et al.* 2000 Souza *et al.* 2001, Rolando & Macambira 2003,), e do Grupo Tucumã (Araújo & Maia 1991); granitoides do tipo TTG de 2,96–2,93 Ga, representados pelo Tonalito Arco Verde, Trondhjemitó Mogno, Tonalito Mariazinha (Macambira & Lafon 1995, Rolando & Macambira 2003, Guimarães *et al.* 2010, Almeida *et al.* 2008, 2011, Ronaib & Oliveira 2013) e biotita trondhjemitos indiferenciados; granitoides de alto Mg de 2,88 e 2,87 Ga, representados pela suíte sanukitoide de Rio Maria e rochas correlacionadas (Oliveira *et al.* 2009, 2011, Santos *et al.* 2013a, Santos & Oliveira 2016); leucogranodiorito-granitoides de alto Ba-Sr, representados pela Suíte Garantã e corpos análogos de

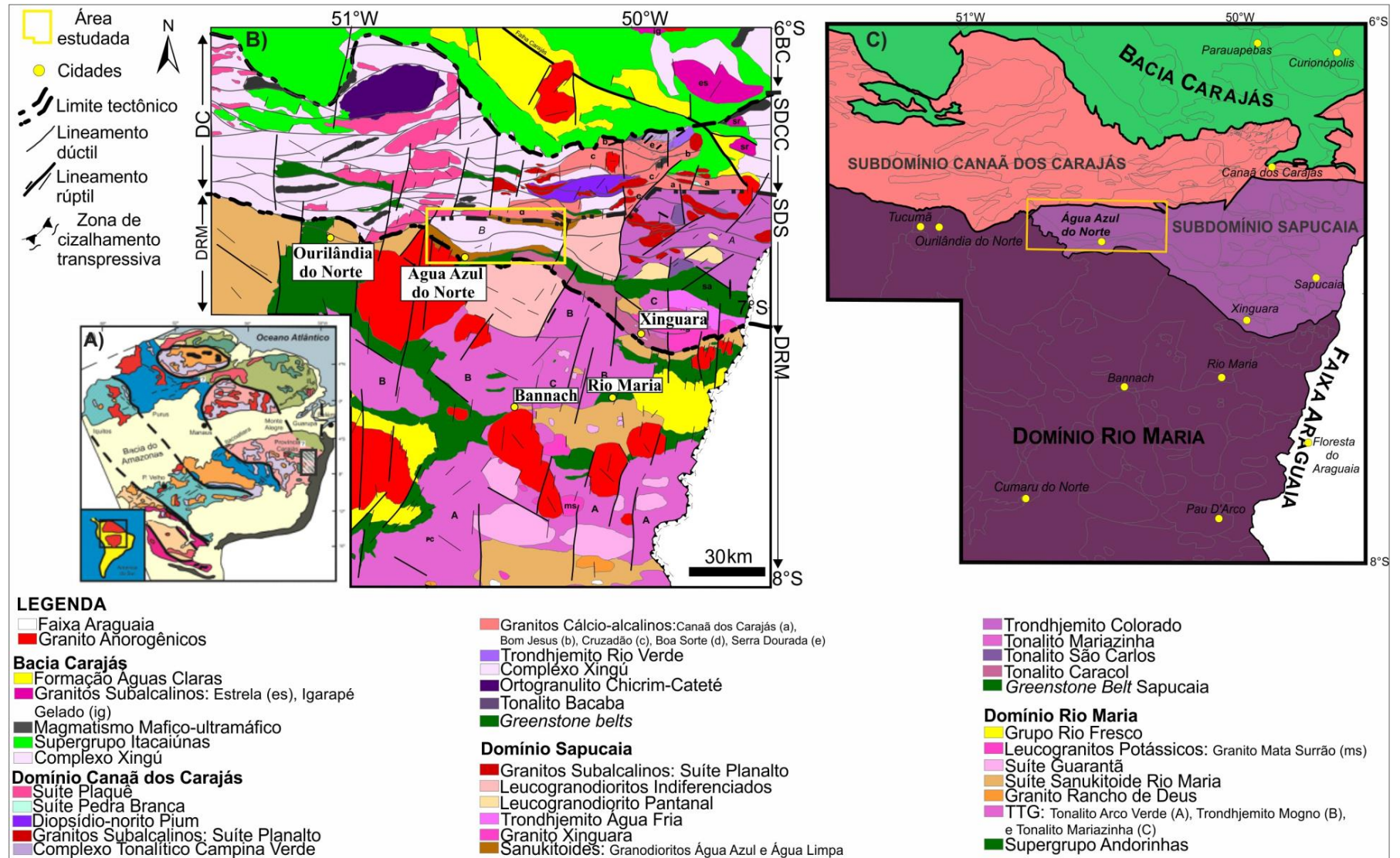


Figura 2 - A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico, modificado de Tassinari & Macambira (2004); B) Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de estudo (modificado de Almeida *et al.* 2011 e Feio *et al.* 2012); e C) Compartimentação tectônica da Província Carajás proposta por Dall'Agnol *et al.* (2013). Legendas: BC = Bacia Carajás; DC = Domínio Carajás; DRM = Domínio Rio Maria; SDCC = Subdomínio Canaã dos Carajás; SDS = Subdomínio Sapucaia.

2,87-2,86 Ga (Althoff *et al.* 2000, Almeida *et al.* 2010, 2013, Santos *et al.* 2013a); e leucogranitos alto-K, caracterizados pelos granitos Mata Surrão e similares de 2,86 Ga (Leite *et al.* 2004). Tais unidades são recobertas por rochas sedimentares arqueanas do Grupo Rio Fresco (Araújo *et al.* 1988), e intrudidas pelos granitos tipo-A de 1,88 Ga da Suíte Jamon (Dall’Agnol *et al.* 2005, Dall’Agnol & Oliveira 2007) e pelos diques félsicos e máficos (Rivalenti *et al.* 1998, Silva *et al.* 2016).

A porção sul do DC, foi subdividida em dois subdomínios (Figura 2c) por Dall’Agnol *et al.* (2013): O **Subdomínio Sapucaia (SDS)**, ao sul, que é formado pelas associações *greenstone belts*, granitoides diversos e diques de anfíbolitos e diabásio. Os *greenstone belts* são representados pelo Grupo Sapucaia (DOCEGEO 1988, Costa *et al.* 1994), que segundo Sousa *et al.* (2014) são rochas metaultramáficas afins de komatiitos empobrecidos em alumínio, semelhantes aos basaltos de ilhas oceânicas (OIB) transicionais para MORB gerados durante o Mesoarqueano. As unidades granitoides incluem: (a) Granitoides sódicos distintos dos clássicos TTG e sanukitoides arqueanos, representados pelo Tonalito São Carlos de 2,93 Ga (Silva *et al.* 2014); (b) Associações TTG representadas pelo Tonalito Caracol de 2,93 Ga (Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011, Ronaib & Oliveira 2013), Trondhjemitó Colorado de 2,87 Ga (Silva *et al.* 2014) e rochas afins (Santos *et al.* 2013b, Leite-Santos & Oliveira 2014), e pelo Trondhjemitó Água Fria de 2,86 Ga (Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011), que representa a unidade TTG mais jovem desse domínio; (c) granitoides de alto-Mg que são caracterizados pelos corpos de afinidade sanukitoide Água Azul e Água Limpa de 2,87 Ga (Gabriel & Oliveira 2014), (d) leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr representados pelo Leucogranodiorito Nova Canadá de 2,87 Ga (Leite-Santos & Oliveira 2016), Leucogranodiorito Pantanal (Teixeira *et al.* 2013) e indiferenciados (Ronaib & Oliveira 2013, Santos *et al.* 2013a); (e) granitos de alto-K de afinidade cálcio-alcalina ocorrem de forma restrita no SDS e são representados pelo Granito Xinguara de 2,86 Ga (Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2013) e Leucogranito Velha Canadá de 2,74 Ga (Leite-Santos & Oliveira 2015); (f) granitoides subalcalinos sintectônicos afins daqueles da Suíte Planalto que foram descritos na região de Vila Jussara (Silva *et al.* 2014). Os diques de anfíbolito e diabásio encontrados na região de Água Azul do Norte ocorrem seccionando os granitoides da associação TTG, assim como as rochas do *greenstone* Sapucaia (Marangoanha & Oliveira 2014, Souza 2016).

O **Subdomínio Canaã dos Carajás (SDCC)**, localizado entre a BC e o SDS, é caracterizado pela ampla dominância de granitos *stricto sensu* em relação aos TTG, os quais são representados pelas seguintes unidades: (a) granitoides sódicos distintos dos TTG arqueanos, representados pelos hornblenda-biotita tonalitos do Tonalito Bacaba de 3,0 Ga (Moreto *et al.* 2011) e Complexo Tonalítico Campina Verde de 2,87-2,85 Ga (Feio *et al.* 2013); (b) Associação TTG, representada pelo Trondhjemitó Rio Verde, datado em 2,92 Ga e 2,86 Ga (Feio *et al.* 2013); (c) Leucogranitos cálcio-alcálicos à transicionais, representados pelos granitos Canaã dos Carajás de idade 2,96 Ga (Feio *et al.* 2013), Cruzadão de 2,84 Ga (Feio *et al.* 2013), Boa Sorte de 2,85-2,89 Ga (Rodrigues *et al.* 2014), Bom Jesus de 2,83 Ga (Feio *et al.* 2013) e Serra Dourada de 2,86 Ga e 2,83 Ga (Moreto *et al.* 2011, Feio *et al.* 2013); e (d) granitoides neoarqueanos representados pelas Suítes Planalto 2,74 e 2,71 Ga (Huhn *et al.* 1999, Gomes 2003, Sardinha *et al.* 2004, Oliveira *et al.* 2010, Feio *et al.* 2012) e Pedra Branca 2,76 Ga e 2,75 Ga (Sardinha *et al.* 2004, Feio *et al.* 2013), além de rochas charnoquíticas associadas de 2,75 Ga e 2,73 Ga (Gabriel *et al.* 2010, Feio *et al.* 2013).

A porção norte do DC, a BC, é formada principalmente por unidades supracrustais neoarqueanas do Supergrupo Itacaiúnas (2,76 Ga; Machado *et al.* 1991), seccionadas por granitos subalcalinos sintectônicos representados pelo Complexo Granítico Estrela de 2,76 Ga (Barros *et al.* 2001, 2009), e os granitos Serra do Rabo de 2,74 Ga (Sardinha 2002, Barros *et al.* 2009), Igarapé Gelado de 2,73 Ga (Barbosa 2004, Barros *et al.* 2009); e o *Old Salobo* de 2,57 Ga (Lindenmayer 1990, Machado *et al.* 1991) e magmatismo máfico-ultramáfico representados pelo Complexo Intrusivo Luanga de idade 2,76 Ga (Jorge João *et al.* 1982, Medeiros Filho & Meireles 1985, Machado *et al.* 1991), e o Gabro Santa Inês (Meireles *et al.* 1984, DOCEGEO 1988), recobertos por rochas sedimentares da Formação Águas Claras e Gorotire (Nogueira *et al.* 1995, Lima & Pinheiro 2001). O magmatismo granítico anorogênico de idade paleoproterozoica (1,88 Ga) é representado pela Suíte Serra dos Carajás (Dall'Agnol & Oliveira 2007, Santos *et al.* 2013c).

1.3 OBJETIVOS

Levando-se em consideração o estágio atual do conhecimento das rochas que afloram na região de Água Azul do Norte, este trabalho visa contribuir para a definição da natureza e dos processos de formação da crosta TTG nesta porção da Província Carajás. Preende-se dessa forma,

contribuir para o avanço do conhecimento sobre a evolução magmática e tectônica da referida província e auxiliar na compreensão de seus limites tectônicos, em especial daqueles estabelecidos entre o Subdomínio Sapucaia com os demais terrenos. Para tanto deverão ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- i. individualizar e caracterizar geologicamente a crosta TTG de Água Azul do Norte, definindo a sua distribuição espacial, suas relações de contato e seus principais aspectos composicionais e texturais (ígneos ou metamórficos);
- ii. Descrever e interpretar as principais estruturas identificadas nos diversos granitoides da área de Água Azul do Norte, com intuito de esclarecer a evolução estrutural e a história deformacional nessa porção do Domínio Carajás;
- iii. Realizar análises texturais através de estudos petrográficos e microestruturais, com o intuito de aprimorar a classificação dos litotipos com base em dados de composições modais e discutir as feições deformacionais estabelecendo a natureza e temperaturas de deformação desses granitoides;
- iv. Caracterizar as séries magmáticas, ambiente de formação e discutir os processos que controlaram a gênese e a evolução magmática desses granitoides;
- v. Comparar as litologias identificadas neste trabalho com aquelas já estudadas em outras regiões da Província Carajás e em outros terrenos arqueanos, contribuindo para uma melhor compreensão das afinidades petrológicas e formação desses granitoides;
- vi. Propor um modelo deformacional para área, a partir de dados estruturais e com apoio de dados geocronológicos que foram obtidos durante o desenvolvimento das teses de Eleilson Oliveira Gabriel e Pablo José Leite dos Santos;
- vii. Auxiliar no entendimento da evolução geológica da porção sul do Domínio Carajás, e discutir a atual proposta de compartimentação tectônica deste domínio na região de Água Azul do Norte;
- viii. Elaborar um mapa geológico, em ambiente SIG, na escala 1:50.000 das principais unidades estratigráficas individualizadas na região de Água Azul do Norte e integrar com mapas geológicos de áreas adjacentes.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1. **Pesquisa bibliográfica**

Foi realizado um levantamento bibliográfico referente à geologia da região de estudo, atualizado à medida que novos dados foram publicados. Além disso, foram analisados artigos e livros sobre temas relacionados à geologia e evolução de terrenos arqueanos, com ênfase em petrografia, geoquímica, geologia estrutural, microtectônica, metamorfismo, e evolução crustal.

1.4.2. **Mapeamento geológico e geologia estrutural**

Primeiramente foram tratados os dados geológicos, estruturais, petrográficos, geoquímicos e geocronológicos já existentes na área. Para novas etapas de campo foi realizado um exame digital de imagens de satélite (Landsat 7 e TM), mosaicos de radar (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) e de cartas aerogamaespectométricas (canal do Th) nas escalas disponíveis, para compor a base cartográfica geológica da área usando os *softwares* Global Mapper 11 e ArcGIS 10.0 para processamento das imagens. A primeira etapa de campo foi realizada na escala 1:50.000, seguido de coleta sistemática de amostras para estudos petrográficos, geoquímicos (Figura 3), além de medidas estruturais, dando ênfase à descrição das feições estruturais planares e lineares dúcteis, buscando ainda indentificar indicadores cinemáticos. Em uma segunda etapa de campo foram realizadas coletas de dados estruturais na escala mesoscópica em afloramentos específicos. Nestes, onde a complexidade das estruturas exigia detalhamento de coleta de dados, utilizou-se técnicas de elaboração de painéis em malhas em quadros orientados com dimensões de 1m x 1m, dando ênfase nas relações de contato, no estudo de zonas de cisalhamento e outras feições estruturais relevantes. Nas etapas de campo foram descritos 152 pontos, com a utilização de bússolas e GPS com precisão de aproximadamente 3m.

1.4.3. **Petrografia e análise microestrutural**

Consistiu no exame macroscópico das amostras coletadas, seguido de estudo em microscópio petrográfico de 70 lâminas delgadas, confeccionadas no laboratório de laminação do Instituto de Geociências da UFPA – Belém, para realizar a identificação dos minerais e descrição sistemática de suas texturas magmáticas e deformacionais (Blenkinsop 2000, Fossen 2012, Hibbard 1995, Mackenzie *et al.* 1982, Passchier & Trouw 2005, Paterson *et al.* 1989, Trouw *et al.* 2010, Vernon 2000). As composições modais (Chayes 1956, Hutchison 1974) foram obtidas com contador automático de pontos do *software* Hardledge (versão *Worskstation* 1.3.6.1111 do

fabricante ENDEEPER), com a contagem de 2.000 pontos por amostra, distribuído numa malha de 0,4 mm de espaçamento, posteriormente, foram classificadas nos diagramas Q-A-P e Q-A+P-M (Streckeisen 1976; Le Maitre 2002), conforme estabelecido pela IUGS (*International Union of Geological Sciences*).

1.4.4. Geoquímica

Foram realizadas 43 análises químicas em rocha total nas amostras representativas dos granitoides estudados, sendo 34 amostras dos granitoides TTG e 09 dos *enclaves*, as quais foram trituradas, pulverizadas, homogeneizadas e quarteadas no Laboratório de Preparação de Amostras (OPA), pertencente ao Instituto de Geociências da UFPA – Belém. Estas análises químicas foram realizadas pela ACME *Analytical Laboratories* Ltda. (Vancouver, Canadá), para quantificar os conteúdos de elementos maiores e menores, analisados por ICP-ES, os elementos-traço e terras raras, por ICP-MS. Para transformação de óxidos em cátions e valores correspondentes de Fe₂O₃ em FeO, utilizou-se os fatores de conversão gravimétrica compilados por Stevens *et al.* (1960). A caracterização geoquímica foi feita com base nos procedimentos indicados em Ragland (1989) e Rollinson (1993), e a avaliação do comportamento dos elementos maiores, menores e traço por meio de diagramas de variação clássicos, bem como outros propostos na literatura (Shand 1950, Harker 1965, O'Connor 1965, Debon & Le Fort 1983, Irvine & Baragar 1971, Barker & Arth 1976, Moyen *et al.* 2003, Peccerillo & Taylor 1976) a fim de melhor caracterizar as unidades diferenciadas, identificando suas composições químicas, séries magmáticas e os processos que controlaram sua evolução magmática.

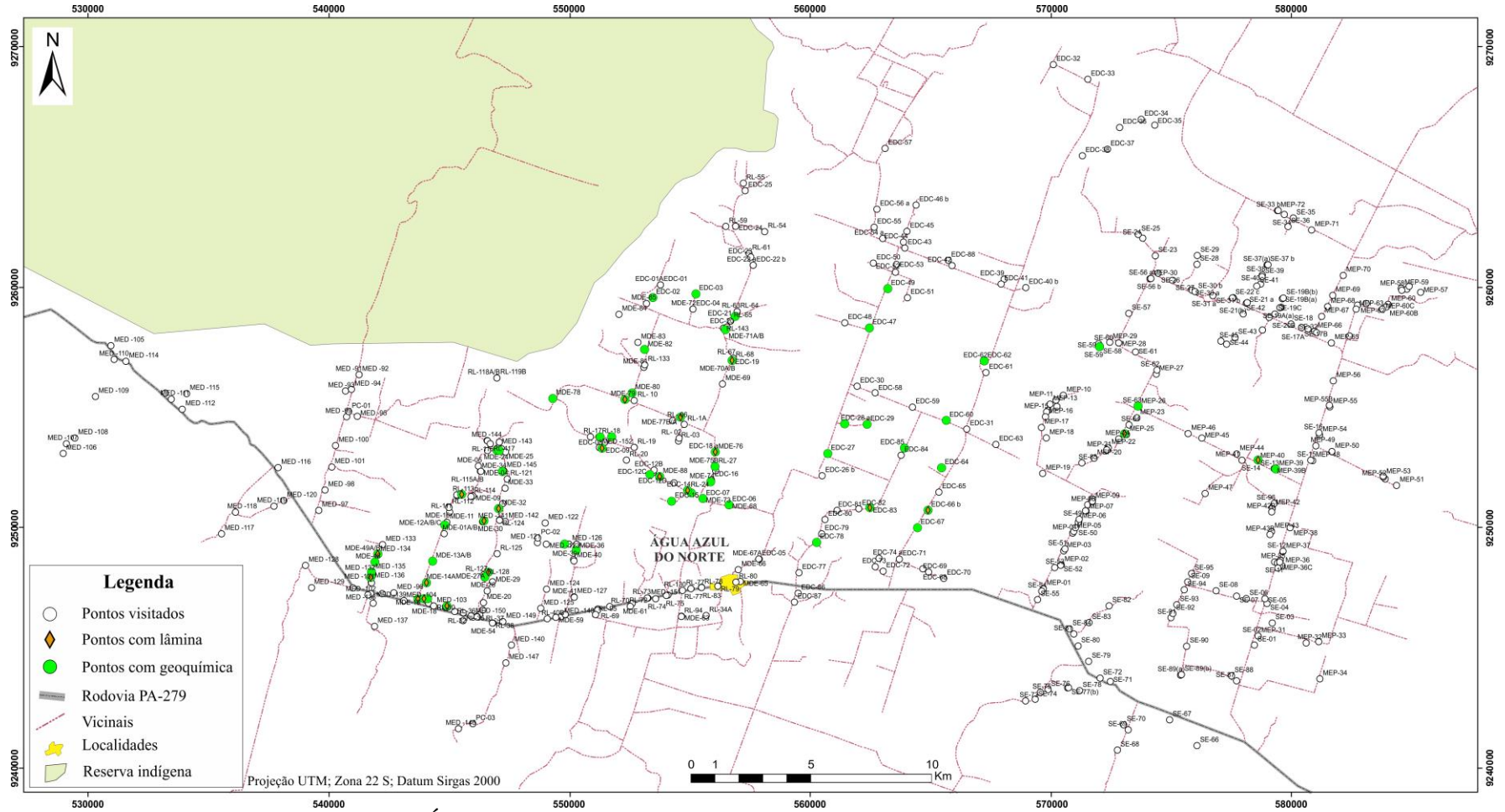


Figura 3 - Mapa de pontos da área de Água Azul do Norte.

CAPITULO II

GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE: IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA A PROVÍNCIA CARAJÁS.

Marcela da Silva Santos^{1,2} (mssantosgeo@gmail.com), Davis Carvalho de Oliveira^{1,2} (davis@ufpa.br), Eleilson Oliveira Gabriel^{1,2} (eleilson@ufpa.br)

¹Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) - Instituto de Geociências (IG) – Universidade Federal do Pará (UFPA). Caixa Postal 8608, CEP-66075-900, Belém, Pará.

²Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) – IG – UFPA

RESUMO

As rochas que constituem a crosta TTG de Água Azul do Norte são predominantemente trondhjemíticas e mostram fortes afinidades com as ocorrências TTG do Domínio Carajás e diferem daquelas do Domínio Rio Maria por apresentarem termos mais evoluídos, conteúdos menos expressivos de minerais acessórios primários, ausência de plagioclásio intensamente descalcificado e serem essencialmente peraluminosas. Apresentam médias e altas razões La/Yb e Sr/Y, e baixas de Nb/Ta, indicando que foram formadas a partir da fusão parcial de granada-anfibolito, em condições de altas a intermediárias pressões (~1,0-1,5 GPa). Os megas *enclaves* indetificados possuem características mineralógicas e geoquímicas particulares, que não permitem associá-los às típicas associações TTG. O padrão ETR horizontalizado (baixas razões La/Yb) sugere que estas rochas foram geradas fora do campo de estabilidade da granada, sob pressões inferiores àquelas dos granitoides TTG ($\leq 1,0$ GPa). Estes representariam magmas de comportamento transicional entre os típicos TTGs e rochas afins de sanukitoides. O caráter menos evoluídos dos *enclaves* em relação às rochas do Tonalito São Carlos, que até então representaria o fragmento mais antigos da crosta mesoarqueana no Domínio Carajás, juntamente com seu padrão estrutural caótico, sugere que estes possam representar partes preservadas de uma crosta ainda mais antiga. A crosta TTG registra pelo menos dois importantes momentos de deformação atuantes na área com eixos de encurtamento principal coincidentes (N10-20°E). O primeiro momento (D1 ~2,93 Ga) é evidenciado pelo bandamento composicional (E-W) gerado por um forte componente de cisalhamento puro durante a colocação dos granitoides TTG. A fase tardia de deformação dúctil (D2 ~2,87 Ga), dada sob condições de metamorfismo de fácies anfibolito médio (550°C), é marcada pela transposição de cisalhamento simples e puro das estruturas pretéritas, e que deram origem aos padrões de foliação NW-SE, N-S, NE-SW e E-W. Esse momento de deformação está diretamente ligado às intrusões tardias de leucogranitos sin a pós-tectônicos. A deformação transpressiva identificada na área sugere que as convergências de placas foram atuantes durante o período de 2,93 e 2,87 Ga, sendo que durante a última fase da transpressão, o *strain* foi particionado, com a tensão total de cisalhamento simples acomodado em zonas e bandas de cisalhamento. Uma consequência disso seria a preservação de regiões de baixa deformação entre zonas de cisalhamento, controladas por cisalhamento puro. A existência de uma crosta TTG na área de Água Azul do Norte distinta daquela do Domínio Rio Maria, aliado a um complexo padrão deformacional que quase sempre está associado a processos de migmatização, sugerem que a mesma não representa uma extensão daquele domínio, e sim, um fragmento mesoarqueano independente sem registros da atuação de eventos neoarqueanos, o que também não estaria em conformidade com a definição atribuída ao Subdomínio Sapucaia.

Palavras-chave: TTG; Mesoarqueano; Deformação; Provincia Carajás; Água Azul do Norte (PA).

ABSTRACT

The rocks that compose the TTG crust from the Água Azul do Norte are dominantly trondhjemites and are strongly akin to others TTG occurrences in Carajás domain and differing from those of the Rio Maria domain due the presence of evolved terms, lower primary accessory minerals contents and for being essentially peraluminous. They exhibit moderate to high La/Yb and Sr/Y ratios, and low Nb/Ta ratio, which indicate that they were produced from partial melt of metamafic source, at high to intermediate pressure conditions (~1.0-1.5 GPa), but still in the garnet stability field. The large tonalitic enclaves indentified have particular mineralogical and geochemical features that do not allow associating them with the typical TTG associations. The flat RRE pattern (low La/Yb ratio) indicate that they were produced out the garnet stability field, in lower pressure conditions than TTG granitoids (≤ 1.0 GPa), and they could represent magmas with transitional behavior between typical TTG and sanukitoids. The less-evolved character of the enclaves regarding that of the São Carlos tonalite, which represent the oldest fragment of Mesoarchean crust from Carajás domain, associated with their chaotic structural patterns, suggest that these enclaves can represent preserved parts of an even older crust. The TTG crust records at least two important deformational moments played in the area with coincident principal shortening axis (N10-20°E). The first moment (D1 ~2,93 Ga) is evidenced for the compositional banding (E-W) formed by a strong pure shear component during the TTG granitoids emplacement. The late phase of ductile deformation (D2 ~2,87 Ga), under medium amphibolite metamorphism facies conditions (550°C), is marked by the transposition of simple and pure shear of the ancient structures, which originated the NW-SE, N-S, NE-SW and E-W foliation patterns. This deformational moment is strongly linked to late intrusions of sin to post-tectonic Mesoarchean leucogranites. The transpressive strain identified in the area suggests that the plates convergence was active between 2.93 and 2.87 Ga, and during the last phase of transpression, the strain was partitioned with the total stress of simple shear being accommodated in shear zones and shear bandings. As consequence, there is the preservation of regions with low deformation among shear zones controlled by pure shear. The existence of a TTG crust in Água Azul do Norte region compositionally distinct from Rio Maria domain, in addition to a complex deformational pattern that is usually associated with migmatization processes, suggest that this portion of Carajás domain does not represent an extension of the Rio Maria domain, but an independent Mesoarchean crust fragment without records of Neoproterozoic events, which would not be in compliance to the definition attributed to Sapucaia subdomain.

Keywords: TTG; Mesoarchean; Deformation; Carajas Pronvice; Água Azul do Norte (PA).

INTRODUÇÃO

A Província Carajás, considerada como o principal núcleo arqueano do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981), é apontada como uma província geocronológica independente por Santos (2003), ou fazendo parte do contexto geológico da Província Amazônia Central de Tassinari & Macambira (2004) (Figura 1a). Em função de seu enorme potencial metalogenético, esta tem sido alvo de diversos estudos geológicos ao longo das últimas décadas, resultando na individualização de diversos granitoides com composições e idades distintas, anteriormente considerado como Complexo Xingu (Silva *et al.* 1974), e que resultaram em propostas de compartimentação da referida província em segmentos crustais tectonicamente distintos (Costa *et al.* 1995; Souza *et al.* 1996; Althoff *et al.* 2000, Dall’Agnol *et al.* 2006). Vasquez *et al.* (2008), em revisão à geologia do Estado do Pará seguindo a proposta de Santos (2003), dividiram esta província em dois domínios tectônicos distintos (Figura 1b): (i) **Domínio Rio Maria** de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga) formado por sequências *greenstone belts* (3,0 e 2,9 Ga), granitoides das associações tonalítica-trondhjémítica-granodiorítica (TTG; 2,93 - 2,96 Ga), sanukitoides (2,87 Ga), leucogranitos de alto Ba-Sr e alto K (2,86 - 2,87 Ga) – (Pimentel & Machado 1994, Avelar 1996, Souza *et al.* 2001, Dall’Agnol *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2009, 2011; Almeida *et al.* 2010, 2011, 2013; Ronaib & Oliveira 2013; Santos & Oliveira 2016); e (ii) **Domínio Carajás**, formado por rochas meso- e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga) geologicamente menos conhecido, e que ainda contempla uma extensa área formada por rochas indiferenciadas do Complexo Xingu.

Mais recentemente, trabalhos desenvolvidos por pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides da UFPA mostraram que o Domínio Carajás não corresponderia a uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, surgindo à adoção das denominações **Subdomínio Canaã dos Carajás** (SDCC) e **Subdomínio Sapucaia** (SDS) para as porções norte e sul deste domínio, respectivamente (Dall’Agnol *et al.* 2013) (Figura 1c). Esses subdomínios são limitados por grandes descontinuidades regionais de direção E-W e apresentam significativas diferenças em sua evolução geológica, reconhecidas a partir das associações litológicas presentes nesses blocos. O SDCC é caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* e associações charnoquíticas neoarqueanas, com raras ocorrências de TTG e granitos anorogênicos (Feio *et al.* 2012, 2013; Dall’Agnol *et al.* 2013; Rodrigues *et al.* 2014; Cunha *et al.* 2016), enquanto que o SDS é formado por granitoides do tipo TTG, sanukitoides e leucogranitos diversos, análogos àqueles identificados no Domínio Rio Maria, sendo, porém, afetados por eventos neoarqueanos (Santos *et al.* 2013a, Santos *et al.* 2013b; Teixeira *et al.* 2013; Gabriel & Oliveira 2014; Silva *et al.* 2014; Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016). Contudo, não se tem ainda um conhecimento detalhado sobre a crosta TTG que aflora no SDS, especificamente na região de Água Azul do Norte, uma vez que nos trabalhos ali realizados, tal variedade foi alvo apenas de estudos petrográficos e geoquímicos preliminares, impossibilitando que se conhecesse a extensão da área aflorante desta crosta, e sobretudo, as afinidades petrológicas e os principais aspectos evolutivos.

Este trabalho visa aprimorar a caracterização geológica das associações tonalítica-trondhjémíticas de Água Azul do Norte, permitindo a identificação de suas diferentes variedades litológicas, suas relações de contato, distribuição espacial, feições texturais, assinaturas geoquímicas e avaliar possíveis efeitos metamórficos e deformacionais que possam ter afetado essas rochas. Dessa forma, o conhecimento sobre a geologia e a natureza desses granitoides permitirá um avanço considerável para a compreensão dos processos que levaram à formação e estabilização da crosta arqueana dessa região, e poderá auxiliar no entendimento da compartimentação e evolução tectônica do Domínio Carajás e suas relações com o Domínio Rio Maria.

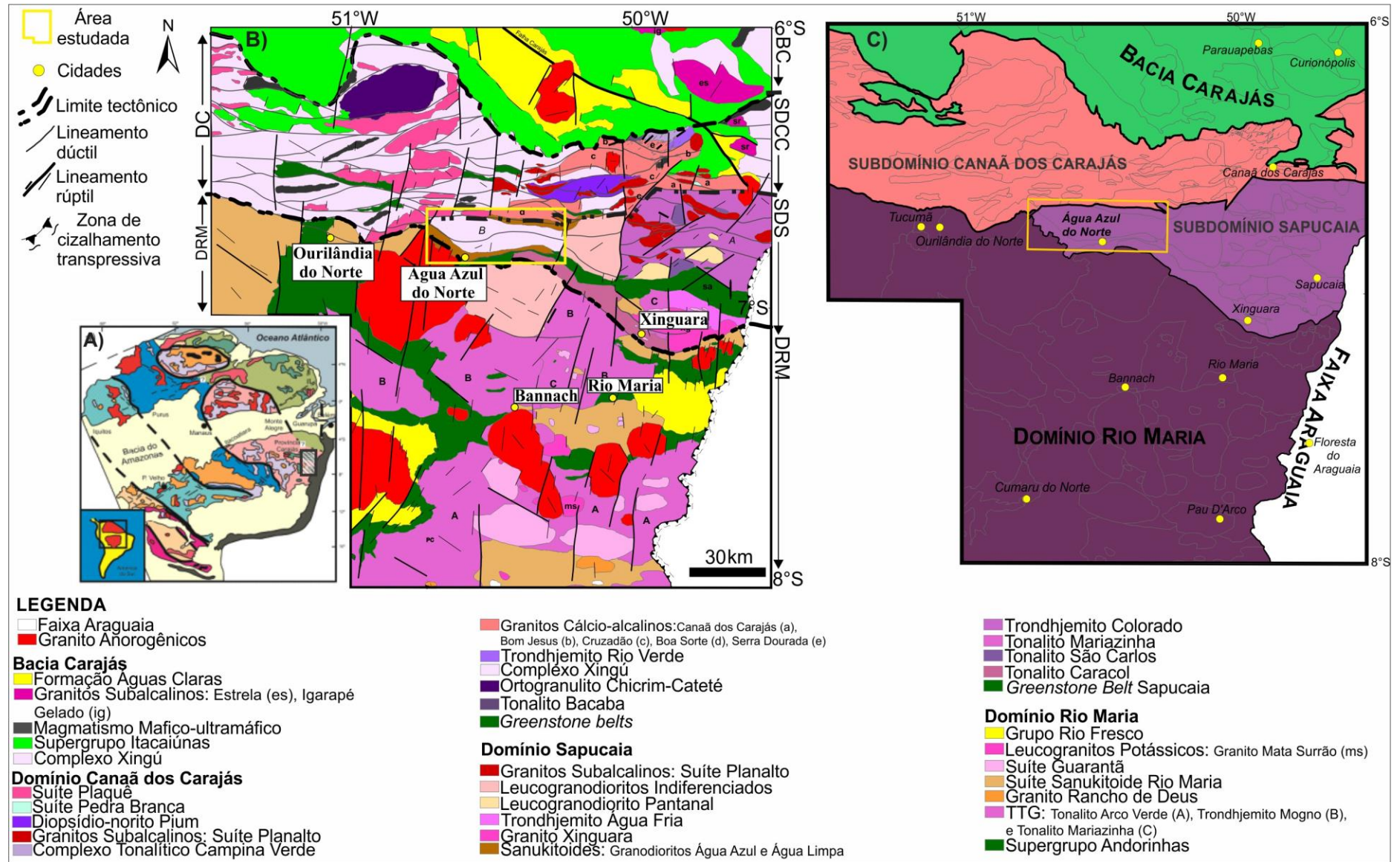


Figura 1 - A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico, modificado de Tassinari & Macambira (2004); B) Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de estudo (modificado de Almeida *et al.* 2011 e Feio *et al.* 2012); e C) Compartimentação tectônica da Província Carajás proposta por Dall'Agnol *et al.* (2013). Legendas: BC = Bacia Carajás; DC = Domínio Carajás; DRM = Domínio Rio Maria; SDCC = Subdomínio Canaã dos Carajás; SDS = Subdomínio Sapucaia.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O **Domínio Rio Maria** (DRM), de idade mesoarqueana (3,0-2,87 Ga), é formado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas com idade de 3,0 e 2,9 Ga (Macambira & Lancelot 1991; Pimentel & Machado 1994; Avelar 1996; Lafon *et al.* 2000; Souza *et al.* 2001; Rolando & Macambira, 2003), e do Grupo Tucumã (Araújo & Maia, 1991); granitoides do tipo TTG formados entre 2,96-2,93 Ga, representados pelo Tonalito Arco Verde, Trondhjemitito Mogno, Tonalito Mariazinha (Macambira & Lafon 1995; Rolando & Macambira 2003; Guimarães *et al.* 2010; Almeida *et al.* 2008, 2011; Ronaib & Oliveira 2013); granitoides de alto Mg (sanukitoides) de 2,88 Ga e 2,87 Ga, representados pela Suíte Rio Maria e rochas associadas (Oliveira *et al.* 2009; Santos *et al.* 2013a; Santos & Oliveira 2016); leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr representados pela Suíte Guarantã e corpos análogos de 2,87-2,86 Ga (Althoff *et al.* 2000; Almeida *et al.* 2010, 2013; Santos *et al.* 2013a); e leucogranitos de alto K caracterizados pelos granitos Mata Surrão de ~2,86 Ga (Leite *et al.* 2004). Tais unidades são recobertas por rochas sedimentares arqueanas do Grupo Rio Fresco (Araújo *et al.* 1988), e intrudidas pelos granitos tipo-A de 1,88 Ga da Suíte Jamon (Dall'Agnol & Oliveira 2007) e por diques félsicos e máficos (Rivalenti *et al.* 1998; Silva *et al.* 2016).

O **Domínio Carajás** (DC), geologicamente menos conhecido, é formado por rochas meso- e neoarqueanas (3,0-2,76 Ga), constitui-se de um embasamento granitoide mais antigo afetado por eventos tectono-termais no final do Arqueano que culminaram em vasta sequência metavulcanossedimentar e intrusões granitoides sintectônicas. Trabalhos recentes mostraram que esse domínio não corresponderia a um segmento tectonicamente homogêneo, sendo assim subdividido, juntamente com a porção norte do DRM, em dois subdomínios, o **Subdomínio Canaã dos Carajás** (SDCC) e **Subdomínio Sapucaia** (SDS) para as porções norte e sul, respectivamente (Dall'Agnol *et al.* 2013).

Os granitoides reconhecidos no SDCC são representados por tonalitos sódicos distintos da série TTG arqueana, identificados como Tonalito Bacaba com idade de 3,0 Ga e Complexo Campina Verde com idade de formação entre 2,87 Ga e 2,85 Ga, datados por Moreto *et al.* (2011) e Feio *et al.* (2013), respectivamente. Tonalitos e trondhjemitos de afinidade TTG também são restritos e foram agrupados na unidade denominada Trondhjemitito Rio Verde, formada entre 2,93-2,87 Ga (Feio *et al.* 2013). Leucogranitos cálcico-alcálicos a transicionais são os tipos granitoides mais expressivos no SDCC, e são representados pelos Granitos Canaã dos Carajás com idade de cristalização de 2,96 Ga, Cruzadão de 2,84 Ga, Bom Jesus de 2,83 Ga, Serra Dourada de 2,83 Ga (Feio *et al.* 2013) e Granito Boa Sorte de 2,85 Ga (Rodrigues *et al.* 2014). Os granitoides neoarqueanos são representados pela Suíte Planalto de 2,74 Ga (Oliveira *et al.* 2010; Feio *et al.* 2012; Cunha *et al.* 2016) e Suíte Pedra Branca de 2,76-2,75 Ga (Feio *et al.* 2013) e rochas charnoquíticas associadas de 2,75 e 2,73 Ga (Gabriel *et al.* 2010, Feio *et al.* 2013).

No SDS foram identificados tonalitos sódicos, distintos da série TTG arqueana, representados pelo Tonalito São Carlos de 2,93 Ga (Silva *et al.* 2014); granitoides do tipo TTG mais antigos, representados pelo Tonalito Caracol 2,93 Ga (Leite *et al.* 2004; Almeida *et al.* 2011; Ronaib & Oliveira 2013); TTGs mais jovens, denominados de Trondhjemitito Colorado (Silva *et al.* 2014; Santos *et al.* 2013b; Leite-Santos & Oliveira 2014) e Trondhjemitito Água Fria (Leite *et al.* 2004), ambos com idade de formação de 2,87 Ga; sanukitoides identificados como Granodioritos Água Azul e Água Limpa de 2,87 Ga (Gabriel *et al.* 2015); leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr, representados pelos leucogranodioritos Nova Canadá (Leite-Santos & Oliveira 2016) e Pantanal (Teixeira *et al.* 2013) de 2,87 Ga; granitos de alto-K de afinidade cálcio-alcálica representados pelos granitos Xinguara de 2,86 Ga (Leite *et al.* 2004; Almeida *et al.* 2013) e Velha Canadá de 2,74 Ga (Leite-Santos & Oliveira 2016); e granitoides subalcalinos sintectônicos afins daqueles da Suíte Planalto que foram descritos na região de Vila Jussara (Silva *et al.* 2014).

GEOLOGIA DOS GRANITOIDES TTG DE ÁGUA AZUL DO NORTE

ASPECTOS GERAIS

O avanço do conhecimento geológico na área de Água Azul do Norte tem mostrado que esta representa um segmento crustal heterogêneo e predominantemente arqueano, formado por corpos de anfibolitos e de metavulcânicas máficas afins de sequências tipo *greenstone belts*, granitoides de afinidade sanukitoide (granodioritos Água Azul e Água Limpa), granitos cálcico-alcálicos de alto-K (granitos Boa Sorte e Velha Canada) e de alto Ba-Sr (Leucogranodiorito Nova Canadá), além de raras ocorrências de granitos subalcalino de afinidade tipo-A. Ocorrências de granitoides tipo TTG eram até então pouco relatadas (Gabriel 2012; Leite-Santos & Oliveira 2016), uma vez que a maior parte da crosta da área de Água Azul do Norte era formada por granitoides do Complexo Xingu. Na presente pesquisa, as rochas deste complexo foram individualizadas, permitindo assim, um avanço significativo do conhecimento sobre a geologia da área. Como resultado, foi individualizada uma extensa crosta formada por granitoides TTG e *enclaves* associados, ambos alvos deste estudo, e intrudida por diversos plutons leucogranodioríticos (Figura 2).

Os granitoides TTG de Água Azul do Norte ocupam uma área de ~300 km² disposta segundo o *trend* E-W (Figura 2), eles afloram sob a forma de lajedos *in situ* em regiões onde o relevo é arrasado e raramente colinoso (Figuras 3A e 3B). São tonalitos e trondhjemitos (Figuras 3C e 3D), com restritas variações granodioríticas, de textura heterogranular média a fina, e que registram a atuação de uma deformação heterogênea com variados graus de recristalização. A anisotropia é dada por uma foliação bem desenvolvida, definida pela orientação da biotita, feldspatos e quartzo, além de *enclaves* máficos de tamanhos decimétricos, deformados e concordantes à foliação. A foliação mais proeminente é do tipo espaçada (bandamento composicional), comumente perturbada ou sobreposta por uma foliação contínua tardia. Próximo ao contato com os granitoides TTG, os plutons intrusivos de leucogranodiorito preservam a estruturação da rocha encaixante e feições de migmatização são frequentes (Figura 3E e 3F).

Enclaves enriquecidos em minerais ferromagnesianos são frequentes nestes granitoides (Figuras 4A e 4B). Em mapa, os *enclaves* concentram-se dispostos em uma faixa que se estende ao longo de toda a área (Figura 2), onde afloram como pequenos corpos de tamanhos decimétricos, com formas estreitas e alongadas, ou ainda como corpos de extensão decamétrica formando extensos lajedos. São rochas de coloração cinza escura, equigranular média, fortemente foliadas e de composição predominantemente tonalítica (Figura 4C) e conteúdo anfibólico modal. O bandamento composicional é a estrutura dominante (Figura 4D), delimitada pela alternância de bandas de proporções modais distintas entre anfibólio, biotita, feldspatos e quartzo.

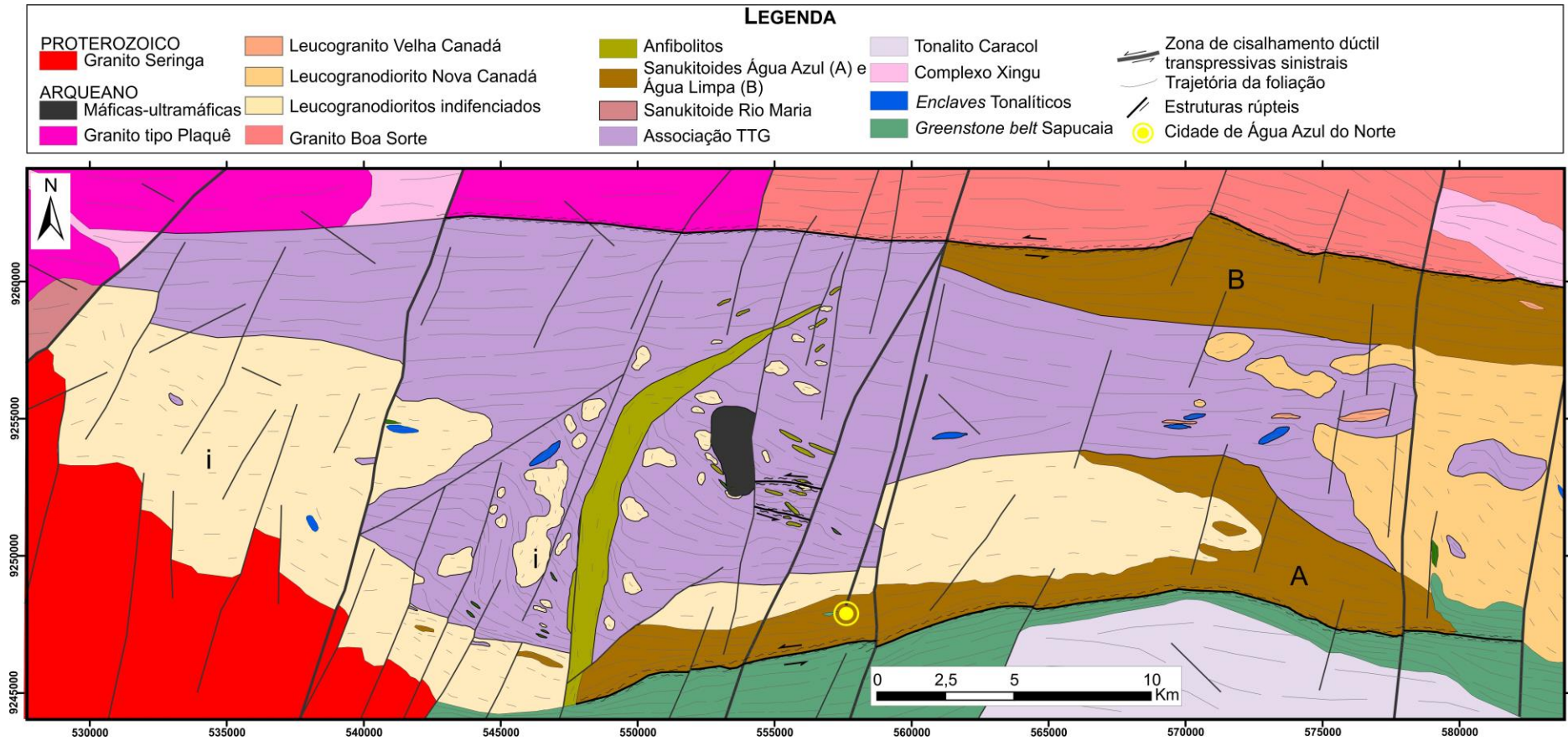


Figura 2 - Mapa geológico da área de Água Azul do Norte.

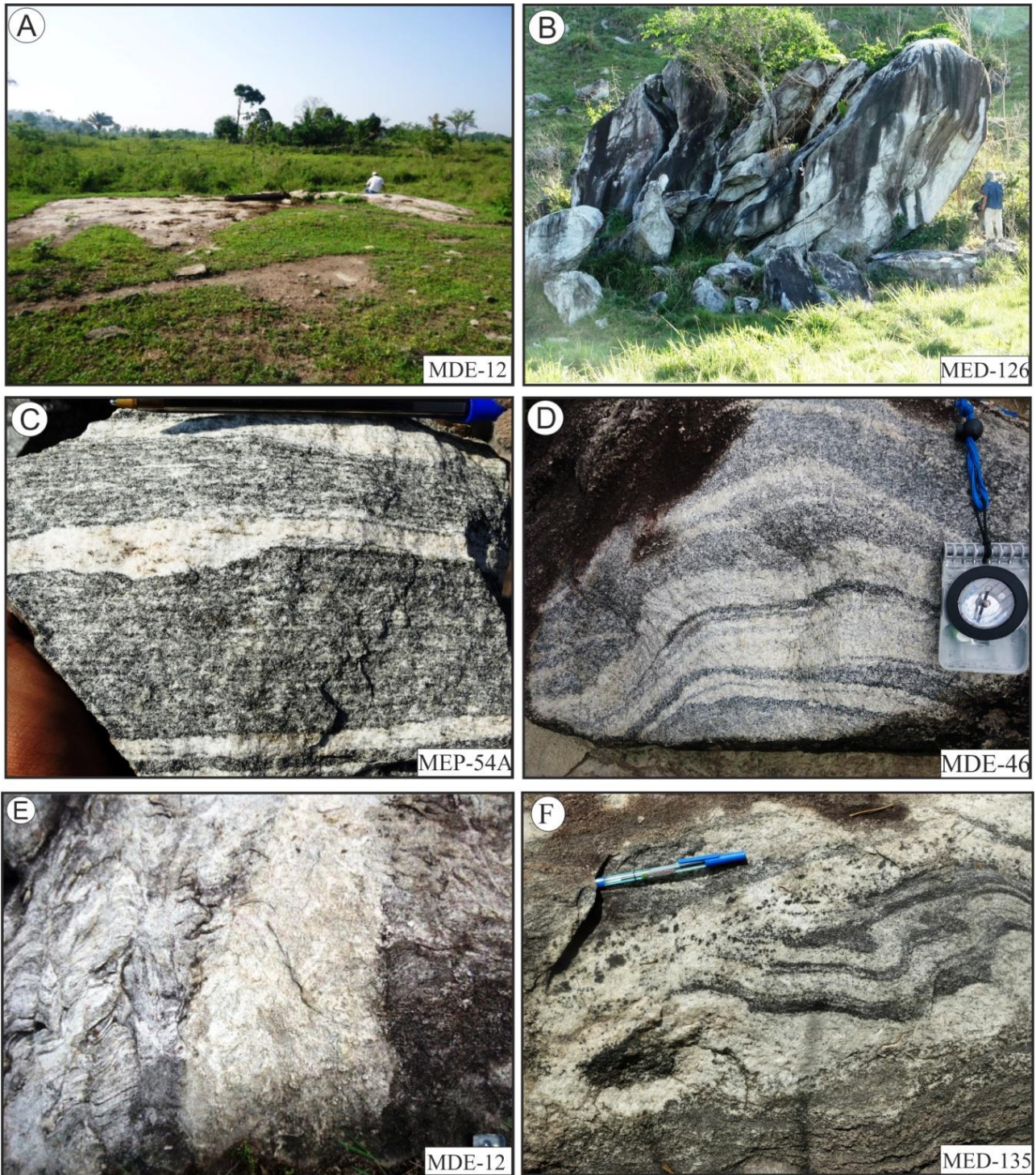


Figura 3 - Aspectos de campo dos granitoides TTG. A) Afloramento tipo lajedo em relevo arrasado; B) Afloramento em blocos rolado e *in situ* em relevo colinoso; C) bandamento da rocha tonalítica; D) Aspecto textural da rocha trondhjemítica com bandamento composicional levemente dobrado, E) Rocha trondhjemítica fortemente foliada e cortada por veio de leucogranito; F) Feições de migmatização (metatexito) em zona de contato com leucogranodiorito-granito intrusivo.

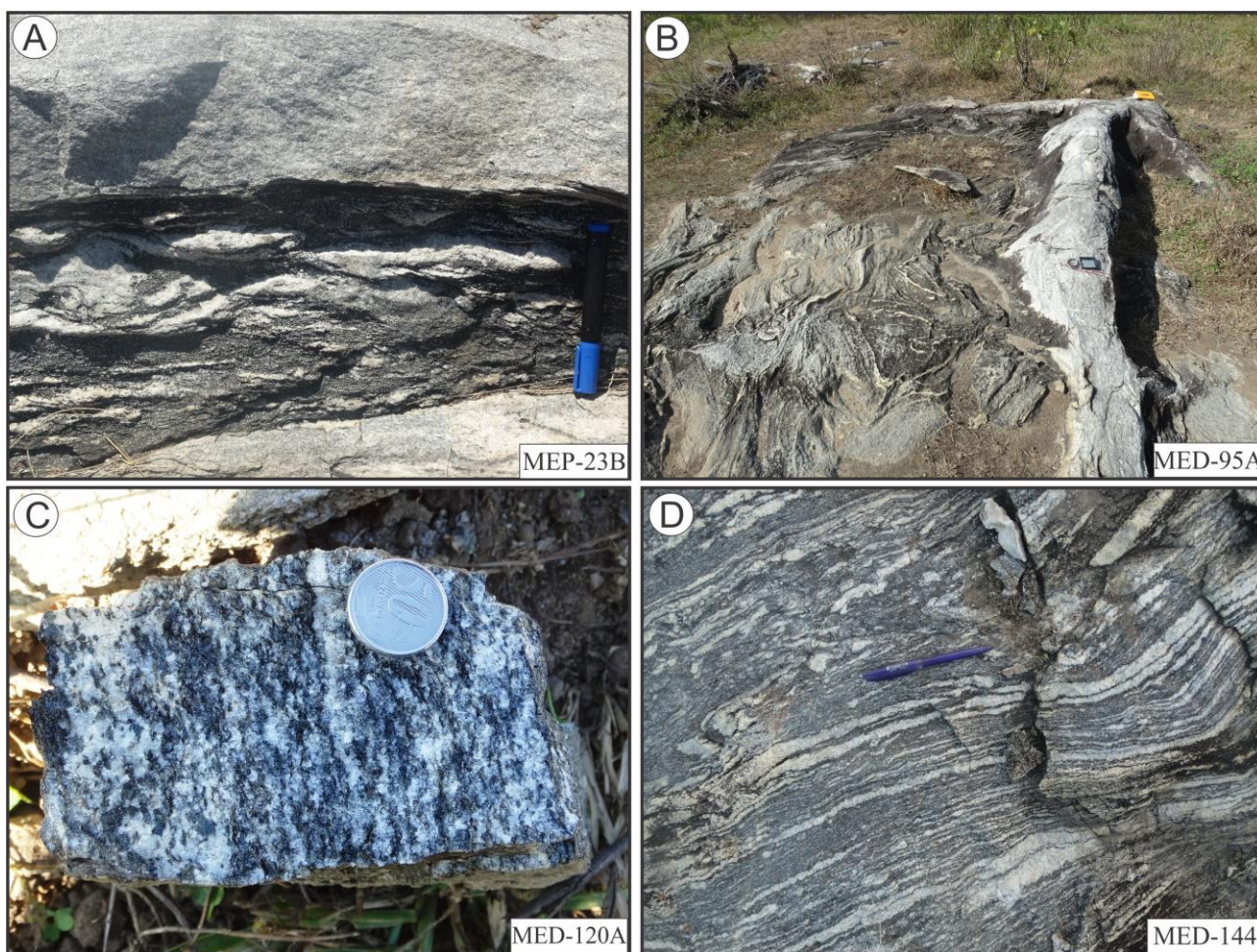


Figura 4 - Aspectos de campo dos *enclaves* tonalíticos. A) *Enclave* tonalítico incluído no TTG; B) Mega *enclave* tonalítico incluído em rochas do leucogranodiorito-granito; C) Aspectos texturais do *enclave* de composição tonalítica e D) *Enclave* tonalítico com bandamento composicional.

FEIÇÕES ESTRUTURAIS

O nível de detalhe do mapeamento geológico realizado na área de Água Azul do Norte permitiu observar que a deformação dúctil interna da crosta TTG é heterogênea e distribui-se pelo menos por dois domínios: de baixa (**DBD**) e alta deformação (**DAD**) (Figura 5A). Tal distribuição mostra ter forte controle reológico, dado pela presença de diques anfíbolíticos e leucogranitos intrusivos, ambos relacionados às manifestações magmáticas mais jovens do que os granitoides TTG estudados. No geral, a foliação (superfícies S) mais proeminente nas rochas TTG é a espaçada, composicional e bandada, definida pela alternância de bandas quartzo-feldspáticas e níveis mais enriquecidos em máficos de espessura centimétrica (3 cm), frequentemente sobreposta por foliação contínua desenhada pela orientação de micas e agregados quartzo-feldspáticos deformados. Nas zonas de alta deformação desenvolve-se a foliação milonítica, que é caracterizada por porfiroclastos imersos em matriz mais fina (quartzo, feldspatos e micas) deformados sob cinemática sinistral, consistindo de foliação espaçada, disjuntiva e anastomótica. Associadas às estruturas planares, lineações de estiramento de agregados quartzo-feldspáticos, quando claramente expressas, são subverticais a sub-horizontais.

O bandamento composicional frequentemente é perturbado por dobras centimétricas, sendo comuns as assimétricas (dobras de arrasto) relacionadas às bandas de cisalhamento. Dobras de alta complexidade (ptigmáticas, em cuspide) ocorrem somente nas zonas de contato com intrusões leucograníticas, associadas aos processos de migmatização e ocorrências de veios de pegmatitos (Figura 5B). Raramente são observadas dobras simétricas intrafoliais. Bandas de cisalhamento dúcteis possuem espessura centimétrica e dimensões métricas a decamétricas, ocorrem tanto de

forma isolada ou em pares conjugados, com deslocamentos sinistral ou dextral formando planos sub-verticais com deslocamentos sub-horizontais.

No **DBD**, porção central da área (Figura 5A), a crosta TTG é seccionada por restritas intrusões leucograníticas que aparentemente exibem feições primárias ainda preservadas. As foliações possuem direções E-W e NE-SW com caimento entre 40° e 80° para norte e lineação de estiramento mineral, quando visíveis nos planos de foliações de alto ângulo, possuem (~70°) para norte. A foliação tectônica contínua sobreposta é subparalela ao bandamento e plano axial das dobras. No **DAD**, porções oeste e leste da área (Figura 5A), as rochas TTG são cortadas por um corpo anfibolítico de orientação NNE de ~17 km de extensão ao oeste, e por intrusões leucograníticas que originam feições de migmatização nas rochas encaixantes. As foliações apresentam um arranjo heterogêneo em diversas orientações, e com base nas observações de campo distinguiram-se quatro grupos principais: (i) As de direção **E-W** (S_{ew}) de mergulhos moderados a sub-verticais (50°-89°), para N e S, e suaves (25°-40°) para N com lineação de estiramento (~20°) para N-NW; (ii) As foliações **NE-SW** (S_{ne}) com mergulhos entre 26°-85° para NW e lineação de estiramento (8°-30°) para N-NE; (iii) Foliações com *trend* **NW-SE** (S_{nw}) de mergulhos moderados a sub-verticais (50°-85°) tanto para SW quanto NE e as suaves (10°-40°) para NE; e (iv) As **N-S** (S_{ns}), de mergulhos moderados a sub-verticais (48°-82°) para E e W e suaves (9°-42°) para W, e lineações de estiramento entre 8°-30° para WNW. As possíveis relações temporais entre estas estruturas podem ser observadas e inferidas com base na análise mesoscópica de um afloramento representativo da associação TTG (MDE-12A; Figura 5B).

O bandamento composicional apresenta direção principal E-W e inflexões para NE-SW. Intrusões de leucogranitos são conectadas e condicionadas tanto por estruturas rúpteis N-S (veios), quanto pela orientação E-W do bandamento composicional (como bolsões), sugerindo condição dúctil-rúptil para sua colocação. Cisalhamento e transposição de toda essa trama produziram foliações tectônicas NW-SE e N-S. As foliações NW-SE são planos axiais às dobras de arrasto, associadas com bandas de cisalhamento dúcteis sinistrais, ao passo que aquelas de orientação N-S estão relacionadas às bandas de cisalhamento dextrais. Ambas afetaram tanto o embasamento TTG quanto as intrusões de leucogranitos. No afloramento MDE-12A, nota-se que o desenvolvimento de bandas de cisalhamento dextrais N-S nos granitoides TTG tem forte controle reológico e de estruturas pré-existentes, como aquelas observadas nos contatos entre *enclaves* máficos e granitoides (Figura 5B).

As observações descritas acima não deixam claro se a foliação NE-SW é mais antiga ou formada sincronicamente com aquela de orientação NW-SE identificada em outros afloramentos. No entanto, levando em consideração bandas de cisalhamento dúcteis sinistrais NE-SW e NW-SE identificadas em escala de mapeamento (Figura 5A) e paralelas às foliações S_{ne} e S_{nw} , pode-se inferir que parte destas estruturas são geneticamente relacionadas. Foliações miloníticas (S_m) são encontradas em restritas zonas de cisalhamento sinistrais localizadas na porção centro-oeste do corpo (Figura 5A), e mostram tramas paralelas ao bandamento composicional, direção E-W de mergulhos entre 25°-80° e lineação de estiramento com caimento entre 25°-69° para N.

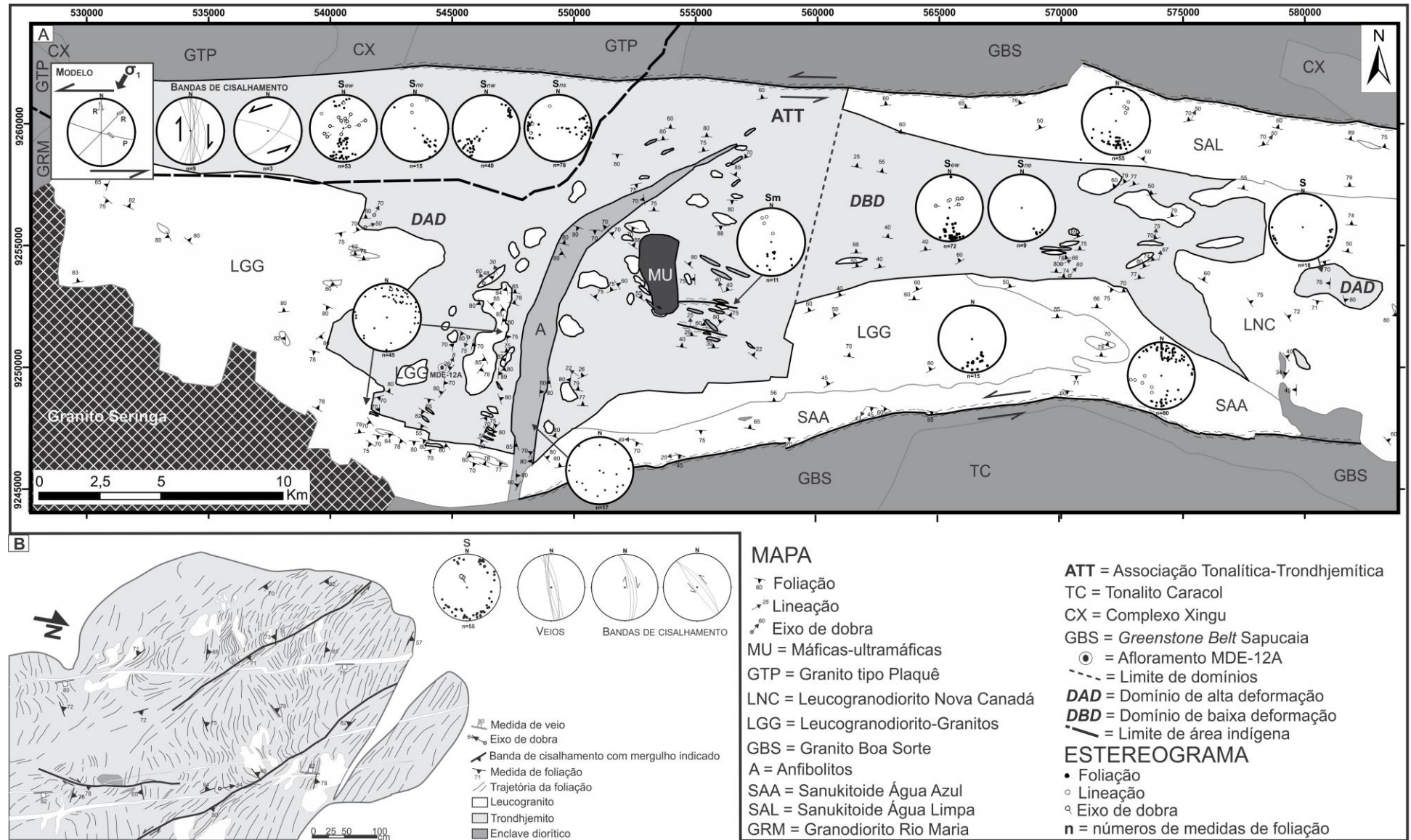


Figura 5 - Mapa Estrutural da área de Água Azul do Norte. A) Projeções estereográficas de equal-área (Schmidt-Lambert, hemisfério inferior) das estruturas dos principais litotipos mapeados na região; e B) Painel Estrutural do Afloramento MDE-12A, mostrando em escala de detalhe as relações entre estruturas da ATT e outros litotipos.

PETROGRAFIA

COMPOSIÇÕES MODAIS E CLASSIFICAÇÃO

Os granitoides TTG de Água Azul do Norte são formadas pelas variedades epidoto-biotita tonalito (Ep-BtTnl) e biotita trondhjemitito (BtTrd) com restritas variações granodioríticas, como pode ser visualizado no diagrama de classificação Q-A-P (Le Maitre 2002) (Figura 6). O diagrama Q-(A+P)-M' demonstra uma clara diferença entre os conteúdos modais de minerais ferromagnesianos dos tonalitos (11,6-31,6%) e trondhjemitos (4,2-10,6%). Embora não apresentem diferenças mineralógicas e texturais significativas, tais variedades contêm diferenças na concentração de K-feldspato, sendo comumente inexpressiva no Ep-BtTnl, ao passo que no BtTrd, estão presentes em concentrações variadas (Tabelas 1 e 2). São compostas mineralogicamente por cristais de plagioclásio (42,8-63,9%), quartzo (20,8-35,2%) e feldspato potássico (até 12,2%). A biotita (0,2-20,4%) é a principal fase máfica, enquanto o epidoto₁ (até 10,5%) e muscovita (até 3,7%) chegam a constituir composições de fase varietal nas amostras mais deformadas dos Ep-BtTnl e BtTrd, respectivamente, sugerindo serem produto de cristalização metamórfica. Titanita, allanita, apatita, zircão e minerais opacos (magnetita) têm concentrações < 1%, e representam as fases acessórias primárias que podem ocorrer inclusos em feldspatos e biotita; os minerais secundários, epidoto₃, carbonato e sericita são produtos da alteração (saussuritização) do plagioclásio₁, clorita, titanita₂ e opaco₂ são originados a partir da alteração da biotita.

Os dados modais mostram ainda, que os *enclaves* podem ser classificados como anfibólio-biotita tonalito (Figura 6), e mais restritamente como piroxênio-anfibólio tonalito e epidoto-biotita quartzodiorito (Tabela 3). Em geral, são mais empobrecidos em plagioclásio (31,4-59,3%), quartzo (10,9-24,8%) e feldspato potássico (<0,8%), e enriquecidos em minerais ferromagnesianos (15,6%-47,6%) em relação aos granitoides TTG. Os minerais acessórios primários são titanita, apatita, zircão, opacos e allanita e os secundários, carbonato e sericita que estão associados à alteração do plagioclásio. Os minerais acessórios primários são apatita, zircão, opacos, titanita e allanita e secundários incluem, carbonato e sericita. Alterações metamórficas entre os minerais máficos são observadas principalmente pela formação de alguns cristais de anfibólio, biotita, epidoto e clorita.

ASPECTOS TEXTURAIS E DEFORMACIONAIS

As variedades petrográficas dos granitoides TTG identificadas na área de Água Azul do Norte possuem aspectos mineralógicos e texturais similares, permitindo que se faça uma descrição conjunta das mesmas. Os eventos deformacionais que afetaram estas rochas atuaram de maneira heterogênea, sendo que as amostras menos deformadas e recristalizadas, tanto dos granitoides TTG quanto dos *enclaves*, ainda preservam textura primária granular hipidiomórfica (Figuras 7A e 8A), evidenciada pela ocorrência de cristais de plagioclásio e anfibólio prismáticos com alinhamento subparalelo (Figura 7B), quartzo intersticial e agregado de minerais máficos pouco deformados (Figura 8B). Os principais mecanismos deformacionais que afetaram os minerais primários destes granitoides foram a deformação cristaloplástica, redução da granulação, recuperação e recristalização. A textura nesses casos assume caráter heterogranular alotriomórfico (Figura 7C), desenvolvendo texturas miloníticas nas amostras mais deformadas, em especial nos *enclaves* (Figura 8C).

Tabela 1 - Composições modais dos granitoides TTG. Legendas: (p) = mineral primário; (s) = mineral secundário; - = mineral não observado na amostra; Tr = mineral presente na rocha, mas não registrado na contagem modal. Estimativa obtida através da contagem de aproximadamente 2.000 pontos por amostra.

(Continua)

Fácies Amostra	Ep-Bt Tonalito																Bt-Trondhjemito								
	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	EDC	EDC	RL	RL	RL	RL	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	MDE	SE
Mineral (%)	17B	21	23	28A	37A	38	71A	73	74	75B	82	22	13	119B	30	118B	120	13A	46A	48	77B	78	80	89A	59
Quartzo	24,85	23,84	23,41	23,35	23,00	22,80	35,33	21,99	26,66	20,85	30,34	26,70	27,80	15,20	24,85	27,40	26,50	23,50	23,49	26,35	32,00	29,55	25,90	27,10	35,70
Plagioclásio	42,80	56,67	53,52	48,35	57,00	57,10	51,91	55,66	56,46	57,80	54,13	52,10	51,05	56,90	52,95	50,75	50,00	63,90	60,91	62,10	57,78	60,85	60,80	59,20	53,75
Álcalis	0,05	-	0,17	0,10	3,95	0,30	0,55	0,05	1,12	5,55	1,52	4,30	-	-	-	-	-	0,20	4,07	2,95	1,30	3,12	2,87	2,65	3,90
Biotita	19,35	17,84	19,83	20,65	10,45	18,15	11,26	15,15	14,34	12,15	9,18	15,70	19,60	20,40	15,55	16,80	17,30	8,55	8,72	4,65	6,12	4,26	5,95	7,40	5,40
Muscovita	-	0,57	1,56	0,80	3,70	0,20	0,25	-	0,15	1,60	1,63	0,05	-	0,05	-	0,65	1,45	2,80	0,05	1,95	1,61	1,59	1,86	1,40	0,05
Epidoto	10,50	0,57	0,67	6,15	0,25	0,70	0,20	5,26	0,51	0,55	1,07	0,20	0,50	4,05	3,05	2,40	2,30	0,25	-	0,15	0,68	0,40	0,91	0,55	-
Allanita	0,10	tr	0,06	0,10	0,10	-	0,15	0,05	0,05	-	0,05	0,10	0,20	0,25	0,05	0,05	0,05	0,15	-	tr	0,10	tr	-	0,05	-
Opaco (p)	0,70	-	-	-	0,50	0,05	0,10	-	0,05	0,15	1,02	0,20	0,20	tr	-	-	-	0,10	0,21	-	tr	0,11	0,30	-	0,60
Titanita (p)	-	-	-	0,05	0,05	-	-	-	-	0,35	0,15	0,10	0,20	0,80	-	0,05	0,05	-	-	-	-	-	-	-	0,10
Zircão	0,15	0,14	0,11	-	0,05	0,05	-	0,05	-	-	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,10	0,05	0,15	0,16	-	tr	-	0,35	0,15	0,20
Apatita	0,20	0,14	0,11	0,15	0,25	tr	tr	tr	0,10	-	0,15	0,10	0,20	0,35	0,10	0,35	0,45	0,05	0,05	0,05	0,31	-	0,10	0,05	0,10
Clorita (s)	0,80	0,07	0,11	-	0,65	0,65	0,05	0,77	0,15	0,15	0,05	0,20	-	-	1,50	-	0,90	-	1,04	0,95	-	-	0,05	0,05	0,05
Titanita (s)	-	tr	tr	-	-	-	0,15	tr	tr	-	tr	0,05	0,05	tr	-	-	-	-	-	-	0,05	-	0,05	tr	0,10
Opaco (s)	tr	tr	tr	-	-	-	tr	tr	-	-	-	0,05	0,10	tr	-	tr	-	tr	tr	tr	-	tr	-	-	0,05
Epidoto (s)	tr	tr	tr	tr	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	0,50	1,30	1,25	0,65	-	-	tr	-	-	tr	-
Carbonato (s)	-	-	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	-	-	1,35	0,35	0,10	-	0,05	-	-	-	-	0,30	0,00
Sericita (s)	0,50	0,14	0,45	0,30	0,05	tr	0,05	0,92	0,41	0,85	0,66	-	-	0,10	0,25	0,20	0,20	0,35	1,25	0,85	0,05	0,11	0,86	1,10	tr
Máficos	31,60	18,62	20,78	26,95	12,05	19,60	11,91	21,28	15,10	13,35	11,57	16,75	20,95	26,05	21,50	20,65	21,30	9,20	10,13	5,75	6,95	4,77	7,60	8,20	6,50
A+P	42,85	56,67	53,69	48,45	60,95	57,40	52,46	55,71	57,58	63,35	55,65	56,40	51,05	56,90	52,95	50,75	50,00	64,10	64,98	65,05	59,08	63,97	63,67	61,85	57,65
QAP	67,70	80,51	77,10	71,80	83,95	80,20	87,79	77,70	84,24	84,20	85,99	83,10	78,85	72,10	77,80	78,15	76,50	87,60	88,47	91,40	91,08	93,52	89,57	88,95	93,35
À 100%																									
Q	36,71	29,61	30,36	32,52	27,40	28,43	40,24	28,30	31,65	24,76	35,28	32,13	35,26	21,08	31,94	35,06	34,64	26,83	26,55	28,83	35,13	31,60	28,92	30,47	38,24
A	0,07	0,00	0,22	0,14	4,71	0,37	0,63	0,06	1,33	6,59	1,77	5,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	4,60	3,23	1,43	3,34	3,20	2,98	4,18
P	63,22	70,39	69,42	67,34	67,90	71,20	59,13	71,63	67,02	68,65	62,95	62,70	64,74	78,92	68,06	64,94	65,36	72,95	68,85	67,94	63,44	65,07	67,88	66,55	57,58

Tabela 1 –

(Conclusão)

Fácies	Bt-Trondhjemito																							
	Amostra	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	EDC	RL	RL	RL	RL	RL	RL	MDE	MDE	MDE	MDE
Mineral (%)	62	60	59	47	29	27	21	16	10	15	06	03	02	115A	67	112	117	111	61	123A	34	46B	47	86
Quartzo	34,20	31,65	32,30	35,20	34,30	33,40	32,90	34,10	30,50	34,45	30,35	33,70	33,10	26,20	30,45	27,00	27,00	29,20	31,40	30,40	29,91	30,30	29,82	30,30
Plagioclásio	58,10	57,90	57,25	55,45	56,30	56,80	57,70	55,10	54,80	52,35	54,90	56,10	54,60	57,25	57,55	61,60	58,55	60,65	56,35	56,85	55,30	48,85	56,26	50,51
Álcalis	3,20	3,80	3,40	3,70	1,50	0,65	3,90	1,50	4,50	4,40	2,60	2,70	2,50	3,65	4,00	1,50	2,25	-	0,35	2,10	7,77	8,98	12,20	6,23
Biotita	3,50	5,50	5,45	4,10	6,20	7,10	3,70	8,00	8,55	6,50	8,70	5,20	7,20	6,50	4,60	6,60	7,60	9,00	7,40	6,70	5,01	8,56	0,16	7,34
Muscovita	0,05	0,30	0,80	-	0,45	-	0,70	0,05	-	1,05	1,50	0,70	1,00	2,20	1,35	2,00	1,50	-	0,65	2,05	1,06	0,05	0,05	3,22
Epidoto	0,10	0,05	0,20	0,20	0,30	0,05	0,40	0,10	0,80	0,20	0,60	0,40	0,70	0,45	0,45	0,10	0,40	0,10	0,10	-	0,10	0,08	0,31	0,33
Allanita	-	-	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,05	0,10	0,25	0,10	0,30	-	-	0,10	-	0,15	tr	0,05	tr	-	0,05
Opaco (p)	0,40	0,30	0,30	0,20	0,00	0,80	0,10	0,40	0,05	0,40	0,80	0,25	0,20	0,10	0,10	0,15	0,15	0,25	0,80	0,30	tr	0,16	0,10	0,02
Titanita (p)	0,10	-	0,25	0,10	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10	0,05	0,05	-	0,20	0,05	-	-	0,10	0,24	-	0,06
Zircão	0,10	0,30	0,20	0,05	0,10	0,30	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	tr	0,05	-	0,20	-	-	0,05	0,25	-	-	0,11
Apatita	0,25	0,10	0,30	-	0,30	0,40	0,10	0,20	0,10	0,20	0,10	0,10	-	0,25	tr	-	0,20	0,20	0,10	0,05	0,10	0,16	0,05	0,22
Clorita (s)	-	0,05	0,10	0,05	0,10	-	0,10	0,05	-	0,05	0,05	0,20	0,30	0,60	0,25	0,60	1,00	0,45	0,30	1,15	0,10	1,11	0,10	-
Titanita (s)	-	-	0,05	0,05	-	0,20	-	0,05	-	0,05	-	0,05	0,05	-	tr	0,15	-	tr	-	0,05	tr	-	-	tr
Opaco (s)	tr	0,05	0,05	-	0,10	0,10	-	0,05	0,10	0,05	-	0,05	0,05	-	tr	-	-	-	tr	tr	-	tr	-	-
Epidoto (s)	-	-	0,05	0,05	0,05	-	-	-	-	0,05	-	-	-	0,30	0,45	0,05	0,15	0,10	0,25	0,05	-	tr	tr	-
Carbonato (s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,10	0,10	-	-	1,30	-	-	0,16	-	-
Sericita (s)	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	-	tr	tr	tr	tr	2,15	0,60	0,15	0,70	-	0,85	0,25	0,25	1,35	0,94	1,11
Máficos	4,20	6,25	6,75	4,85	7,15	8,75	4,70	9,05	10,10	7,55	10,55	6,70	8,80	7,65	5,95	7,65	9,80	9,95	9,00	8,30	5,61	10,15	0,67	7,91
A+P	61,30	61,70	60,65	59,15	57,80	57,45	61,60	56,60	59,30	56,75	57,50	58,80	57,10	60,90	61,55	63,10	60,80	60,65	56,70	58,95	63,07	57,83	68,46	56,74
QAP	95,50	93,35	92,95	94,35	92,10	90,85	94,50	90,70	89,80	91,20	87,85	92,50	90,20	87,10	92,00	90,10	87,80	89,85	88,10	89,35	92,98	88,13	98,28	87,04
À 100%																								
Q	35,81	33,90	34,75	37,31	37,24	36,76	34,81	37,60	33,96	37,77	34,55	36,43	36,70	30,08	33,10	29,97	30,75	32,50	35,64	34,02	32,17	34,38	30,34	34,81
A	3,35	4,07	3,66	3,92	1,63	0,72	4,13	1,65	5,01	4,82	2,96	2,92	2,77	4,19	4,35	1,66	2,56	0,00	0,40	2,35	8,36	10,19	12,41	7,16
P	60,84	62,02	61,59	58,77	61,13	62,52	61,06	60,75	61,02	57,40	62,49	60,65	60,53	65,73	62,55	68,37	66,69	67,50	63,96	63,63	59,48	55,43	57,24	58,03

Tabela 2 - Composições modais dos *enclaves*. Legendas: (s) = mineral secundário; - = mineral não observado na amostra; Tr = mineral presente na rocha, mas não registrado na contagem modal. Estimativa obtida através da contagem de aproximadamente 2.000 pontos por amostra.

Fácies	Anf_BtTn					Bt_AnfTn			Px_AnfTn	Ep_BtQzD
Amostra	MED	MED	MEP	MEP	RL	MEP	MEP	MEP	EDC	MED
Mineral(%)	144	95A	12A	12B	116A	16	23B	53B	28B	120A
Quartzo	16,20	21,50	24,80	18,68	22,00	24,75	24,40	14,52	20,85	10,95
Plagioclásio	51,30	49,01	58,05	52,18	49,85	47,15	47,90	51,76	31,45	59,35
Álcalis	-	0,06	-	-	0,75	-	-	-	-	-
Piroxênio	-	-	-	-	-	-	-	-	10,65	-
Anfibólio	7,25	7,99	3,80	11,49	6,35	14,25	14,10	18,18	36,60	-
Biotita	22,80	19,21	11,65	16,01	15,80	12,95	13,00	12,58	0,40	17,65
Epidoto	2,20	1,86	0,15	0,77	4,65	0,60	0,35	0,90	-	10,65
Allanita	-	-	tr	-	0,15	0,10	-	-	-	0,30
Opaco	-	-	-	-	-	-	tr	0,25	-	-
Titanita	-	tr	-	-	-	-	-	1,51	-	0,35
Zircão	-	-	0,05	tr	-	tr	0,10	-	tr	tr
Apatita	0,05	-	tr	0,10	-	0,10	0,05	0,05	-	0,05
Clorita (s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60
Carbonato (s)	-	-	0,25	-	-	0,10	-	-	-	-
Sericita (s)	0,20	0,37	1,25	0,77	0,45	-	0,10	0,25	0,05	0,10
Máficos	32,25	29,06	15,65	28,27	26,95	27,90	27,55	33,42	47,65	29,55
A+P	51,30	49,07	58,05	52,18	50,60	47,15	47,90	51,76	31,45	59,35
QAP	67,50	70,57	82,85	70,86	72,60	71,90	72,30	66,28	52,30	70,30
À 100%										
Q	24,00	30,47	29,93	26,36	30,30	34,42	33,75	21,91	39,87	15,58
A	0,00	0,09	0,00	0,00	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P	76,00	69,45	70,07	73,64	68,66	65,58	66,25	78,09	60,13	84,42

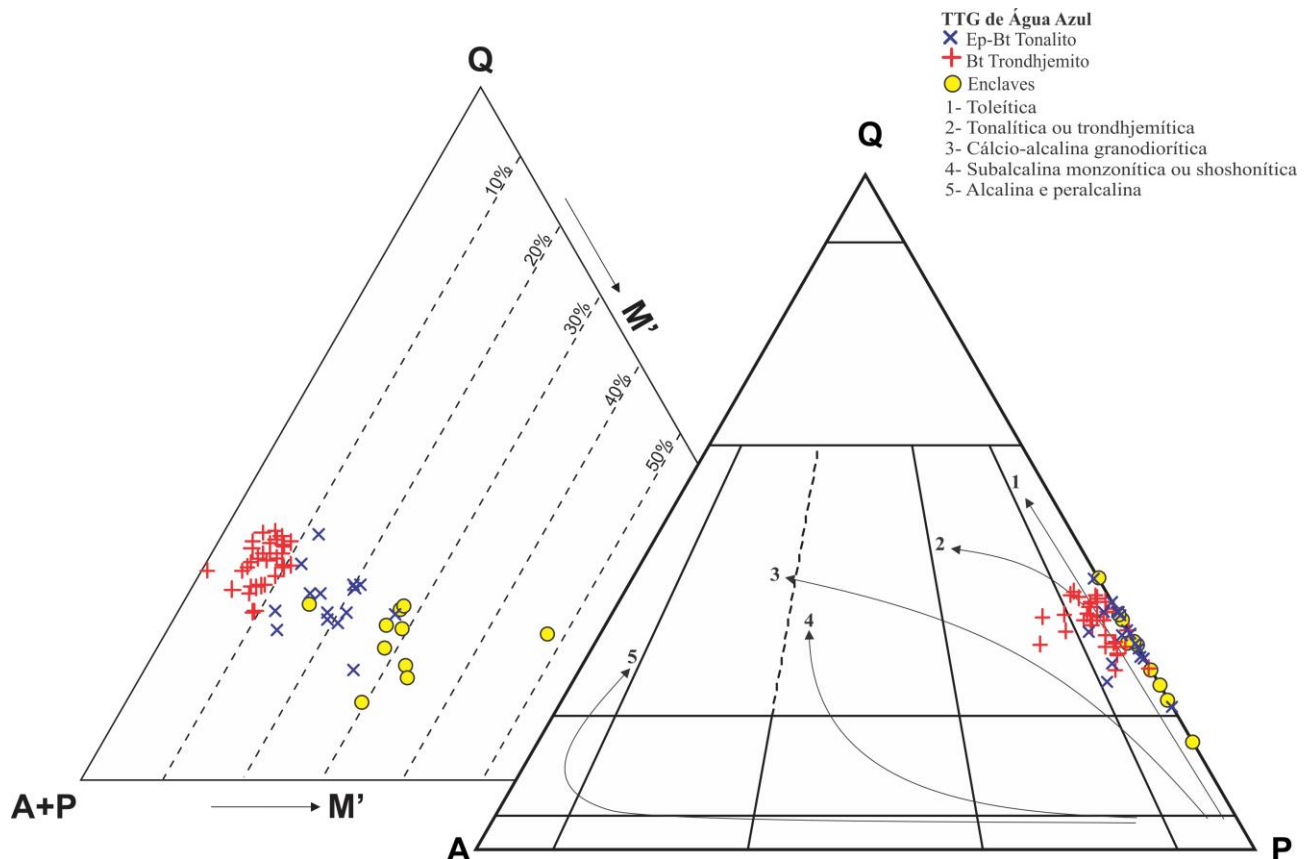


Figura 6 - Diagramas modais Q-A-P e Q-(A+P)-M' (Le Maitre, 2002) para as rochas estudadas. 1 a 5 – Séries granitoides e seus *trends* evolutivos (Lameyre & Bowden 1982)

Os feldspatos apresentam duas gerações de cristais. O plagioclásio₁ exibe hábito subautomórfico e pode atingir até 7 mm. Apresenta antipertitas, maclamento do tipo albita, albita-periclina e mais raramente do tipo *Carlsbad*. Nas amostras menos deformadas, preservam alinhamento subparalelo e imbricação de cristais prismáticos (Figura 7B), e naquelas mais deformadas contém formas subarredondadas associadas à recristalização e extinções ondulantes (Figuras 7C e 7D). Quando há alteração, os núcleos cálcicos são transformados para sericita, revelando por vezes, zoneamento oscilatório, e no contato com a microclina, ocorre intercrescimento mimerquítico. O plagioclásio₂ é representado por cristais xenoblásticos de granulação fina (<0,5 mm) e relacionam-se com o plagioclásio₁ em texturas manto-núcleo, preenchendo caldas de recristalização ou ainda, dispostos de forma intersticial entre cristais maiores, com contatos retos em agregados poligonais (granoblásticos) orientados. A microclina₁ é intercrystalina, xenomórfica e pode atingir até 3 mm. Localmente apresenta intercrescimentos pertítico e granofírico, e mais raramente, inclusões de biotita, quartzo e plagioclásio (textura poiquilítica). Por sua vez, a microclina₂ é muito fina (~0,3 mm) e exibe formas hipidioblástica a xenoblástica. Desenvolve bulbos mirmequíticos e associa-se com a microclina₁ em textura manto-núcleo (Figura 7E).

O quartzo pode exibir até quatro tipos texturais: (i) quartzo₁, de granulação fina a média (0,5 a 3,0 mm), possui forma subautomórfica à xenomórfica e é intersticial. Alguns cristais possuem forte extinção ondulante, formação de subgrãos, e mais raramente, bandas de deformação. Nas rochas mais deformadas, alguns cristais estão estirados e fortemente orientados (*ribbons*) contornando porfiroclastos de plagioclásio₁ (Figura 7D) e anfibólio (*enclaves*); (ii) quartzo₂, são subgrãos e neogrãos finos (<0,5 mm), exibem contatos suturados, curvos e retilíneos em junções tríplices, entre si e com os feldspatos da segunda geração, formando agregados granoblásticos. Nos *enclaves*, estes marcam a foliação oblíqua (Figura 8D); (iii) quartzo₃, de granulação muito fina (~0,1 mm) e forma sub-arredondada, ocorre incluso e disposto ao longo dos planos de clivagem da biotita e anfibólio; (iv) quartzo₄, está presente nas rochas mais deformadas das variedades TTG, formando microcristais vermiculares em bulbos mirmequíticos nas bordas dos cristais de feldspato.

A biotita apresenta forma lamelar e granulação fina (0,1-1,0mm). Nas rochas menos deformadas, seus cristais são subautomórficos, intersticiais e apresentam extinção ondulante (biotita primária). Nas rochas mais deformadas, são mais finos e fortemente orientados em meio aos agregados granoblásticos, onde desenham a anisotropia da rocha e bordejam os porfiroclastos de plagioclásio₁ e anfibólio (*fish*) sem evidências acentuadas de deformação intracristalina, formam agregados em contatos retos (*clusters*) com cristais de epídoto₂, muscovita, titanita e opacos. Tais concentrações podem ser derivadas de cristais primários maiores por processo de recristalização (Blenkinsop, 2000).

Nas bandas félsicas dos *enclaves*, o anfibólio é bordado por agregados recristalizados de quartzo e plagioclásio e com finos cristais de biotita dispostos ao longo de seus planos de clivagem. Nos *enclaves* portadores de piroxênio, também é comum o anfibólio apresentar relações de substituição com este mineral (Figura 8E).

O epídoto é o mineral acessório mais frequente na variedade Ep-BtTnl e nos *enclaves*, onde é possível identificar três tipos texturais. O epídoto₁ exibe granulação fina (0,1-1,0 mm) e formas auto- a subautomórficas. São cristais zonados e maclados, por vezes possuem núcleos de allanita e contatos retos com a biotita, sugerindo equilíbrio entre estas fases minerais e suposta origem magmática. Por outro lado, quando em contato com o plagioclásio, tendem a possuir faces cristalinas xenomórficas, que pode ser interpretado como sinais de desestabilização. O epídoto₂ ocorre nas variedades mais deformadas, formando agregados minerais com biotita e muscovita, o que pode sugerir sua origem a partir de recristalização metamórfica. Já o epídoto₃, está associado à alteração de cristais de plagioclásio₁ em seus núcleos descalcificados.

A muscovita está presente nas rochas mais deformadas da variedade BtTrd. Exibe granulação fina (0,2-0,5 mm), formas idio- a hipidioblástica, e ocorre associada à biotita em contato reto e contornando os cristais de plagioclásio₁. Tais feições sugerem que a mesma seja produto de cristalização metamórfica (Leite 2001).

O bandamento composicional nos granitoides TTG e *enclaves* de Água Azul do Norte pode representar a coexistência de magmas com distintas proporções de minerais máficos e feldspatos, assim como descrito nas associações TTG do Domínio Rio Maria (Althoff *et al.* 2000; Leite 2001). As feições microestruturais resgatadas nestas rochas sugerem que texturas magmáticas pretéritas foram afetadas pelo menos por um momento de deformação durante o estágio **submagmático** (imbricação - *tiling* - e alinhamento subparalelo de prismas sub- a automórficos de anfibólio e plagioclásio com zoneamento oscilatório e fraca deformação intracristalina / cristais intersticiais de biotita e quartzo parcialmente recristalizados) e posteriormente afetada por deformação dinâmica heterogênea no **estado sólido** (extinção ondulante / formação de subgrãos e recristalização para neogrãos (<0,5 mm) em feldspatos e quartzo / caldas de recristalização e textura manto-núcleo em porfiroclastos de feldspatos / alongação de cristais (quartzo *ribbon*) / agregados recristalizados poligonizados bordejando porfiroclastos / mimerquitas entre agregados de neogrãos de microclina e porfiroclastos / *clusters* de minerais recristalizados) - Paterson *et al.* (1989); Vernon (2000); Blenkinsop (2000); Passchier & Trouw (2005). Com base nestes aspectos, a temperatura máxima que atuou durante a deformação dinâmica pode ser inferida em ~ 550°C (Trouw *et al.* 2010), com importante atuação de recristalização estática com o término da deformação principal. Esta fase final da deformação está associada ao desenvolvimento das foliações originadas por cisalhamento e transposição do bandamento, registrada em meso e microescala (Figura 7F).

Como os mecanismos de deformação e recristalização dinâmicas foram mais intensos nos *enclaves*, pode-se supor que as estruturas primárias tenham servido como planos de reativação para a deformação subsequente. Assim, devido o contraste reológico entre minerais das bandas máficas (mais resistentes à deformação) e félsicas, tais mecanismos atuaram de maneira diferencial entre as bandas, concentrando dessa forma, maior deformação e recristalização nas félsicas, onde há um maior conteúdo de quartzo e feldspatos (Figura 8F).

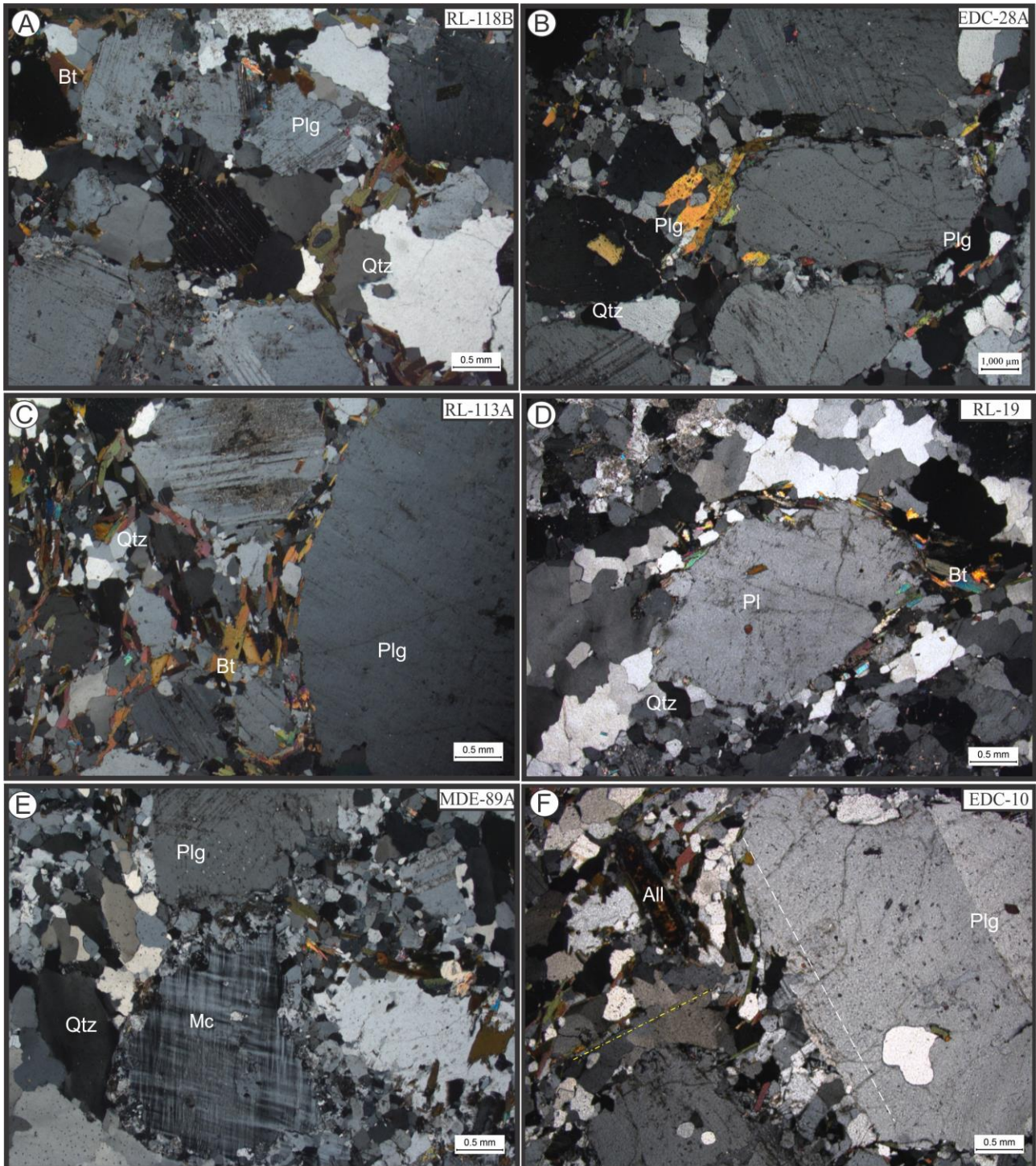


Figura 7 - Aspectos texturais dos granitoides TTG. Fotomicrografias em nicóis cruzados: A) Aspecto microscópico da textura granular hipidiomórfica com cristais de plagioclásio e quartzo da primeira geração em BtTrd; B) Alinhamento subparalelo de cristais prismáticos de plágioclasio₁ com finos cristais de biotita e quartzo intersticiais, sugerindo deformação em estágio submagmático; C) Aspecto microscópico da textura heterogranular hipidiomórfica em amostra com maior deformação do Ep-BtTnl; D) Porfiroclastos de plagioclásio com caldas de recristalização e cristais de quartzo estirados (*ribbons*) sugerindo que essas rochas sofreram deformação no estágio subsólido, E) Porfiroclastos de microclina subarredondada contornados por finos cristais quartzo-feldspático da segunda geração (textura mantonúcleo); e F) Microfoliação primária dada por alinhamento de prismas subbédricos de plagioclásio e allanita (linha tracejada branca) sofrendo transposição para uma nova direção dada por novos grãos recristalizados de biotita, quartzo e feldspatos (linha tracejada amarela), marcando os eventos de deformação atuantes na área. Legendas: All = Allanita; Bt = biotita; Mc = microclina; Plg = plagioclásio; Qtz = quartzo.

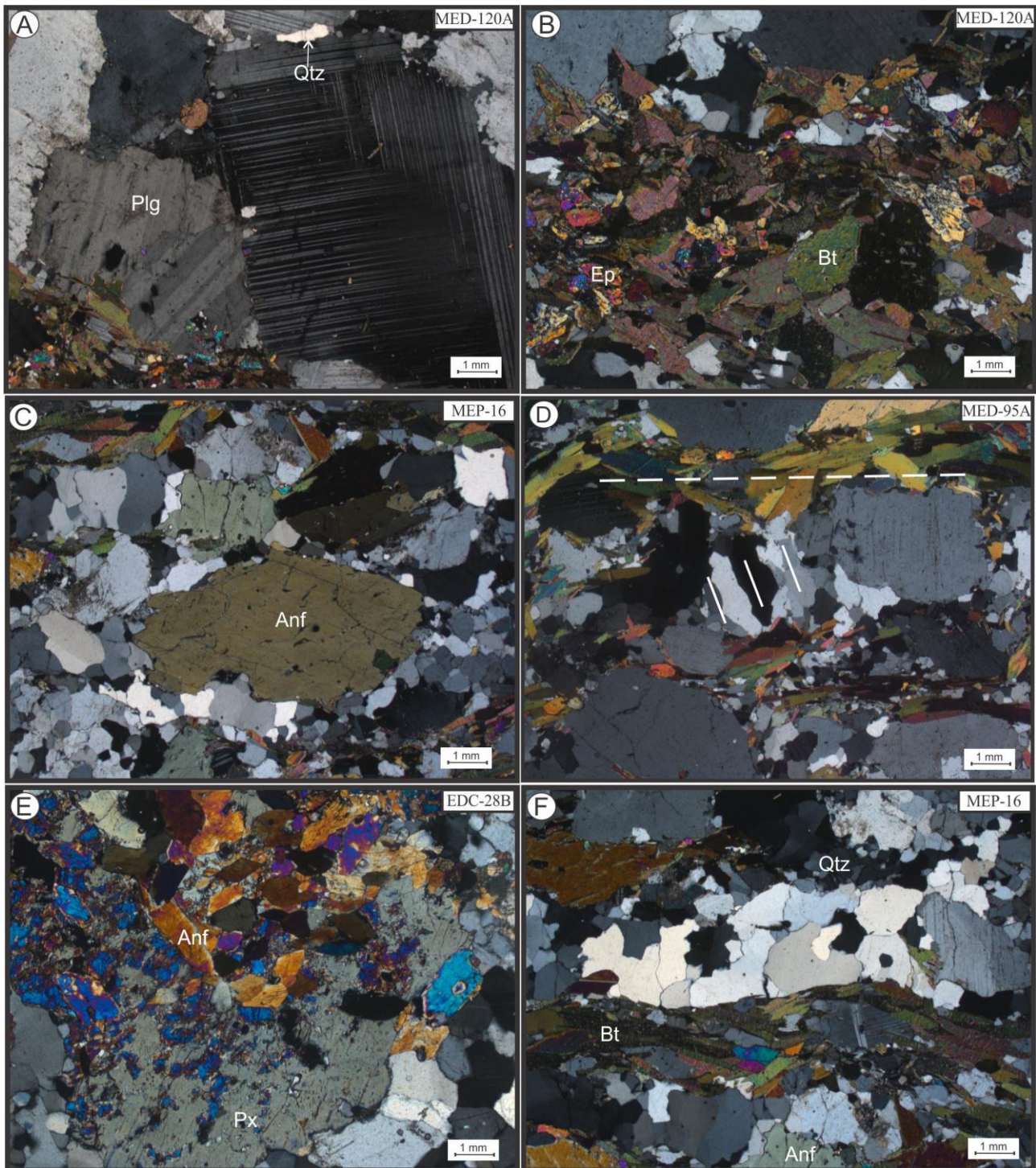


Figura 8 - Aspectos texturais dos *Enclaves*. Fotomicrografias em nicóis cruzados: A) Textura ígnea granular hipidiomórfica preservada evidenciada pelos cristais de plagioclásio prismáticos e quartzo intersticial; B) Agregados de minerais máficos pouco deformados apresentando texturas levemente isotrópicas; C) Textura milonítica com porfiroclasto de anfibólio bordejados por minerais félsicos recristalizados e orientados; D) Foliação milonítica principal (linha tracejada) e foliação oblíqua em quartzo alongado (linhas brancas) indicando senso de cisalhamento sinistral; E) Cristais de piroxênio transformados para finos cristais de anfibólio; e F) Microbandamento composicional entre bandas de composições modais distintas. Legendas: Anf = Anfibólio; Bt = biotita; Ep = Epidoto; Plg = plagioclásio; Px = Piroxênio; Qtz = quartzo.

GEOQUÍMICA

Foram realizadas análises químicas dos elementos maiores, menores e traço em 34 amostras representativas de granitoides TTG e 09 de *enclaves* tonalíticos. Tais análises foram obtidas pela ACME Analytical Laboratories Ltd, sendo que os métodos e limites de detecção utilizados podem ser encontrados no site deste laboratório (www.acmelab.com). Os elementos maiores e menores foram analisados por *Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry* (ICP-ES), enquanto que os elementos-traço foram analisados por *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS).

ELEMENTOS MAIORES E MENORES

Os granitoides TTG mostram conteúdos de SiO₂ variando entre 64,51% e 76,27%, sendo que a variedade tonalítica é mais empobrecida em SiO₂ (64,51-71,17%) em relação aos trondhjemitos (68,34-76,27%). Em geral, os conteúdos de Al₂O₃ são superiores a 15%, os teores de Na₂O variam entre 4,37 e 5,87% e os de K₂O entre 0,73 e 3,20%, resultando em baixos valores da razão K₂O/Na₂O <0,6 (Tabela 4). Semelhantemente aos típicos TTGs arqueanos, as rochas estudadas mostram baixos a moderados conteúdos de Fe₂O₃ e CaO e baixos de MgO (< 2,0%), TiO₂ e somatório de elementos ferromagnesianos (Fe₂O_{3T} + MgO + MnO + TiO₂ <5%, com exceção de algumas amostras da variedade tonalítica). Os tonalitos são mais enriquecidos em elementos compatíveis [Fe₂O₃(1,52-4,31%), MgO (0,45-1,71%), TiO₂ (0,16-0,58%), CaO (2,47-4,96%)], em relação aos trondhjemitos [Fe₂O₃ (0,56-3,31%), MgO (0,10-1,16%), TiO₂ (0,04-0,36%), CaO (2,21-3,18%)]. Os *enclaves* quando comparados aos granitoides TTG, apresentam menores conteúdos de SiO₂ (60,55-67,28%) e maiores de Fe₂O₃ (2,93-6,55%), MgO (2,05-5,82%), CaO (3,32-5,39%) e somatório de elementos ferromagnesianos (Fe₂O₃ + MgO + MnO + TiO₂ < 13%), além de conteúdos semelhantes de Al₂O₃ > 15%, com exceção de duas amostras (EDC-28B e MED-144), Na₂O (3,63%-5,43%), K₂O (1,24-2,88%), valores da razão K₂O/Na₂O <0,6 (Tabela 5). Em termos gerais, tais granitoides TTG mostram correlação negativa com o conteúdo de SiO₂ para os óxidos supracitados (Figuras 9A-9E), exceto para os óxidos de Na e K que mostram maior dispersão (Figuras 9F e 12F). As amostras dos *enclaves* possuem comportamento análogo, distinguindo-se em relação aos teores de Na₂O e K₂O, para os quais nota-se correlação negativa e positiva com o conteúdo de SiO₂, respectivamente.

ELEMENTOS-TRAÇO

Os granitoides TTG possuem baixas concentrações de elementos-traço compatíveis, como Ni (1,6-27,7 ppm), Cr (0,0-37,1 ppm) e V (<8-79 ppm), baixos conteúdos de *High Field Strength Elements* - HFSE [Nb (0,60-6,6 ppm), Ta (0,1-0,8 ppm), Zr (63,1-203,8 ppm), Y (0,9-25,2 ppm) e Hf (1,9-4,4 ppm)], e variáveis de *Large-Ion Lithophile Elements* - LILE, com altos conteúdos de Ba (125-1931 ppm) e Sr (340,2-843,1 ppm) e moderados de Rb (12,3-110,5 ppm). Para estas rochas, nota-se um empobrecimento nos teores de Rb, Nb, Y e nos valores da razão Rb/Sr com o aumento da sílica (Figuras 10A-10D). Por sua vez, os *enclaves* mostram maiores concentrações de Ni (21,4-95,1 ppm), Cr (36,9-319,5 ppm), V (47-124 ppm), conteúdos similares de HFSE [Nb (2,7-10,4 ppm), Ta (0,6-1,3 ppm), Zr (63,3-217,1 ppm), Y (5,4-18,2 ppm), Hf (1,8-5,1 ppm)] e de LILE [Ba (301-1160 ppm), Sr (467,6-784,2 ppm) e Rb (49,9-119,5 ppm)]. Tais grupos de rochas definem *trends* não colineares e paralelos entre si (Figura 10).

Tabela 3 -

(Conclusão)

<i>Enclaves Tonalítico</i>									
Amostras	Anf_BtTn				Bt_AnfTn			Px_AnfTn	Ep_BtQzD
	MED 95A	MED 144	MEP 12B	MEP 12A	MEP 16	MEP 53B	MEP 23B	EDC 28B	MED 120A
SiO ₂	63,80	65,37	65,04	66,78	67,28	60,55	64,36	60,62	63,21
TiO ₂	0,41	0,34	0,37	0,26	0,32	0,66	0,40	0,39	0,53
Al ₂ O ₃	15,60	14,83	15,56	16,39	15,15	17,17	15,66	13,95	17,07
Fe ₂ O _{3T}	5,14	4,59	4,20	2,93	3,64	6,02	4,55	6,55	5,22
MnO	0,09	0,09	0,06	0,04	0,05	0,10	0,05	0,14	0,08
MgO	3,48	3,63	3,47	2,42	2,81	2,36	3,56	5,82	2,05
CaO	3,57	3,32	4,24	3,87	3,68	5,11	4,31	5,39	4,23
Na ₂ O	4,35	3,63	4,08	4,51	4,10	5,43	4,16	4,21	4,54
K ₂ O	2,23	2,88	1,71	1,59	1,83	1,24	1,63	1,47	1,96
P ₂ O ₅	0,20	0,12	0,10	0,10	0,11	0,18	0,12	0,09	0,18
LOI	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70	0,90	0,80	1,10	0,70
Total	99,70	99,64	99,66	99,71	99,69	99,73	99,63	99,77	99,78
Ba (ppm)	334,0	1160,0	687,0	559,0	760,0	427,0	808,0	301,0	325,0
Rb	119,5	114,5	63,1	65,0	73,1	49,9	69,1	62,5	99,6
Sr	467,6	547,4	795,1	784,2	737,1	556,0	794,2	472,3	504,3
Zr	116,1	112,6	119,9	99,8	102,7	217,1	128,6	63,3	165,1
Y	18,7	13,4	6,4	5,4	5,9	18,2	6,0	18,5	13,0
Hf	3,1	3,2	3,3	2,8	2,7	5,1	3,8	1,8	4,3
Nb	8,9	6,3	3,3	2,7	3,6	10,4	3,8	5,6	6,9
Ta	0,7	1,0	0,6	0,6	0,7	1,3	0,5	0,6	0,6
Ni	64,3	95,1	61,9	55,1	57,3	23,3	62,6	32,8	21,4
Cr	207,1	319,5	214,8	140,2	177,9	36,9	222,2	317,8	37,0
Ga	23,4	20,1	18,2	19,5	18,4	23,6	21,1	19,2	25,1
Sc	17,0	18,0	9,0	9,0	8,0	18,0	10,0	21,0	16,0
Th	6,0	4,2	1,9	0,5	3,6	6,0	1,4	1,7	7,5
U	0,4	0,6	0,6	0,3	0,5	3,1	0,3	0,3	0,4
V	83,0	66,0	72,0	47,0	59,0	91,0	76,0	124,0	66,0
La (ppm)	30,50	26,80	15,80	8,70	21,90	25,30	16,50	18,30	30,50
Ce	66,40	44,40	28,20	14,90	41,00	51,90	31,40	42,00	56,00
Pr	7,51	5,60	3,54	1,56	4,18	6,45	3,80	6,21	6,33
Nd	28,80	21,00	13,10	6,30	14,10	26,80	14,80	25,40	21,60
Sm	6,02	3,89	2,41	1,38	2,51	5,06	2,68	5,53	4,56
Eu	0,67	0,80	0,71	0,72	0,71	1,25	0,82	0,72	0,86
Gd	4,97	3,43	2,00	1,37	1,88	4,88	2,17	4,58	3,76
Tb	0,71	0,52	0,26	0,20	0,24	0,67	0,27	0,66	0,51
Dy	3,90	2,65	1,35	1,21	1,30	3,54	1,38	3,66	2,71
Ho	0,66	0,55	0,24	0,21	0,19	0,70	0,24	0,64	0,49
Er	1,76	1,46	0,69	0,58	0,52	1,85	0,71	1,96	1,34
Tm	0,23	0,20	0,09	0,09	0,07	0,23	0,09	0,29	0,18
Yb	1,43	1,22	0,60	0,55	0,52	1,68	0,65	1,78	1,14
Lu	0,18	0,17	0,09	0,08	0,08	0,24	0,08	0,26	0,17
A/CNK	0,97	0,98	0,96	1,01	0,98	0,88	0,95	0,76	0,99
K₂O/Na₂O	0,51	0,79	0,42	0,35	0,45	0,23	0,39	0,35	0,43
Fe₂O_{3T}+MgO+									
MnO+TiO₂	9,12	8,65	8,10	5,65	6,82	9,14	8,56	12,90	7,88
Mg#	57,29	61,04	62,08	62,07	60,47	43,72	60,79	63,78	43,76
Sr/Y	25,01	40,85	124,23	145,22	124,93	30,55	132,37	25,53	38,79
Rb/Sr	0,26	0,21	0,08	0,08	0,10	0,09	0,09	0,13	0,20
Sr/Ba	1,40	0,47	1,16	1,40	0,97	1,30	0,98	1,57	1,55
Nb/Ta	12,71	6,30	5,50	4,50	5,14	8,00	7,60	9,33	11,50
(La/Yb)_N	14,40	14,83	17,77	10,68	28,43	10,16	17,13	6,94	18,06
(La/Sm)_N	3,19	4,34	4,13	3,97	5,49	3,15	3,88	2,08	4,21
Eu/Eu*	0,36	0,66	0,96	1,58	0,96	0,76	1,01	0,43	0,62

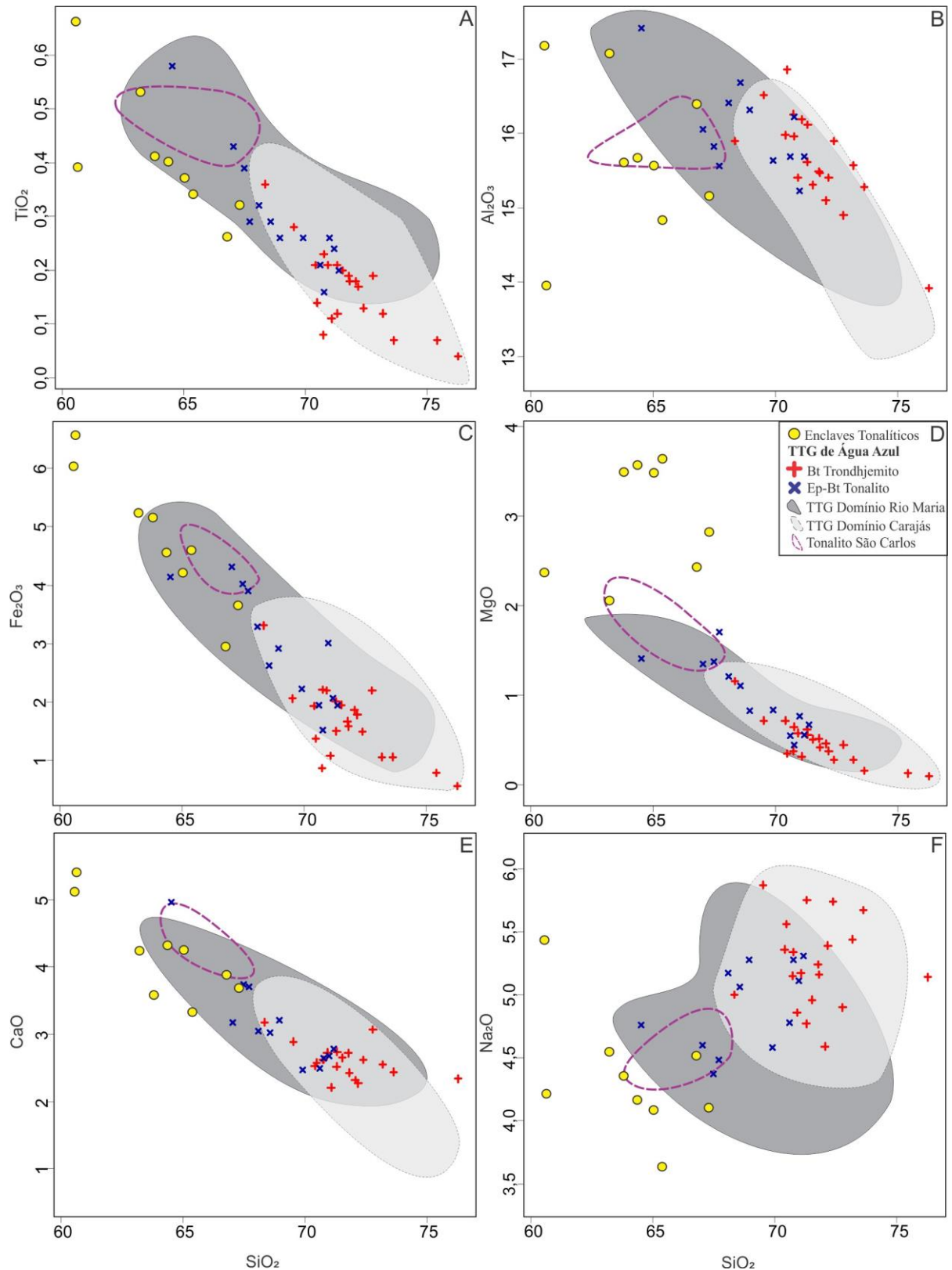


Figura 9 - Diagramas de Harker para elementos maiores para amostras representativas dos granitoides TTG e *enclaves*. Os campos com as amostras das rochas TTG do Domínio Rio Maria (Complexo Tonalítico Caracol, Tonalito Arco Verde, Tonalito Mariazinha, Trondhjemito Mogno e Trondhjemito Água Fria; Almeida *et al.* 2011), do Domínio Carajás (Trondhjemito Rio Verde; Feio *et al.* 2013), Trondhjemito Colorado e rochas afins; Santos *et al.* 2013a; Silva *et al.* 2014; Leite-Santos & Oliveira 2014) e Tonalito São Carlos (Silva *et al.* 2014) são usados para comparações.

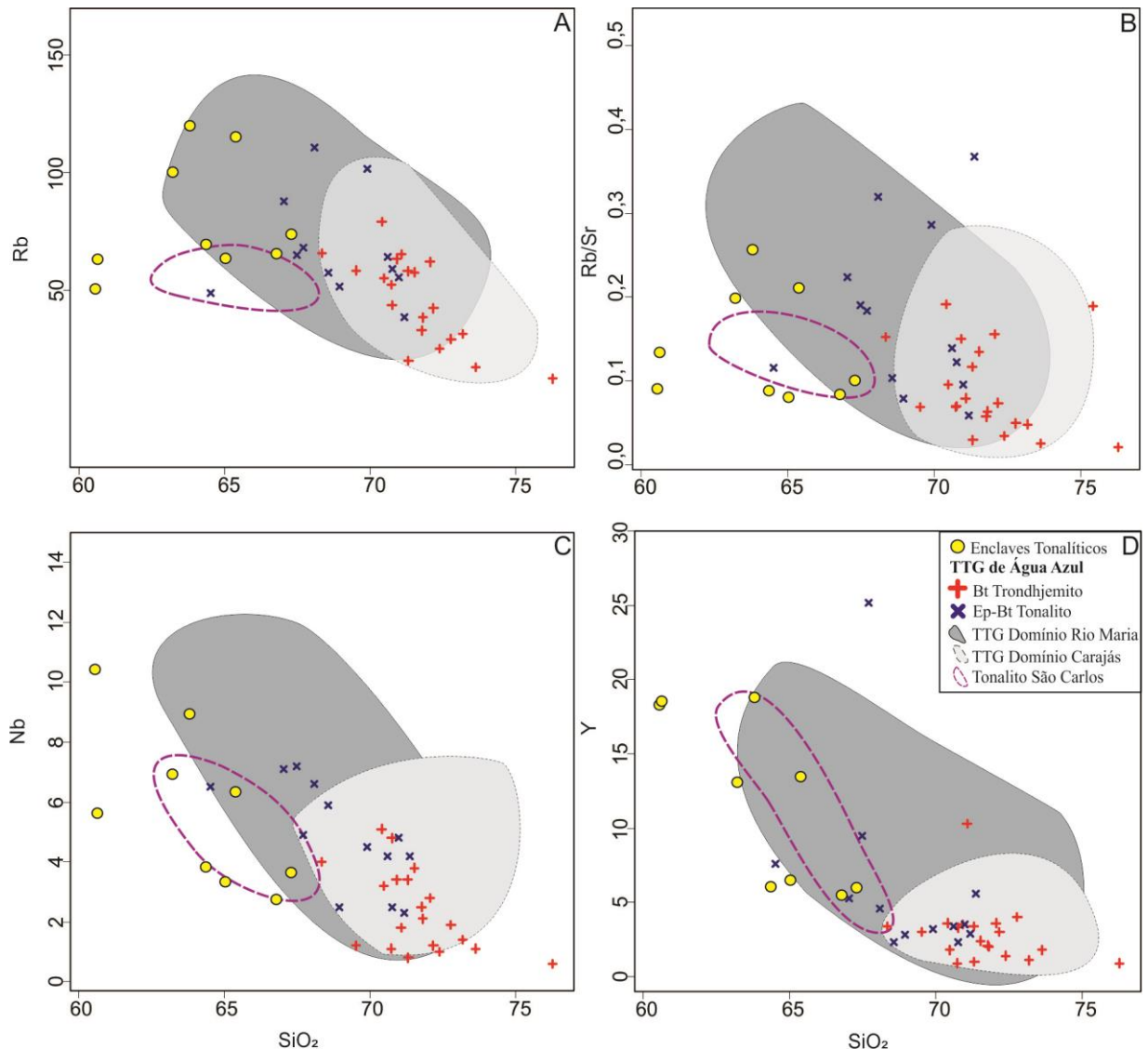


Figura 10 - Diagramas de Harker para os elementos traço das amostras representativas dos granitoides TTG e *enclaves* de Água Azul do Norte.

ELEMENTOS TERRAS RARAS

O comportamento dos Elementos Terras Raras (ETR) foi avaliado em diagramas tipo *spider* (Figura 11) e as amostras testadas foram normalizadas de acordo com os valores dos elementos do condrito de Evensen *et al.* (1978). Os padrões ETR dos granitoides TTG são semelhantes aos encontrados nos típicos TTGs arqueanos (Moyen & Martin, 2012), com moderado fracionamento de elementos terras raras pesados (ETRP) em relação aos leves (ETRL), razões $(La/Yb)_n$ entre 135 - 14, e nulas ou inexpressivas anomalias negativas de Eu, apesar da variedade trondhjemítica mostrar maior fracionamento e padrão côncavo de ETRP [exceto a amostra MDE 77B com razão $(La/Yb)_n$ de 7,54] e anomalias positivas de Eu nas amostras mais fracionadas. No entanto, os padrões ETR das amostras representativas dos *enclaves* são mais horizontalizados do que aqueles identificados nos granitoides TTG, marcados pelo baixo fracionamento de ETRP em relação aos ETRL [razão $(La/Yb)_n$ entre 6,9 e 17,7].

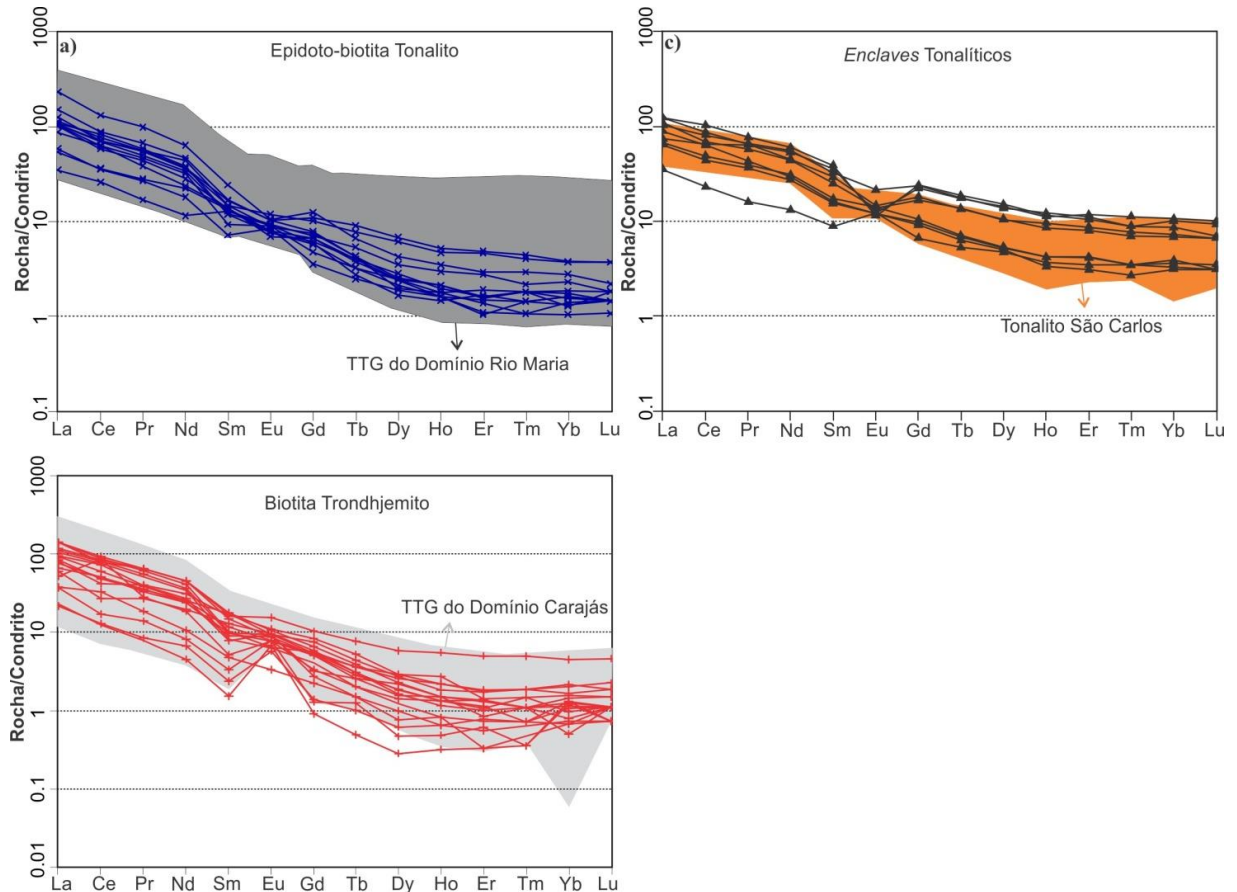


Figura 11 - Padrões de ETR com valores normalizados pelo condrito de Evensen *et al.* (1978), para as variedades petrográficas estudadas: a) fácies epidoto-biotita tonalito; b) fácies biotita trondhjemito; e (c) *enclaves*.

CARACTERIZAÇÃO DA SÉRIE MAGMÁTICA

Para a definição da série magmática dos granitoides TTG e *enclaves* foram utilizados alguns diagramas geoquímicos, como aquele de classificação normativa Ab-An-Or de O'Connor (1965), onde estas rochas incidem predominantemente no campo dos trondhjemitos e tonalitos, respectivamente (Figura 12A). Comportamento similar é observado quando se utiliza o diagrama P-Q (Debon & Le Fort 1983), onde tais granitoides plotam no campo dos tonalitos/trondhjemitos com raras amostras naqueles dos granodioritos e dioritos (Figura 12B). No diagrama AFM (Irvine & Baragar 1971), as amostras analisadas de cada grupo se alinham, em *trends* paralelos, ao da série cálcio-alcálica (Figura 12C). No diagrama de Shand (1950) (Figura 12D), os granitoides TTG mostram composições peraluminosas, enquanto as amostras dos *enclaves* são metaluminosas. Estes granitoides mostram ainda, uma clara similaridade composicional com os granitoides sódicos ou típicos TTGs arqueanos (Martin, 1994), de acordo com o diagrama K-Na-Ca (Barker & Arth 1976; Figura 12E). No diagrama K_2O versus SiO_2 (Peccerillo & Taylor 1976; Figura 12F) as rochas dos granitoides TTG posicionam-se no campo da série cálcio-alcálica de médio-K, porém algumas amostras plotam nos campos da série toleítica, enquanto que os *enclaves* plotam preferencialmente no campo das rochas da série cálcio-alcálica de médio-K.

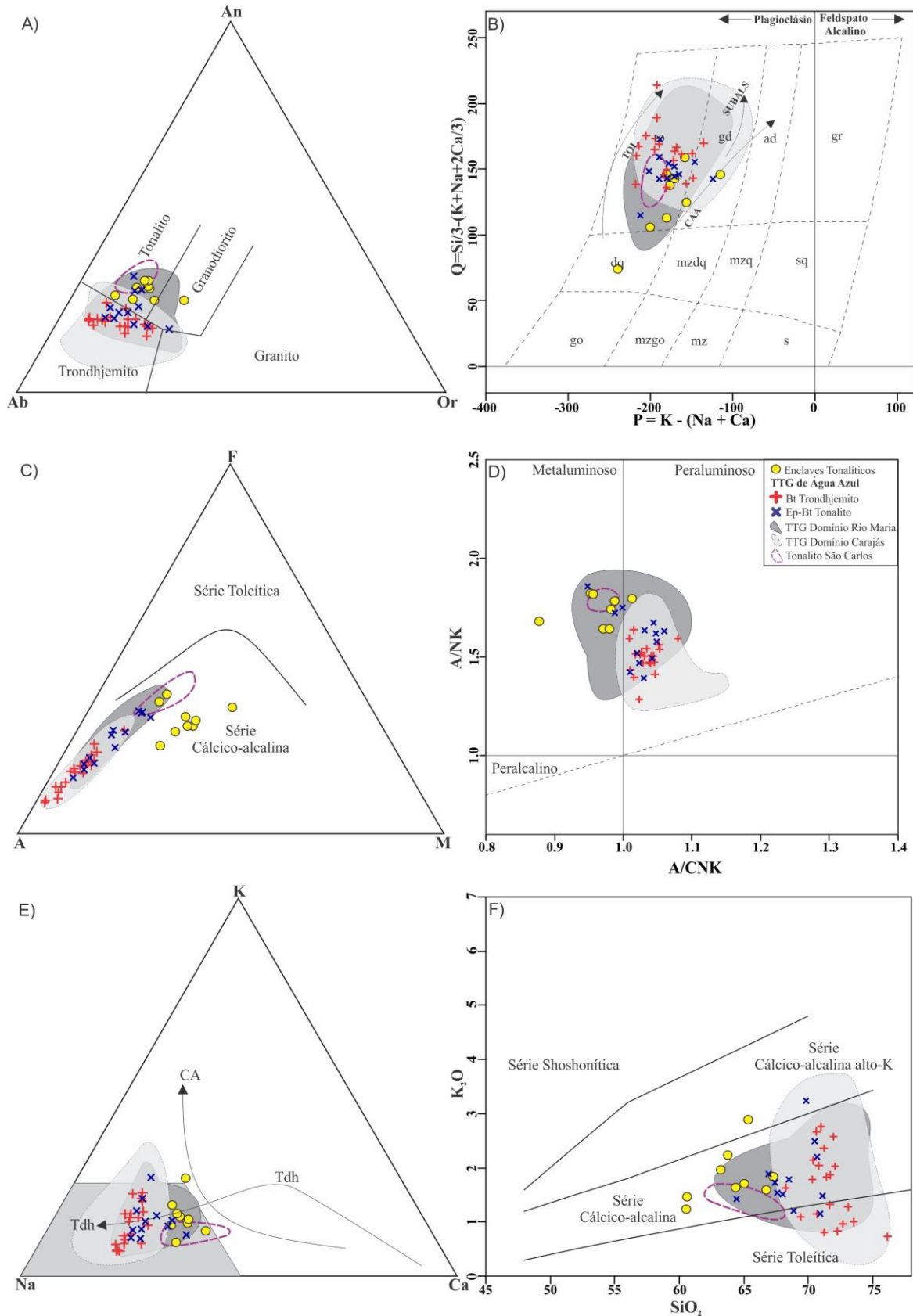


Figura 12 - Diagramas de caracterização geoquímica dos granitoides TTG e *enclaves*: a) diagrama Ab-An-Or normativo (O'Connor 1965); b) diagrama P-Q (Debon & Le Fort 1983), c) diagrama AFM ($A = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; $F = \text{FeO} + 0,9 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; $M = \text{MgO}$ Irvine & Baragar 1971), d) diagrama $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \text{mol}$ vs. $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \text{mol}$ (Shand 1950); e) diagrama K-Na-Ca; campo Tdh dos TTGs típicos (Martin 1994), Tdh = trend trondhjemitico de Barker & Arth (1976) e CA = trend cálcio-alcalino e f) diagrama K_2O vs. SiO_2 (campos de Peccerillo & Taylor 1976).

DISCUSSÃO

COMPARAÇÕES COM OUTRAS OCORRÊNCIAS TTG E DEFINIÇÃO DA NATUREZA DE FORMAÇÃO

Os dados petrográficos e geoquímicos mostram que a crosta TTG de Água Azul do Norte corresponde a uma associação predominantemente trondhjemitica, com tonalitos subordinados e raros granodioritos. Apresenta biotita e epidoto magmático como os principais minerais ferromagnesianos, similarmente ao que é observado nas demais suítes TTG da Província Carajás. No entanto, o conteúdo modal de epidoto, que é mais expressivo em variedades tonalíticas, ocorre em proporções mais elevadas em relação aqueles do DRM (tonalitos Caracol, Arco Verde e Mariazinha). Em termos texturais, as rochas trondhjemiticas de Água Azul do Norte distinguem-se daquelas do Trondhjemitito Mogno do DRM, por não apresentarem cristais de plagioclásio intensamente saussuritizados (descalcificados), conforme descrito por Ronaib & Oliveira (2013) e Guimarães *et al.* (2010).

Os granitoides TTG de Água Azul do Norte mostram fortes afinidades geoquímicas com os TTGs do DC (trondhjemitos Rio Verde, Colorado e de Nova Canadá), apesar de também mostrarem uma forte superposição com o campo definido pelas amostras mais enriquecidas em SiO₂ das associações TTG do DRM (Figuras 9 e 10). No entanto, estes últimos mostram membros menos evoluídos e são mais enriquecidos em Fe₂O_{3t}, MgO, CaO, TiO₂, Rb, Nb e Y, e empobrecidos em SiO₂ em relação as rochas TTG de Água Azul do Norte. Estes, por sua vez, possuem caráter predominantemente peraluminoso que difere daquele meta- a peraluminoso dos TTG do DRM, e as aproximam das rochas do DC. Além disso, o fato de algumas rochas do TTG de Água Azul do Norte apresentarem anomalias positivas de Eu, aliado ao maior empobrecimento em ETRL, o que não é observado naquelas do DRM, pode indicar que houve a desestabilização e remoção da allanita em estágio *subsolidus* nessas rochas, uma vez que este mineral é enriquecido ETRL e apresenta coeficientes de partição menos elevados para Eu e ETRP (Henderson 1984; Hanson 1989). Desta forma, pode-se admitir que a desestabilização da allanita se deu preferencialmente ao longo de zonas de cisalhamento, durante o evento de deformação em estado sólido e de intensa recristalização que afetou o embasamento TTG.

Alguns autores admitem origem para associações TTG a partir de diferentes graus de fusão de uma mesma fonte gerando líquidos independentes que seguem diferentes caminhos de cristalização fracionada (Chappel 2004, Clemens *et al.* 2006). Entretanto, as amostras dos granitoides TTG de Água Azul do Norte apresentam disposição em *trends* colineares (Figuras 9 e 10) indicando que estas podem ser comagmáticas e com aspecto evolutivo marcado pelo fracionamento de biotita e minerais acessórios primários.

Os granitoides TTG identificados neste trabalho são caracterizados por apresentarem médios e altos valores das razões La/Yb e Sr/Y, e baixas de Nb/Ta (Figuras 13A-13C). O grupo de rochas com altos valores das razões La/Yb e Sr/Y se assemelham aquelas do Trondhjemitito Mogno, enquanto que aquelas com valores médios dessas razões são similares às rochas do Trondhjemitito Água Fria, ambos descritos no DRM (Almeida *et al.* 2011; Ronaib & Oliveira 2013). Comportamento similar para estas razões também é observado nas rochas TTG do DC (trondhjemitos Rio Verde, Colorado e de Nova Canadá). A ausência de rochas com baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y, que são frequentes nas unidades tonalíticas do DRM, pode confirmar a afinidade trondhjemitica da crosta TTG de Água Azul do Norte, e que estes segmentos crustais não foram formados por processos inteiramente coincidentes.

O comportamento distinto das razões La/Yb para os granitoides TTG de Água Azul do Norte pode estar relacionado às variações de profundidade e pressão em que seus magmas foram gerados, ou até mesmo à ligeiras diferenças em suas fontes (Moyen *et al.* 2007; Halla *et*

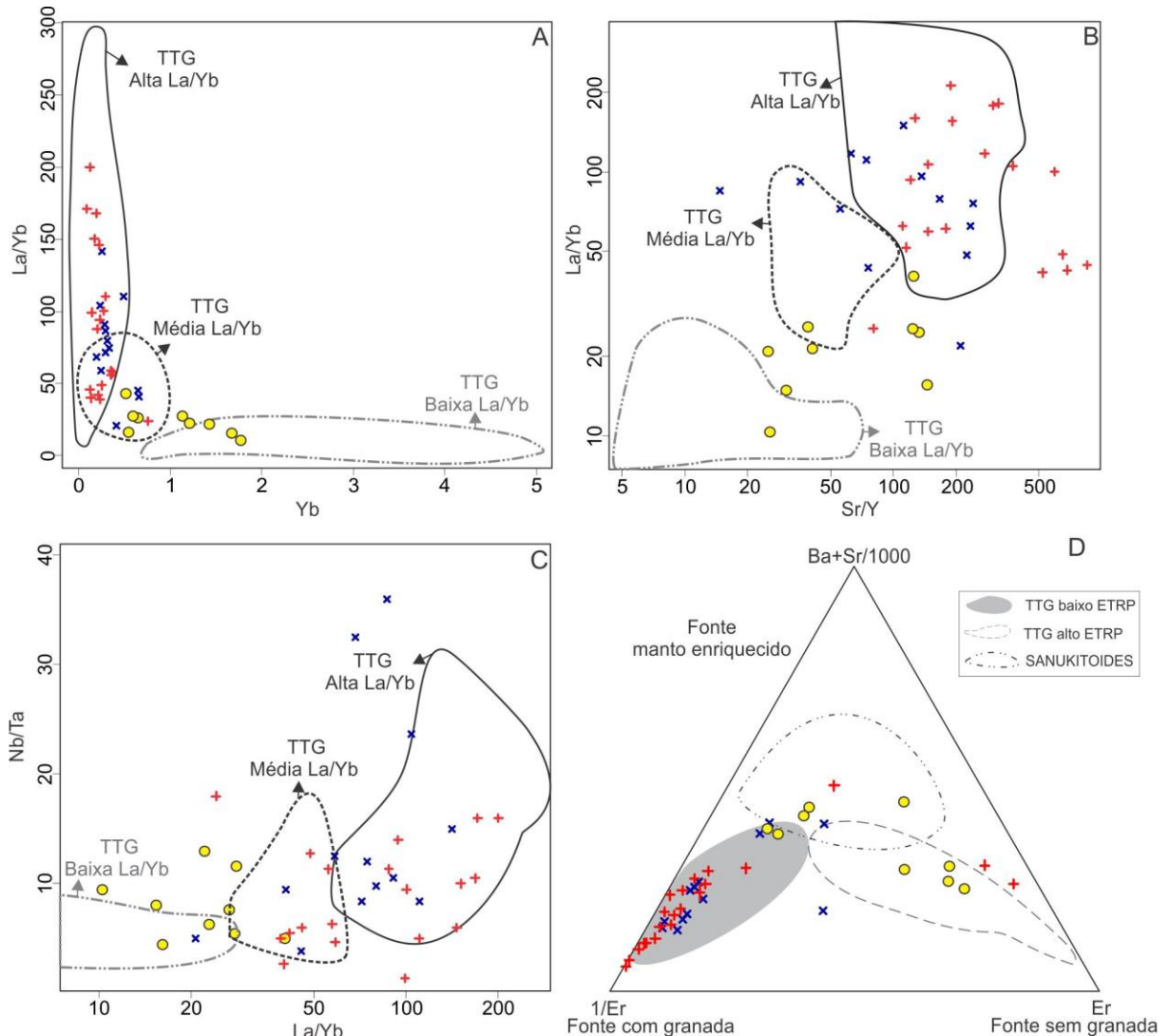


Figura 13 – Diagrama comparativo dos granitoides TTG e *enclaves* de Água Azul do Norte com outros granitoides arqueanos. (A) diagrama Yb vs. La/Yb; B) diagrama Sr/Y vs. La/Yb; C) diagrama La/Yb vs. Nb/Ta - Fonte dos dados (campos): Suítes TTG de Rio Maria (Almeida *et al.* 2011); e D) diagrama triangular (Ba+Sr)/100, Er e 1/Er (Heilimo *et al.* 2010).

al. 2009; Almeida *et al.* 2011). As rochas com altos valores das razões La/Yb e Sr/Y foram provavelmente formadas no campo de estabilidade da granada, em altas pressões (~15 GPa), a partir da fusão parcial de granada anfíbolitos (baixos valores da razão Nb/Ta) em zonas de subducção (Foley *et al.* 2002), enquanto que as amostras com valores médios destas razões foram, provavelmente, formadas em condições de pressão intermediária (~1,0-1,5 GPa), próximo do limite do campo de estabilidade da granada com o plagioclásio (10-15 GPa). No diagrama triangular (Ba+Sr)/100, Er e 1/Er proposto por Heilimo *et al.* (2010), utilizado para diferenciar TTGs (alto ETRP e baixo ETRP) e sanukitoides (Figura 13D), as rochas estudadas incidem sobretudo no campo do TTG de baixo ETRP, confirmando sua evolução controlada pelo fracionamento de granada. Além disso, o padrão côncavo dos ETRP observado na variedade trondhjêmica indica que, para sua geração, o anfibólio pode ter sido uma importante fase fracionante.

Os *enclaves* tonalíticos exibem aspectos texturais semelhantes aos dos granitoides TTG, porém diferem no que diz respeito aos seus aspectos mineralógicos e geoquímicos. Nos *enclaves*, o anfibólio está presente em quantidades expressivas (> 5%), enquanto que nas típicas associações TTG da Província Carajás este mineral é ausente. Estes exibem ainda, conteúdos significativamente mais elevados de Fe₂O_{3t}, MgO, CaO, Ni e Cr, o que reflete seu

caráter menos evoluído quando comparados aos granitoides TTG. Além disso, possuem padrão ETR horizontalizado e suas amostras coincidem com os campos definidos pelos granitoides de médios e baixos valores das razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta do Domínio Rio Maria (Figura 13A-13C), indicando que estas rochas foram geradas a partir de um magma fora do campo de estabilidade da granada, em condições de pressão inferiores àquelas dos granitoides TTG ($\leq 1,0$ GPa). Estas informações também são sugeridas pelo diagrama (Ba+Sr)/100, Er e 1/Er (Heilimo *et al.* 2010), onde tais rochas incidem nos campos do TTG com alto ETRP e sanukitoides (Figura 13D).

Estes *enclaves* não parecem corresponder a uma típica associação TTG, no entanto, possuem fortes afinidades geoquímicas com o Tonalito São Carlos (Figuras 9-12), que contém anfibólio e biotita como os principais minerais ferromagnesianos e por representar fragmentos mais antigos da crosta mesoarqueana no DC (Silva *et al.* 2014). Apesar das semelhanças geoquímicas existentes entre estes granitoides, nota-se que os *enclaves* tendem a ser mais enriquecidos tanto em elementos compatíveis (Fe_2O_3 , MgO, Sr, Ni e Cr) quanto em incompatíveis (Ba e Rb) quando comparados ao Tonalito São Carlos. Levando-se em consideração tais aspectos e utilizando os diagramas classificatórios de Moyen *et al.* (2003), é possível definir esses *enclaves* como afins dos “TTGs enriquecidos” (Figuras 14A e 14B), que segundo este autor, são granitoides de composição intermediária entre os típicos TTG e rochas afins dos sanukitoides. Este comportamento transicional também pode ser identificado quando se observa alguns diagramas utilizados para classificação de granitoides do final do arqueano, como aquele proposto por Laurent *et al.* (2014) (Figuras 14C-14F). No entanto, por fazer parte de uma história evolutiva pretérita ($>2,93$ Ga) pouco conhecida, preservada apenas como restos de crostas, a evolução dos *enclaves* merece ser aprofundada com estudos futuros mais detalhados, tais como geocronológicos e isotópicos.

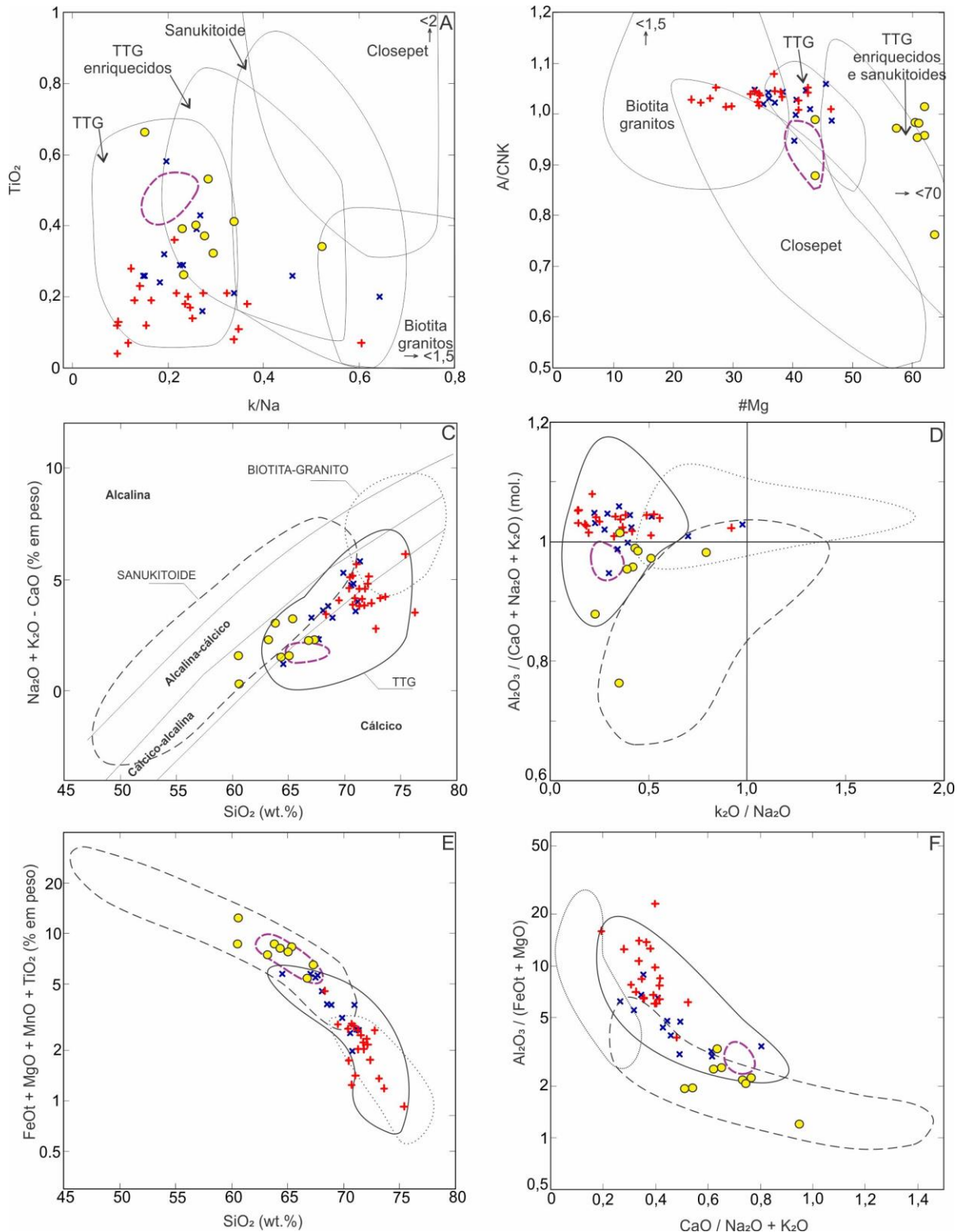


Figura 14 - Diagramas de variação para comparação das associações arqueanas de outros crátons com dos granitoides TTTG e enclaves de Água Azul do Norte, além do Tonalito São Carlos: (A) diagrama K/Na vs. TiO_2 ; (B) diagrama $\#Mg$ vs. A/CNK ; - campos definidos com base em *Moyen et al.* (2003); (C) índice de MALI ($[Na_2O+K_2O]-CaO$) vs. SiO_2 ; diagrama de *Frost et al.* (2001); (D) A/CNK (razão molar $Al_2O_3/[CaO+Na_2O+K_2O]$) vs. razão K_2O/Na_2O ; (E) somatório de ferromagnesianos ($FeOt+MgO+MnO+TiO_2$) vs. SiO_2 ; e (F) Razão $Al_2O_3/(FeOt+MgO)$ vs. razão $CaO/(Na_2O+K_2O)$ (*Laurent et al.* 2014). Campos de sanukitoide, TTTG e biotita-granito compilados de *Martin et al.* 2009; *Moyen* 2011; *Moyen & Martin* 2012.

PADRÃO ESTRUTURAL E CONDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO DOS GRANITOIDES DE ÁGUA AZUL DO NORTE

O mapeamento geológico realizado na área de Água Azul do Norte mostrou a existência de um extenso embasamento mesoarqueano constituído principalmente por granitoides TTG (2,93 Ga, Gabriel *et al.* em preparação), e mais restritamente por metavulcânicas máficas afins da sequência *greenstone belt*. Ambos são intrudidos por leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr (2,87 Ga; Leite-Santos & Oliveira 2016), granodioritos de afinidade sanukitoide (2,87 Ga; Gabriel & Oliveira, 2014) e corpos anfibolíticos e de rochas ultramáficas (Souza 2016) (Figura 2). Pretende-se neste tópico discutir as condições de deformação da crosta TTG desta área, sendo para isso, necessário realizar uma comparação com a natureza e padrão estrutural das demais unidades supracitadas.

A análise estrutural dos granitoides TTG permitiu individualizar dois domínios com intensidades de deformação distintas (DAD e DBD) (Figura 5). A foliação inclinada à subvertical ($> 50^\circ$) é a estrutura mais recorrente nestes granitoides, e aquela com mergulho de baixo ângulo ($< 40^\circ$) é comum ao longo do contato com intrusões leucograníticas (zonas de migmatização). O bandamento composicional preserva um *trend* principal E-W, que é sobreposto, por meio de cisalhamento e transposição, pela foliação contínua com orientações NW-SE, N-S e NE-SW, e milonítica de orientação E-W desenvolvida em zonas de cisalhamento sinistrais.

Os sanukitoides são marcados por uma foliação de fluxo magmático, definida pela orientação de prismas euédricos subparalelos de feldspatos, que é sobreposta pela foliação milonítica de alto ângulo com lineação de estiramento mineral (quartzo-feldspático), associadas às zonas de cisalhamento sinistrais (Gabriel & Oliveira 2014). As estruturas de origem tectônica sobrepõem-se fortemente às de origem magmática e possuem *trends* E-W a WNW-ESE. As mesmas apresentam diferenças no arranjo dentre os dois corpos individualizados. No Sanukitoide Água Limpa, localizado no extremo norte da área, a foliação e lineação mineral mergulham para NNE (cavalgamento), enquanto no Sanukitoide Água Azul, a sul, a foliação de alto ângulo possui mergulho para sul e lineação com inclinação moderada a suave para WSW (deformação oblíqua a transcorrente) (Figura 5A). Porfiroclastos de feldspatos com extinção ondulante e matriz fortemente orientada de novos grãos hexagonais, associada a quartzo *ribbon*, indicam que a deformação nesses granitoides foi controlada por recristalização dinâmica em temperaturas moderadas (Gabriel & Oliveira 2014). O arranjo das foliações miloníticas (E-W e WNW-ESE) representa tramas S-C em escala regional de zonas de cisalhamento sinistrais.

O extenso corpo anfibolítico que secciona a crosta TTG na sua porção centro-oeste possui orientação geral N-S com inflexão para NE (Figura 5A). Apresenta foliações subverticais N-S, E-W a NE-SW de origem submagmática, como indicado pela fraca deformação intracristalina de cristais de plagioclásio zonados e orientados, além da textura subofítica preservada (Souza 2016). No DAD, a forte estruturação deste corpo parece condicionar a colocação de injeções leucograníticas tardias em um *trend* N-S, ao mesmo tempo que as estruturas pretéritas dos granitoides encaixantes sofrem transposição N-S. Ocorrem ainda, encaixados em zonas de cisalhamento na porção central da área, lentes de corpos anfibolíticos com textura milonítica. Estudos termobarométricos indicam pico metamórfico no corpo principal em 2,7 Kbar e 470°C, enquanto que nos corpos milonitizados, 5,0 Kbar e 540°C (Souza 2016).

As intrusões de leucogranodiorito-granitos apresentam foliações definidas tanto por orientação de micas e feldspatos euédricos (magmática), quanto por agregados quartzo-feldspáticos deformados. Tais intrusões registram foliações subverticais com *trends* E-W, NW-SE, N-S e NE-SW. As distribuições dos arranjos estruturais em mapa indicam que as

estruturas das rochas encaixantes exerceram forte controle na colocação e estruturação destes granitoides (Figura 5A). Tal fato pode também ser evidenciado pela ocorrência de bolsões intrusivos concordantes ao bandamento dos granitoides TTG e conectados a veios de direção N-S (Figura 5B). Todas estas observações permitem sugerir que os leucogranodiorito-granitoides são sin a pós-tectônicos em relação ao último ciclo de deformação dúctil registrado na área.

Os dados microestruturais obtidos nos granitoides TTG indicam que a última fase deformacional atuou de forma heterogênea sob condições de fácies anfíbolito médio (até 550°C), próximas daquelas calculadas para as rochas anfíbolíticas (Souza 2016). Nas amostras menos deformadas, a ocorrência de novos grãos hexagonais de quartzo e feldspatos entre os cristais primários pouco deformados deve estar relacionada à recristalização, onde a temperatura exerceu papel mais importante que a deformação. Nas amostras mais deformadas, a ocorrência de agregados granoblásticos orientados de plagioclásio + quartzo \pm microclina e *clusters* de biotita \pm epidoto entre os porfiroclastos, sugerem que a deformação cessou à temperaturas suficientemente altas para promover recuperação e recristalização estática. As rochas extremamente deformadas, quartzo *ribbon* associado a agregados granoblásticos que bordejam porfiroclastos de plagioclásio em caldas assimétricas, indicam a atuação de recristalização dinâmica. Observações de campo sugerem que a fonte desse calor pode ser atribuída às intrusões de leucogranitos que causaram ainda feições de migmatização nas rochas TTG.

MODELO DE DEFORMAÇÃO PARA A ÁREA DE ÁGUA AZUL DO NORTE

Na região de Água Azul do Norte, porção sul do Domínio Carajás, as associações litológicas expostas exibem características semelhantes aos clássicos terrenos granito-*greenstone* descritos em vários cratons arqueanos, e registram importantes processos deformacionais, preservados principalmente, no embasamento TTG. Neste, o bandamento composicional E-W (S_n) representa a estruturação original do batólito, gerada durante sua colocação (~2,93 Ga) dentro de um modelo de deformação com um forte componente de cisalhamento puro (compressão) em condições submagmáticas. Estas estruturas provavelmente foram originadas durante o ciclo tectônico mais antigo encontrado nestas rochas e registram um primeiro momento de deformação (**D1**). No entanto, levando em consideração o alto grau de deformação dúctil que afetou este corpo, não se descarta a possibilidade de que padrões estruturais mais antigos (p.ex. N-S), atribuídos às estruturas dômicas de associações TTG de outras áreas da Província Carajás (Althoff *et al.* 2000; Leite 2001; Domingos 2009), possam ainda existir nos granitoides TTG estudados.

As foliações contínuas são provavelmente cogenéticas e produtos da transposição tanto por cisalhamento simples (rotação) e puro das estruturas pretéritas e possuem padrões NW-SE, N-S, NE-SW e até E-W em arranjos anastomóticos de foliação. Tais estruturas podem ser atribuídas a uma fase tardia de deformação (**D2**) de caráter dúctil que afetou as rochas TTG e foi distribuída de forma heterogênea, especialmente no DAD (Figura 5A). Estas são associadas às bandas de cisalhamento dextrais N-S e sinistrais NW-SE e NE-SW, além de dobras assimétricas. A foliação milonítica (S_m), limitada à porção centro-oeste da área, mostra trama planar e linear subparalela ao bandamento composicional e é marcadora de zonas de concentração de deformação. Estas parecem fazer parte da mesma foliação anastomótica da fase D2, possivelmente nos estágios finais da deformação. Neste contexto, os *trends* E-W associados à principal posição do bandamento na área foram apenas acentuados e reativados pela deformação dúctil subsequente, exercendo forte influência para o desenvolvimento das zonas de cisalhamento tardias de mesma orientação.

As feições estruturais mencionadas acima sugerem intensa partição da deformação no corpo TTG estudado, onde nota-se que as anisotropias que controlaram o desenvolvimento da

fase D2 podem ser atribuídas, além do bandamento magmático, à presença de litotipos distintos (anfíbolitos) na crosta TTG, os quais forneceram o contraste reológico necessário para o desenvolvimento de estruturas anômalas (foliações N-S mais jovens) dentro de um contexto de deformação dúctil regional. As intrusões tardias de leucogranitos registram estruturas com orientações similares às identificadas para o evento D2 nas rochas encaixantes e seu caráter sin a pós-tectônico sugerem que o mesmo tenha idade mesoarqueana (2,87 Ga).

A direção de encurtamento inferida mostra-se similar em todos os momentos de deformação e a orientação dos tensores X e Y variadas. Durante **D1** Z: ~N10-20°E e X: subvertical (lineação subvertical) e em **D2** Z: ~N10-20°E e X: sub-horizontal (como inferido pela disposição de bandas de cisalhamento conjugadas ilustrado no encarte da Figura (5A). Os momentos de deformação D1 e D2, uma vez que os vetores de convergência responsáveis por suas gêneses são coincidentes, devem então ser compreendidos em termos de incremento de deformação até alcançar a estruturação final (deformação finita progressiva).

A atuação conjunta de componentes direcionais associadas com deslocamentos verticais é característica de modelos de transpressão, como discutido por Robin & Cruden (1994), Tikoff & Fossen (1993), entre outros. O modelo de deformação regional por transpressão sinistral adotado para o embasamento da porção sul da Bacia Carajás (Pinheiro & Holdsworth 2000; Domingos 2009) e DRM (Althoff *et al.* 2000) mostra-se coincidente com aquele que deu origem às estruturas da crosta TTG de Água Azul do Norte, onde as mesmas exibem evidências de achatamento e atuação de componentes de cisalhamento simples subsequentes. Dentro deste contexto, as bandas de cisalhamento sinistrais e dextrais identificadas no DAD e associadas ao evento D2, são geometricamente comparáveis às falhas sintéticas (R e P) e antitéticas (R') do modelo de cisalhamento de Riedel, respectivamente, com vetor de encurtamento NNE-SSW para a origem destas estruturas.

O modelo de deformação responsável pela edificação das estruturas da crosta TTG, também pode ser aplicado para explicar diferenças no arranjo das estruturas nos demais litotipos. Nos *plutons* sanukitoides da porção norte e sul da área, as lineações são perpendiculares e subparalelas à foliação, que pode ser explicado pela partição da deformação entre zonas de cisalhamento com dominância de componente de cisalhamento puro e simples, respectivamente. Aliado ao fato de que, a crosta TTG detém estruturas que caracterizam a atuação de componentes compressivos e oblíquos, é proposto que durante a transpressão, a deformação sofreu particionamento com o total do componente de cisalhamento simples acomodado por zonas de cisalhamento, e as regiões de menor deformação, que ocorrem entre estas zonas, são controladas por cisalhamento puro, que tende a ser dominante na porção norte da área.

CONCLUSÕES

A crosta TTG da área de Água Azul do Norte são predominantemente trondhjemítica, com tonalitos subordinados. Essas rochas se dispõem em *trends* colineares, indicado que são comagmáticas e evoluíram pelo fracionamento de biotita e minerais acessórios primários. Mostram fortes afinidades geoquímicas com as demais ocorrências TTG do DC (trondhjemitos Rio Verde, Colorado e de Nova Canadá) e diferem daqueles do DRM (tonalitos Caracol, Arco Verde, Mariazinha, trondhjemitos Mogno e Água Fria) por apresentarem termos mais evoluídos, conteúdos menos expressivos de minerais acessórios primários e serem essencialmente peraluminosas, com ausência de plagioclásio intensamente descalcificado (Trondhjemito Mogno).

Os granitoides TTG apresentam médios e altos valores das razões La/Yb e Sr/Y, e baixos de Nb/Ta. Isto sugere que tais rochas foram formadas a partir da fusão parcial de uma fonte metamáfica, em condições de altas a intermediárias pressões (~1,0-1,5 GPa), ainda no campo de estabilidade da granada. Condições análogas são atribuídas para a formação dos

trondhjemitos Mogno e Água Fria do DRM (Almeida *et al.* 2011; Ronaib & Oliveira 2013) e daqueles do DC (Leite-Santos & Oliveira 2014). A ausência de rochas com baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y, que são frequentes nas unidades tonalíticas do DRM, pode confirmar a afinidade trondhjêmica da crosta TTG de Água Azul do Norte, e que estes segmentos crustais não foram formados por processos tectono-magmáticos inteiramente coincidentes.

Os *enclaves* possuem características mineralógicas e geoquímicas particulares, que não permitem associá-los às típicas associações TTG. Nestes, o anfibólio está presente em quantidades expressivas (> 5%), exibem conteúdos elevados de Fe₂O₃, MgO, CaO, #Mg, Ni e Cr, e ainda, um padrão ETR horizontalizado (baixos valores da razão La/Yb), o que reflete seu caráter menos evoluído quando comparados aos granitoides TTG. Os baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y indicam que estas rochas foram geradas fora do campo de estabilidade da granada, em condições de pressão inferiores àquelas dos granitoides TTG ($\leq 1,0$ GPa), e que representariam magmas de comportamento transicional entre os típicos TTGs e sanukitoides, originados a partir de mudança progressiva entre as duas séries, conforme discutido por Moyen *et al.* (2003). O caráter menos evoluídos dos *enclaves* em relação às rochas do Tonalito São Carlos, que até então representaria o fragmento mais antigos da crosta mesoarqueana no DC (Silva *et al.* 2014), juntamente com seu padrão estrutural caótico, sugere que estes possam representar partes preservadas de uma crosta ainda mais antiga.

As interpretações dos dados estruturais sugerem que a crosta TTG registram pelo menos dois importantes momentos de deformação com eixos de encurtamento principal coincidentes (N10-20°E). O primeiro momento (**D1** ~2,93 Ga) é evidenciado pelo bandamento composicional (E-W) gerado por um forte componente de cisalhamento puro durante a colocação dos granitoides TTG. A fase tardia de deformação dúctil (**D2** ~2,87 Ga), dada sob condições de metamorfismo de fácies anfibolito médio (550°C), é marcada pela transposição de cisalhamento simples e puro das estruturas pretéritas, e que deram origem aos padrões de foliação NW-SE, N-S, NE-SW e E-W. Bandas de cisalhamento dextrais N-S e sinistrais NW-SE e NE-SW, e zonas de cisalhamento sinistrais E-W, também ocorrem associadas. Esse momento de deformação está diretamente ligado às intrusões tardias de leucogranitos sin a pós-tectônicos de idade mesoarqueana.

O modelo de deformação regional por transpressão sinistral com partição da deformação é adotado para as rochas do embasamento mesoarquano da região de Água Azul do Norte, semelhante ao que foi estabelecido para o embasamento da Bacia Carajás (Pinheiro & Holdsworth 2000) e DRM (Althoff *et al.* 2000). A deformação transpressiva identificada na área sugere que as convergências de placas foram atuantes durante o período de 2,93 e 2,87 Ga na porção sul da Província Carajás, onde o encurtamento horizontal de uma crosta dúctil moldou o terreno de afinidade granito-*greenstone*. Admite-se que durante a última fase da transpressão, o *strain* foi particionado, com a tensão total de cisalhamento simples acomodado em zonas e bandas de cisalhamento. Uma consequência disso seria a preservação de regiões de baixa deformação entre zonas de cisalhamento, com termos relativamente dominados por achatamento.

Os dados geológicos obtidos neste trabalho revelaram que a porção sul do DC possui uma evolução complexa, ainda não totalmente esclarecida. No entanto, a existência de uma expressiva crosta TTG na região de Água Azul do Norte distinta daquela do DRM, aliado a um complexo padrão deformacional que quase sempre está associado a processos de migmatização, sugerem que ao menos esta porção do DC, não representa uma extensão do DRM, e que aliado à ausência de registros da atuação de eventos neoarqueanos, também não estaria em conformidade com a redefinição desta área como parte do Subdomínio Sapucaia, como proposto por Dall'Agnol *et al.* (2013). Além disso, a intensa deformação e metamorfismo na fácies anfibolito indicam um nível de exposição crustal mais profundo para as rochas de Água Azul do Norte em relação aquele até então identificado no DRM. As

feições estruturais e composicionais caracterizadas nos TTGs desta área denunciam que a mesma possa representar um fragmento mesoarqueano independente, sem conexão com o segmento crustal de Rio Maria e que foi incorporado tectonicamente ao então conhecido DC. Tal hipótese poderá ser reforçada, quando tais informações forem confrontadas aos dados isotópicos a serem obtidos para o embasamento TTG de Água Azul do Norte.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides da Universidade Federal do Pará (GPPG-UFPA), pelo apoio nas diversas etapas deste trabalho; ao Instituto de Geociências (IG) e ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo suporte técnico; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor; e ao projeto CNPq Universal (Proc. 485806/2013-4) e 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).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A., 1981. Brazilian structural Provinces: an introduction. *Earth Science Review*, **17**:1-29.
- Almeida J.A.C., Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Borges R.M.K. 2008. *Relatório de mapeamento geológico na escala 1:100.000 da Folha Marajoara (SB-22-ZC V)*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 147p. (Programa Geobrasil).
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, **120**(3):235–257.
- Almeida J.A.C., Dall'agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**(1):201-221.
- Almeida J.A.C., Dall'agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.
- Althoff F.J., Barbey P., Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research*, **104**(3):187-206.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge João X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: 7º Congresso Latino-Americano de Geologia, SBG-NO, Belém. *Anais*. p. 324-333.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. Rio de Janeiro: CPRM. 136p. (Relatório Final).

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

Barker F. & Arth J.G. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemitic-basalt suites. *Geology*, **4**(10):596-600.

Blenkinsop T.G. 2000. *Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 150p.

Chappell, B.W. 2004. Towards a unified model for granite genesis. *Geological Society of America Special Papers*, **389**:1-10.

Clemens J.D., Yarranton L.M., Stevens G. 2006. Barberton (South Africa) TTG magmas: geochemical and experimental constraints on source-rock petrology, pressure of formation and tectonic setting. *Precambrian Research*, **151**(1):53-78.

Costa J.B.S., Araújo J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M., 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, **7**:199-235.

Cunha I.R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province – Amazonian Craton: implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**:100-121.

Dall'agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. In: Dall'Agnol R.; Rosa-Costa L.T.; Klein E.L. (eds.). *Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton*. Abstracts Volume and Field Trips Guide. Belém: PRONEX-UFPA/SBG-NO. p. 150.

Dall'Agnol R. & Oliveira D.C., 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos* **93**(3):215–233.

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

Debon F. & Le Fort P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **73**(3):135-149.

Domingos F.H.G. 2009. *The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego Sequeirinho deposits, Carajás – Brazil*. PhD thesis, Department of Earth Sciences, University of Durham, Durham. 483p.

Evensen N.M., Hamilton P.T., O'niions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42**(8):1199-1212.

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Oliveira D.C., Santos R.D., Santos P.A. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos*, **151**:57-73.

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

Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, **417**:637-640.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, **42**:2033–2048.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geocronológica de ortopiroxênio-trondhjemitos (leucoenderbitos) da região de Vila Cedere III, Canaã dos Carajás-PA, Província Mineral de Carajás. In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém. *Anais*. CDROM.

Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2014. Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos de alto magnésio da região de Água Azul do Norte, porção sul do Domínio Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Ciências Naturais. **9**(3):533-564.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Galarza M.A., Santos M.S., 2015. Geocronologia e aspectos estruturais dos sanukitoides mesoarqueanos da Área de Água Azul do Norte: Implicações para a história evolutiva a porção sul do Domínio Carajás. In: 14° Simpósio de Geologia da Amazônia, Marabá (PA), CD-ROM.

Gabriel E.O. 2017. *Petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte - PA*, Província Carajás. PhD Thesis, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. In press.

Guimarães F.V., Dall'agnol R., Almeida J.A.C., Oliveira M.A. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do Trondhjemitos Mogno e Tonalito Mariazinha, Terreno Granito-Greenstone mesoarqueano de Rio Maria, SE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**(2):196-211.

Halla J., van Hunen J., Heilimo E., Hölttä P., 2009. Geochemical and numerical constraints on neoproterozoic plate tectonics. *Precambrian Research*, **174**:155–162.

Hanson G.N., 1989. An approach to trace element modeling using a simple igneous system as an example. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. **21**(1): 79-97.

Harker A. 1965. *The natural history of igneous rocks*. New York, Macmillan, 384p.

Heilimo E., Halla J., Hölttä P. 2010. Discrimination and origin of the sanukitoid series: Geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos* **115**:27–39.

Henderson, P., 1984. *Rare earth element geochemistry*: New York, Elsevier, p 1-510.

- Irvine T.N. & Baragar W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of the Earth Sciences*, **8**:523-547.
- Lafon J.M., Macambira M.J.B., Pidgeon R.T. 2000. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). In: 31^o International Geological Congress, Rio de Janeiro, *Abstracts*. CD-ROM.
- Lameyre J., Bowden P. 1982. Plutonic rock type series: discrimination of various granitoid series and related rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **14**:169-186.
- Laurent O., Martin H., Moyon J.F., Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, **205**:208-235.
- Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. PhD Thesis, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 330p.
- Leite A.A.S., Dall’agnol R., Macambira J.B., Althoff F.J. 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.
- Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2014. Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* **9**(3):635-659.
- Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2016. Geologia, petrografia e geoquímica das associações leucograníticas arqueanas da área de nova Canadá – Domínio Carajás. *Boletim IG-USP - Série Científica*, **16**(2):37-66.
- Le Maitre R.W. 2002. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. London, 2nd Edition, 193 p.
- Macambira M.J.B. & Lancelot J. 1991. Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do Estado do Pará. In: RBG, 3^o Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, *Resumos Expandidos*, p.49-58.
- Macambira M.J.B. & Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi*, **7**:263-288.
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the gneisses of continental crust. In: Condie K.C. (Ed.): *Developments in Precambrian Geology: Archean Crustal Evolution*, 11, Amsterdam, Elsevier. p. 205-259.
- Martin H., Moyon J.F., Rapp R.P. 2009. The sanukitoid series: magmatism at the Archean-Proterozoic transition. *Geological Society of American Special Papers*, **472**:15-33.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Amaral W.S., Santos T.J.S., Juliani C., Souza Filho C.R. 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 metallogenetic implications. *Mineralium Deposites*, **46**(3):789-811.

- Moyen J.F.; Martin H.; Jayananda M.; Peucat J.J. 2003. Magmatism during the accretion of the late Archaean Dharwar Craton (South India): sanukitoids and related rocks in their geological context. *In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France. Abstracts*, p. 516.
- Moyen J.F., Stevens G., Kisters A.F., Belcher, R.W. 2007. TTG Plutons of the Barberton Granitoid-Greenstone Terrain, South Africa. *Developments in Precambrian Geology*, **15**:607-667.
- Moyen J.F. 2011. The composite Archaean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth. *Lithos*, **123**:21-36.
- Moyen J. F. & Martin H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, **148**:312-336.
- O'connor J.T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Papers B*, **525**:79-84.
- Oliveira M.A., Dall'agnol R., Althoff F.J. & Leite A.A.S., 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite Greenstone Terrain, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**(2): 146-160.
- Oliveira D.C., Santos P.J.L., Gabriel E.O., Rodrigues D.S.; Faresin A.C., Silva M.L.T., Sousa S.D., Santos R.V., Silva A. C., Souza M.C., Santos R.D., Macambira M.J.B. 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, *In: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém (PA), CD-ROM*.
- Oliveira M.A., Dall'agnol R., Almeida J.A.C. 2011. Petrology of the Mesoarchean Rio Maria suite and the discrimination of sanukitoid series. *Lithos*, **127**:192-209.
- Passchier C.W., Trouw R.A.J. 2005. *Microtectonics*, Germany, 2nd ed., *Springer-Verlag*, 366p.
- Paterson S.R., Vernon R.H., Tobisch O.T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, **11**:349-364.
- Peccerillo A. & Taylor S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **58**(1):63-81.
- Pimentel M.M. & Machado N., 1994. Geocronologia U-Pb dos Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *In: SBG, 38° Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos*, p.390-391.
- Pinheiro, R.V.L. & Holdsworth, R.E., 2000. Evolução Tectonoestratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(4):597-606.
- Rivalenti G., Mazzuchelli M., Girardi V.A.V., Cavazzini G., Finatti C., Barbieri M.A., Teixeira W., 1998. Petrogenesis of the paleoproterozoic basaltic-andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian Craton. *Lithos*, **43**:235-265.
- Robin, P.Y.F. & Cruden A.R. 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. *Journal of Structural Geology*. **16**:447-466.

- Rodrigues D.S, Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do granito mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará - Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* **9**(3):597-633.
- Rolando A.P & Macambira M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. *In: 4° South American Symposium on Isotope Geology, Salvador. Expanded Abstracts, CD-ROM.*
- Ronaib C. & Oliveira D.C. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica das associações TTG e leucogranodioritos do extremo norte do Domínio Rio Maria, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* **8**(3):383-415.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M. & Gonçalves J.H. (Eds.): Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Serviço Geológico do Brasil, Brasília p. 169-226.*
- Santos M.J.P., Lamarão C.N., Lima P.H.A., Galarza M.A., Mesquita J.C.L. 2013a. Granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do estado do Pará: petrografia, geoquímica e geocronologia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, **8**(3):325-354.
- Santos P.A., Teixeira M.F.B., Dall'agnol R., Guimarães F.V. 2013b. Geologia, petrografia e geoquímica da associação tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) do extremo leste do Subdomínio de Transição, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, **8**(3):257-290.
- Santos M.N., & Oliveira D.C. 2016. Rio Maria granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte - Carajás province: Petrography, geochemistry and implications for sanukitoid petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*. Submitted.
- Shand S.J. 1950. *Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit*. London, 4 ed., 488p.
- Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G., 1974. Folha SB-22 Araguaia e parte da SC-22 Tocantins. Geologia. *In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SC-22 Tocantins. Geologia, Geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME. DNPM. v. 4, p.1-143. (Levantamento de Recursos Naturais).
- Silva A.C., Dall'agnol R., Guimarães F.V., Oliveira D.C. 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.
- Silva F.F., Oliveira D.C., Antônio P.Y.J., D'Agrella M.S., Lamarão C.N. 2016. Bimodal magmatism of the Tucumã area, Carajás province: U-Pb geochronology, classification and processes. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**:95-114.
- Souza S.Z., Dall'agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M, 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic constrasts on the Archean evolution of the Rio Maria Granite Greenstone Terrain and the Carajás block. *In: SBG, 1° Symposium on Archean Terranes of South America Platform, Brasília. Extended Abstracts p. 31-32.*

Souza Z.S., Potrel A., Lafon J.M., Althoff F.J., Pimentel M.M., Dall'agnol R., Oliveira C.G., 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**(3):293-315.

Souza D.B. 2016. *Geologia, geoquímica e mineralogia dos corpos anfibolíticos de Água Azul do Norte: Condições de metamorfismo e implicações tectônicas para o Domínio Sapucaia - Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

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

Teixeira M.F.B., Dall'agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 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.

Tikoff B. & Fossen H. 1993. Simultaneous pure shear and simple shear: the unifying deformation matrix. *Tectonophysics*, **217**(3-4):267-283.

Throw A.J.R., Passchier C.W., Wiersma D.J. 2010. *Atlas of mylonites and related microstructures*. Springer Science & Business, 322p.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.M.G., Ricci P.S.F., Barbosa J.P.O., Klein E.L., Lopes E.C.S., Macambira E.M.B., Chaves C.L., Carvalho J.M.A., Oliveira J.G.F., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Unidades litoestratigráficas. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*. Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM.

Vernon R.H. 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Visual Geosciences*, **5**(2):1-23.

CAPÍTULO III

3 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das observações de campo, dos dados petrográficos, estruturais e geoquímicos gerados e discutidos neste trabalho, e integrados como aqueles disponíveis na literatura, foi possível estabelecer um novo quadro geológico para a área de Água Azul do Norte, com mudanças significativas ao que foi sugerido anteriormente. Dentro do que era considerado como domínio de ocorrência dos granitoides do Complexo Xingu foram individualizadas, uma extensa crosta formada por granitoides TTG e *enclaves* associados, ambos alvos do presente trabalho. Além dessas unidades foram mapeados corpos de leucogranodioritogranitos, granitoides de alto-Mg de afinidade sanukitoide, corpos anfibolíticos e lentes expressivas de actinolita-xistos afins da sequência *greenstone belt*.

As rochas que constituem a crosta TTG da área de Água Azul do Norte são predominantemente trondhjemiticas, com tonalitos subordinados e raros granodioritos. Estas dispõem-se em *trends* colineares, indicado que são comagmáticas e evoluíram pelo fracionamento de biotita e minerais acessórios primários. Apresentam aspectos estruturais e composicionais que permitem associá-las às típicas suítes TTG arqueanas. Mostram fortes afinidades geoquímicas com as demais ocorrências TTG do DC (trondhjemitos Rio Verde, Colorado e de Nova Canadá) e diferem daqueles do DRM (tonalitos Caracol, Arco Verde, Mariazinha, trondhjemitos Mogno e Água Fria) por apresentarem termos mais evoluídos, conteúdos menos expressivos de minerais acessórios primários e serem essencialmente peraluminosas, com ausência de plagioclásio intensamente descalcificados (Trondhjemitos Mogno).

Os granitoides TTG apresentam médios e altos valores das razões La/Yb e Sr/Y, e baixos de Nb/Ta. Isto indica que tais rochas foram formadas a partir da fusão parcial de uma fonte metamáfica, em condições de altas a intermediárias pressões (~1,0-1,5 GPa), ainda no campo de estabilidade da granada. Condições análogas são atribuídas para a formação dos trondhjemitos Mogno e Água Fria do DRM (Almeida *et al.* 2011; Ronaib & Oliveira 2013) e daqueles do DC (Leite-Santos & Oliveira 2014). A ausência de rochas com baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y, que são frequentes nas unidades tonalíticas do DRM, pode confirmar a afinidade trondhjemitica da crosta TTG de Água Azul do Norte, e que estes segmentos crustais não foram formados por processos tectono-magmáticos inteiramente coincidentes.

Os *enclaves* tonalíticos possuem características mineralógicas e geoquímicas particulares, que não permitem associá-los às típicas associações TTG. Nestes, o anfibólio

está presente em quantidades expressivas ($> 5\%$), exibem conteúdos elevados de Fe_2O_3 , MgO , CaO , $\#\text{Mg}$, Ni e Cr , e ainda, um padrão ETR horizontalizado (baixas razões La/Yb), o que reflete seu caráter menos evoluído quando comparados aos granitoides TTG. Os baixos valores das razões La/Yb e Sr/Y indicam que estas rochas foram geradas fora do campo de estabilidade da granada, em condições de pressão inferiores às das dos granitoides TTG ($\leq 1,0$ GPa), e que representariam magmas de comportamento transicional entre os típicos TTGs e sanukitoides, originado a partir de mudança progressiva entre as duas séries, conforme discutido por Moyen *et al* (2003). O caráter menos evoluído dos *enclaves* em relação às rochas do Tonalito São Carlos, que até então representaria o fragmento mais antigos da crosta mesoarqueana no DC (Silva *et al.* 2014), juntamente com seu padrão estrutural caótico, sugere que estes possam representar partes preservadas de uma crosta ainda mais antiga.

As interpretações dos dados estruturais sugerem que a crosta TTG registram pelo menos dois importantes momentos de deformação atuantes na área e que apresentam eixos de encurtamento principal coincidentes ($\text{N}10\text{-}20^\circ\text{E}$). O primeiro momento (**D1** $\sim 2,93$ Ga) é evidenciado pelo bandamento composicional (E-W) gerado por um forte componente de cisalhamento puro durante a colocação dos granitoides TTG. A fase tardia de deformação dúctil (**D2** $\sim 2,87$ Ga), dada sob condições de metamorfismo de fácies anfibolito médio (550°C), é marcada pela transposição de cisalhamento simples e puro das estruturas préteritas, e que deram origem aos padrões de foliação NW-SE, N-S, NE-SW e E-W. Bandas de cisalhamento dextrais N-S e sinistrais NW-SE e NE-SW, e zonas de cisalhamento sinistrais E-W, também ocorrem associadas. Esse momento de deformação está diretamente ligado às intrusões tardias de leucogranitos sin a pós-tectônicos de idade mesoarqueana.

O modelo de deformação regional por transpressão sinistral com partição da deformação é adotado para as rochas do embasamento mesoarquano da região de Água Azul do Norte, semelhante ao que foi estabelecido para o embasamento da Bacia Carajás (Pinheiro & Holdsworth, 2000) e DRM (Althoff *et al.* 2000). A deformação transpressiva identificada na área sugere que as convergências de placas foram atuantes durante o período de 2,93 e 2,87 Ga na porção sul da Província Carajás, onde o encurtamento horizontal de uma crosta dúctil moldou o terreno de afinidade granito-*greenstone* estudado. Admite-se que durante a última fase da transpressão, o *strain* foi particionado, com a tensão total de cisalhamento simples acomodado em zonas e bandas de cisalhamento. Uma consequência disso seria a preservação de regiões de baixa deformação entre zonas de cisalhamento, com termos relativamente dominados por achatamento.

Os dados geológicos obtidos neste trabalho revelaram que a porção sul do DC possui uma evolução complexa, ainda não totalmente esclarecida. No entanto, a existência de uma expressiva crosta TTG na região de Água Azul do Norte distinta daquela do DRM, aliado a um complexo padrão deformacional que quase sempre está associado a processos de migmatização, sugerem que ao menos esta porção do DC, não representa uma extensão do DRM, e que aliado à ausência de registros da atuação de eventos neoarqueanos, também não estaria em conformidade com a redefinição desta área como parte do Subdomínio Sapucaia, como proposto por Dall’Agnol *et al.* (2013). Além disso, a intensa deformação e metamorfismo na fácies anfibolito indicam um nível de exposição crustal mais profundo para as rochas de Água Azul do Norte em relação aquele até então identificado no DRM. As feições estruturais e composicionais caracterizadas nos TTGs desta área denunciam que a mesma possa representar um fragmento mesoarqueano independente, sem conexão com o segmento crustal de Rio Maria e que foi incorporado tectonicamente ao então conhecido DC. Tal hipótese poderá ser reforçada, quando tais informações forem confrontadas aos dados isotópicos a serem obtidos para o embasamento TTG de Água Azul do Norte.

REFERÊNCIAS

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A., 1981. Brazilian structural Provinces: an introduction. *Earth Science Review*, **17**:1-29.
- Almeida J.A.C., Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Borges R.M.K. 2008. *Relatório de mapeamento geológico na escala 1:100.000 da Folha Marajoara (SB-22-ZC V)*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 147p. (Programa Geobrasil).
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, **120**(3):235–257.
- Almeida J.A.C., Dall'agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**(1):201-221.
- Almeida J.A.C., Dall'agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.
- Althoff F.J., Barbey P., Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research*, **104**(3):187-206.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge João X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: 7º Congresso Latino-Americano de Geologia, SBG-NO, Belém. *Anais*. p. 324-333.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. Rio de Janeiro: CPRM. 136p. (Relatório Final).
- Avelar, V.G. 1996. *Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia oriental*. MS Dissertation, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 149p.
- Barbosa J.P.O. 2004. *Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitoides da região do Igarapé Gelado, Norte da Província Mineral de Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 96p.
- Barker F. & Arth J.G. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemitic-basalt suites. *Geology*, **4**(10):596-600.
- Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Krimski R., Macambira M.J. B. 2001. Pb-Pb and zircon ages of archean sytectonic granites of the Carajás metallogenic province, Northern Brazil. In: Serviço Nacional de Geologia e Mineral, 3º Simpósio Sul-americano de Geologia Isotópica, Pucon, Chile. *Resumos expandidos*. 1 CD-ROM.

Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Macambira M.J.B., Barbey P., Boullier A.M. 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**(6):1423-1440.

Blenkinsop T.G. 2000. *Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 150p.

Chappell, B.W. 2004. Towards a unified model for granite genesis. *Geological Society of America Special Papers*, **389**:1-10.

Chayes F. 1956. *Petrographic modal analysis: an elementary statistical appraisal*. New York, John Wiley e Sons. 113p.

Clemens J.D., Yearron L.M., Stevens G. 2006. Barberton (South Africa) TTG magmas: geochemical and experimental constraints on source-rock petrology, pressure of formation and tectonic setting. *Precambrian Research*, **151**(1):53-78.

Costa J.B.S., Araújo O.J. B., Jorge João X.S., Maia R., Macambira E.M.B., Vale A.G., Santos A., Pena Filho J.I.C., Neves A.P. 1994. Panorama tectono-estrutural da região sudeste do Estado do Pará. *In: SBG, 4º Simpósio Geologia da Amazônia. Resumos*, Belém. p. 314-317.

Costa J.B.S., Araújo J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M., 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, **7**:199-235.

Cunha I.R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province – Amazonian Craton: implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**:100-121.

Dall'agnol R., Teixeira N. P., Råmo O. T., Moura C. A. V., Macambira M. J. B., Oliveira D. C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, **80**(1):101-129.

Dall'agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. *In: Dall'Agnol R.; Rosa-Costa L.T.; Klein E.L. (eds.). Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Abstracts Volume and Field Trips Guide*. Belém: PRONEX-UFPA/SBG-NO. p. 150.

Dall'agnol R. & Oliveira D.C., 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos* **93**(3):215–233.

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

Debon F. & Le Fort P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **73**(3):135-149.

DOCEGEO, 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: 35º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém. *Anais*. p. 10-54. (Anexo aos anais, CVRD, Belém, p.11-59.

Domingos F.H.G. 2009. *The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego Sequeirinho deposits, Carajás – Brazil*. PhD thesis, Department of Earth Sciences, University of Durham, Durham. 483p.

Evensen N.M., Hamilton P.T., O’niions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42**(8):1199-1212.

Feio G.R.L., Dall’Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Oliveira D.C., Santos R.D., Santos P.A. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos*, **151**:57-73.

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

Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, **417**:637-640.

Fossen H. tradução: Andrade R.D.F. 2012. *Geologia Estrutural*. São Paulo, Editora Oficina de Textos, 584p.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, **42**:2033–2048.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geocronológica de ortopiroxênio-trondhjemitos (leucoenderbitos) da região de Vila Cedere III, Canaã dos Carajás-PA, Província Mineral de Carajás. In: 45º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém. *Anais*. CDROM.

Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2014. Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos de alto magnésio da região de Água Azul do Norte, porção sul do Domínio Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Ciências Naturais. **9**(3):533-564.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Galarza M.A., Santos M.S., 2015. Geocronologia e aspectos estruturais dos sanukitoides mesoarqueanos da Área de Água Azul do Norte: Implicações para a história evolutiva a porção sul do Domínio Carajás. In: 14º Simpósio de Geologia da Amazônia, Marabá (PA), CD-ROM.

Gabriel E.O. 2017. *Petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte - PA*, Província Carajás. PhD Thesis, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. In press.

- Gomes A.C.B. 2003. *Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides de Canaã dos Carajás, SE do Estado do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 160p.
- Guimarães F.V., Dall’agnol R., Almeida J.A.C., Oliveira M.A. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do Trondhjemitó Mogno e Tonalito Mariazinha, Terreno Granito-Greenstone mesoarqueano de Rio Maria, SE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. **40**(2):196-211.
- Halla J., van Hunen J., Heilimo E., Hölttä P., 2009. Geochemical and numerical constraints on neoproterozoic plate tectonics. *Precambrian Research*, **174**:155–162.
- Hanson G.N., 1989. An approach to trace element modeling using a simple igneous system as an example. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. **21**(1): 79-97.
- Harker A. 1965. *The natural history of igneous rocks*. New York, Macmillan, 384p.
- Heilimo E., Halla J., Hölttä P. 2010. Discrimination and origin of the sanukitoid series: Geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos* **115**:27–39.
- Henderson, P., 1984. *Rare earth element geochemistry*: New York, Elsevier, p 1-510.
- Hibbard M.J. 1995. *Mixed magma rocks. Petrography to Petrogenesis*. New Jersey, Prentice-Hall, 587p.
- Hutchison C.S. 1974. *Laboratory handbook of petrography techniques*. London, John Wiley e Sons, 527p.
- Huhn S.B., Macambira M. J. B., Dall’agnol R. 1999. Geologia e geocronologia Pb/Pb do granito alcalino arqueano Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás – PA. In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia. *Anais*. v. 1, p. 463-466.
- Irvine T.N. & Baragar W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of the Earth Sciences*, **8**(5):523-548.
- Jorge João X.S., Neves A.P., Leal J.W.L. 1982. Ouro da Serra Pelada: aspectos da geologia e garimpagem. In: SBG, 1º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais*. **2**:52-62.
- Lafon J.M., Macambira M.J.B., Pidgeon R.T. 2000. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). In: 31º International Geological Congress, Rio de Janeiro. *Abstracts*. CD-ROM.
- Lameyre J., Bowden P. 1982. Plutonic rock type series: discrimination of various granitoid series and related rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **14**:169-186.
- Laurent O., Martin H., Moyen J.F., Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, **205**:208-235.

Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. PhD Thesis, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 330p.

Leite A.A.S., Dall'agnol R., Macambira J.B., Althoff F.J. 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.

Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2014. Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* **9**(3):635-659.

Leite-Santos P.J. & Oliveira D. C. 2015. Leucogranitos arqueanos de Água Azul Do Norte – Província Carajás. In: 14º Simpósio de Geologia da Amazônia, Marabá (PA), CD-ROM.

Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2016. Geologia, petrografia e geoquímica das associações leucograníticas arqueanas da área de nova canadá – Domínio Carajás. *Boletim IG-USP - Série Científica*, **16**(2):37-66.

Le Maitre R.W. 2002. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. London, 2nd Edition, 193 p.

Lima F.D.E. & Pinheiro R.V.L. 2001. Formação Gorotire: considerações sobre uma unidade siliciclástica particular da Serra dos Carajás-PA. In: Reis N. J. E., Monteiro M. A. S. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Manaus, SBG. v.2. p. 201-224.

Lindenmayer Z.G. 1990. *Salobo Sequence, Carajás, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism*. PhD Thesis, The University of Western Ontario, Ontario, 406p.

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

Macambira M.J.B. & Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi*, **7**:263-288.

Machado N.; Lindenmayer Z.; Krogh T. E.; Lindenmayer D. 1991. U-Pb Geochronology of Archean Magmatism and Basement Reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*. **49**(3-4):329-354.

Mackenzie W.S.; Donaldson C.H.; Guilford C. 1982. *Atlas of igneous rocks and textures*. London, Longman. 148p.

Marangoanha B. & Oliveira D.C. 2014. Diabásios e anfibolitos da área de Nova Canadá: natureza e implicações tectônicas para a Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, **9**(3):565-596.

Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the gneisses of continental crust. In: Condie K.C. (Ed.): *Developments in Precambrian Geology: Archean Crustal Evolution*, 11, Amsterdam, Elsevier. p. 205-259.

- Martin H., Moyen J.F., Rapp R.P. 2009. The sanukitoid series: magmatism at the Archaean-Proterozoic transition. *Geological Society of American Special Papers*, **472**:15-33.
- Medeiros Filho C.A. & Meireles E.M. 1985. Dados preliminares sobre a ocorrência de cromita na área de Luanga. *In: SBG, 2º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Atlas*, v.3, p.1488-149.
- Meireles, E.M., Hirata, W.K., Amaral, A.F., Medeiros Filho, C.A., Gato, W.C., 1984. Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, estado do Pará. *In: SBG, 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. Anais*, v.5, p. 2164-2174.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Amaral W.S., Santos T.J.S., Juliani C., Souza Filho C.R. 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 metallogenetic implications. *Mineralium Deposites*, **46**(3):789-811.
- Moyen J.F.; Martin H.; Jayananda M.; Peucat J.J. 2003. Magmatism during the accretion of the late Archaean Dharwar Craton (South India): sanukitoids and related rocks in their geological context. *In: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France. Abstracts*, p. 516.
- Moyen J.F., Stevens G., Kisters A.F., Belcher, R.W. 2007. TTG Plutons of the Barberton Granitoid-Greenstone Terrain, South Africa. *Developments in Precambrian Geology*, **15**:607-667.
- Moyen J.F. 2011. The composite Archaean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth. *Lithos*, **123**:21-36.
- Moyen J. F. & Martin H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, **148**:312-336.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás. Redescrição e redefinição. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, **7**:177-197.
- O'Connor, J.T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Papers B*, **525**:79-84.
- Oliveira M.A., Dall'agnol R., Althoff F.J. & Leite A.A.S., 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite Greenstone Terrain, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**(2): 146-160.
- Oliveira D.C., Santos P.J.L., Gabriel E.O., Rodrigues D.S.; Faresin A.C., Silva M.L.T., Sousa S.D., Santos R.V., Silva A. C., Souza M.C., Santos R.D., Macambira M.J.B. 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, *In: SBG, 45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém (PA), CD-ROM*.
- Oliveira M.A., Dall'agnol R., Almeida J.A.C. 2011. Petrology of the Mesoarchean Rio Maria suite and the discrimination of sanukitoid series. *Lithos*, **127**:192-209.
- Passchier C.W. & Trouw R.A.J. 2005. *Microtectonics*, Germany, 2nd ed., *Springer-Verlag*, 366p.
- Paterson S.R., Vernon R.H., Tobisch O.T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. *Journal of Structural Geology*, **11**:349-364.

- Peccerillo A. & Taylor S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **58**(1):63-81.
- Pimentel M.M. & Machado N., 1994. Geocronologia U-Pb dos Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. In: SBG, 38° Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. *Boletim de Resumos Expandidos*, p.390-391.
- Pinheiro, R.V.L. & Holdsworth, R.E., 2000. Evolução Tectonoestratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(4):597-606.
- Ragland P.C. 1989. *Basic analytical Petrology*. New York, Oxford University Press.
- Rivalenti G., Mazzuchelli M., Girardi V.A.V., Cavazzini G., Finatti C., Barbieri M.A., Teixeira W., 1998. Petrogenesis of the paleoproterozoic basaltic-andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian Craton. *Lithos*, **43**:235-265.
- Robin, P.Y.F. & Cruden A.R. 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. *Journal of Structural Geology*. **16**:447-466.
- Rodrigues D.S, Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do granito mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará - Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Ciências Naturais **9**(3):597-633.
- Rolando A.P & Macambira M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: 4° South American Symposium on Isotope Geology, Salvador. *Expanded Abstracts*, CD-ROM.
- Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Zimbabwe, Geochemistry Series Longman, p.1-344.
- Ronaib C. & Oliveira D.C. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica das associações TTG e leucogranodioritos do extremo norte do Domínio Rio Maria, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Ciências Naturais **8**(3):383-415.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M. & Gonçalves J.H. (Eds.): *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Serviço Geológico do Brasil, Brasília p. 169-226.
- Santos M.J.P., Lamarão C.N., Lima P.H.A., Galarza M.A., Mesquita J.C.L. 2013a. Granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do estado do Pará: petrografia, geoquímica e geocronologia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Ciências Naturais, **8**(3):325-354.
- Santos P.A., Teixeira M.F.B., Dall'agnol R., Guimarães F.V. 2013b. Geologia, petrografia e geoquímica da associaçãostonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) do extremo leste do Subdomínio de Transição, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Ciências Naturais, **8**(3):257-290.
- Santos P. A., Feio G. R. L., Dall'agnol R., Costi H. T., Lamarão C. N., Galarza M. A., 2013c. Petrography, magnetic susceptibility and geochemistry of the Rio Branco Granite, Carajás Province, southeast of Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **43**(1):2-15.

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

Sardinha A.S., 2002. *Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás*. PhD Thesis, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 118p.

Sardinha A.S., Dall'Agnol R., Gomes A.C.B., Macambira M.J.B., Galarza M.A., 2004. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em zircão de granitoides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. In: SBG, 42º Congresso Brasileiro de Geologia, CD-ROM.

Shand S.J. 1950. *Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit*. London, 4th ed., 488p.

Silva G.G., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G., 1974. Folha SB-22 Araguaia e parte da SC-22 Tocantins. Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL. *Folhas SC-22 Tocantins. Geologia, Geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME. DNPM. v. 4, p.1-143. (Levantamento de Recursos Naturais).

Silva A.C., Dall'agnol R., Guimarães F.V., Oliveira D.C. 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.

Silva F.F., Oliveira D.C., Antônio P.Y.J., D'Agrella M.S., Lamarão C.N. 2016. Bimodal magmatism of the Tucumã area, Carajás province: U-Pb geochronology, classification and processes. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**:95-114.

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

Souza Z.S., Potrel A., Lafon J.M., Althoff F.J, Pimentel M.M., Dall'agnol R., Oliveira C.G., 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**(3):293-315.

Sousa S. D., Monteiro L.V.S., Oliveira D.C., Juliani C., Delinardo M.A.S., Moreto C.P.N., 2014. O Greenstone Belt Sapucaia, Província Carajás: Evidências de platôs oceânicos vinculados a plumas mantélicas. In: SBG, 47º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, *Anais*. CD-ROM.

Souza D.B. 2016. *Geologia, geoquímica e mineralogia dos corpos anfíbolíticos de Água Azul do Norte: Condições de metamorfismo e implicações tectônicas para o Domínio Sapucaia - Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

Streckeiesen A. 1976. To each plutonic rocks its proper name. *Earth-Science reviews*, p. 12:1-33.

Stevens, R.E., Nell, S.T., Roberson, C.E., 1960. Gravimetric conversion factors, and other data used in interpreting analyses of rocks, minerals and waters. *GeoTimes*, 4(7):41.

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

Teixeira M.F.B., Dall'agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 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.

Tikoff B. & Fossen H. 1993. Simultaneous pure shear and simple shear: the unifying deformation matrix. *Tectonophysics*, 217(3-4):267-283.

Throw A.J.R., Passchier C.W., Wiersma D.J. 2010. *Atlas of mylonites and related microstructures*. Springer Science & Business, 322p.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.M.G., Ricci P.S.F., Barbosa J.P.O., Klein E.L., Lopes E.C.S., Macambira E.M.B., Chaves C.L., Carvalho J.M.A., Oliveira J.G.F., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Unidades litoestratigráficas. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*. Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM.

Vernon R.H. 2000. Review of microstrutural evidence of magmatic and solid-state flow. *Visual Geosciences*, 5(2):1-23.