



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 485

**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA E MINERALOGIA DOS CORPOS
ANFIBOLÍTICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE: CONDIÇÕES
METAMÓRFICAS E IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA O
DOMÍNIO SAPUCAIA - PROVÍNCIA CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

DIWHEMERSON BARBOSA DE SOUZA

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

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Lena Virgínia Soares Monteiro (USP)

**BELÉM
2016**

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

Souza, Diwhemerson Barbosa de, 1990-

Geologia, geoquímica e mineralogia dos corpos anfibolíticos de Água Azul do Norte: condições metamórficas e implicações tectônicas para o Domínio Sapucaia – Província Carajás / Diwhemerson Barbosa de Souza. – 2016.

xi, 61 f.: il.; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Davis Carvalho de Oliveira

Coorientadora: Lena Virginia Soares Monteiro

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2016.

1. Geoquímica – Carajás, Serra dos (PA). 2. Anfibolito – Carajás, Serra dos (PA). 3. Geologia estratigráfica - Arqueano. I. Título.

CDD 22. ed. 551.9098115



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

**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA E MINERALOGIA DOS CORPOS
ANFIBOLÍTICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE: CONDIÇÕES
METAMÓRFICAS E IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS PARA O
DOMÍNIO SAPUCAIA - PROVÍNCIA CARAJÁS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
DIWHEMERSON BARBOSA DE SOUZA

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

Data de Aprovação: 09 / 11 / 2016

Banca Examinadora:


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


Prof. Dr. Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb
(Membro-UFPA)


Prof. Dr. Zorano Sérgio de Souza
(Membro-UFRN)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a colaboração de várias pessoas e instituições, às quais quero expressar meus sinceros agradecimentos:

- À Universidade Federal do Pará, pela infraestrutura disponibilizada pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG);

- A CAPES, pela concessão de bolsa de estudo de mestrado no período de 2014 a 2016;

- Aos projetos de pesquisa VALE-FAPESPA (Edital 01/2010 - ICAFF 053/2011), INCT/GEOCIAM (Proc. N°573733/2008-2) e CNPq Universal (proc. N°485806/2013-4), pelo apoio financeiro nas etapas do trabalho;

- À minha família, por todo apoio e compreensão ao longo desses anos;

- Ao orientador Dr. Davis Carvalho de Oliveira e a Co-Orientadora Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro, pela oportunidade, apoio e orientação ao longo desse trabalho;

- Ao professor Dr. Nilson Francisquini Botelho, que cedeu o espaço e disponibilizou o Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UNB);

- Aos geólogos Bhrenno Marangoanha, Eleilson Gabriel e Soraya Damasceno pelo auxílio e disposição, fundamentais durante o desenvolvimento do trabalho;

- A todos integrantes do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), pela companhia e auxílio durante esses dois anos, em especial, aos amigos da Sala 3/PPGG.

- Aos professores do PPGG, pelo conhecimento transmitido;

- Aos funcionários do Instituto de Geociências/UFPA, pela dedicação e atenção;

- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução desse trabalho.

“A sabedoria é a meta da alma humana; mas a pessoa, à medida que em seus conhecimentos avança, vê o horizonte do desconhecido cada vez mais longe”.

Heráclito

RESUMO

Os distintos corpos metamáficos identificados na área de Água Azul do Norte, porção centro-sul do Domínio Carajás, são intrusivos em um conjunto de granitoides TTG e compreendem duas variedades: (i) actinolita anfíbolito, que ocorre como um corpo alongado de orientação N-S e inflexão para NE, com ~17 km de extensão, constituído essencialmente por plagioclásio e anfíbólio, com relíquias de cristais de piroxênio e plagioclásio ígneos caracterizando textura blasto-subofítica; e (ii) diopsídio anfíbolito, de ocorrência restrita, que aflora como pequenos corpos lenticulares, anastomosados e de orientação NW-SE, que apresenta textura nematoblástica e porfiroblástica, foliação milonítica e pares S-C. As paragêneses minerais reconhecidas nessa unidade incluem: Plg+Amph+Di+Ilm, que representa o pico metamórfico, e Plg+Amph+ Ep+Clz+Tit+Ap+Qtz+Ser, relacionada ao retrometamorfismo. O plagioclásio do actinolita anfíbolito varia de oligoclásio cálcico a labradorita cálcica (An₂₈₋₆₅), sendo que as composições mais cálcicas destes cristais representam heranças ígneas. O plagioclásio do diopsídio anfíbolito possui composição química mais homogênea e é classificado como andesina sódica (An₃₁₋₃₅). O anfíbólio do actinolita anfíbolito apresenta-se zonado, com razão Mg/Fe mais elevada em relação ao anfíbólio do diopsídio anfíbolito, sendo classificado como Mg-hornblenda, tschermakita, actinolita e edenita. No diopsídio anfíbolito, o anfíbólio apresenta razão Mg/Fe levemente menor, além de conteúdos de Al^{VI} de ~0,4 e de Fe³⁺ entre 0,7 e 0,8, o que permite classificá-lo como Mg-hastingsita. Considerando os dados químicos, o protólito dessas rochas apresenta composição compatível com a de basaltos toleíticos, padrão multielementar de toleítos continentais (diopsídio anfíbolito) e toleítos de baixo K (actinolita anfíbolito), as razões de elementos incompatíveis (HFSE) sugerem fonte derivada do manto primitivo, com mudanças significativas na composição do magma devido à interação com a crosta continental e/ou a litosfera subcontinental. As evidências químico-mineralógicas e texturais indicam que o protólito do actinolita anfíbolito sofreu deformação em estágio submagmático e, posteriormente, deformação no estado sólido em profundidades rasas. Em contrapartida, o diopsídio anfíbolito foi submetido a regime de deformação dúctil em maior profundidade. A trajetória metamórfica do actinolita anfíbolito revela descompressão isoterma (com pico metamórfico em 2,7 kbar e 430 °C e equilíbrio retrometamórfico a 1,2 kbar e 425 °C), associada à sua exumação e/ou à colocação de corpos de leucogranito, enquanto o diopsídio anfíbolito foi submetido a metamorfismo sob fácies anfíbolito em nível crustal intermediário e ambiente de crosta relativamente fria (5 kbar; 540 °C). Esses dados denunciam a exposição de uma crosta arqueana relativamente profunda, entre 9 e 16 Km, na região de Água Azul do Norte.

Palavras-Chaves: Anfíbolitos, Geoquímica, Geotermobarometria, Arqueano, Carajás.

ABSTRACT

The metamafics bodies identified in the Água Azul do Norte area, located in the south-central portion of the Carajás domain, crosscut the TTG basement and include two distinct varieties: (i) actinolite amphibolite, an extensive elongated body (~17 km long) with N-S orientation and inflection to NE, composed essentially of plagioclase and amphibole, with relicts of igneous pyroxene crystals and plagioclase, defining a subophitic texture; and (ii) diopside amphibolite, with occurrence restricted to the extreme east portion of the area, outcropping as small lenticular anastomosed bodies of NW-SE orientation. The latter shows nematoblastic and porphyroblastic textures, mylonitic foliation, and S-C pairs. The mineral paragenesis recognized in this variety include: Plg+Amph+Di+Ilm, which represent the metamorphic peak, while Plg+Amph+Ep+Clz+Tit+Ap+Qtz+Ser were generated during the retrometamorphism. The plagioclase from the actinolite amphibolite has a broad compositional spectrum, ranging from calcic oligoclase to calcic labradorite (An₂₈₋₆₅) with calcic compositions representing igneous inheritances. The plagioclase from the diopside amphibolite has more homogeneous composition and was classified as sodic andesine (An₃₁₋₃₅). The amphibole from the actinolite amphibolite shows compositional zoning with Mg/Fe ratio slightly higher than those of the diopside amphibolite, and can be classified as Mg-hornblende, tschermakite, actinolite and edenite. In addition, the amphibole of the diopside amphibolite has Al^{VI} of ~0.4 and Fe³⁺ of 0.7 to 0.8 contents, which allows its classification as Mg-hastingsite. Taking into account the chemical data, these bodies had a protolith with composition compatible with tholeiitic basalts, multielement standard of continental tholeiites (diopside amphibolite) and tholeiites low K (actinolite amphibolite), incompatible elements (HFSE) ratios suggest a source derived from primitive mantle, with significant changes in the magma composition due to interaction with the continental crust and/or subcontinental lithosphere. The chemical-mineralogical and textural evidences indicate that the protolith of actinolite amphibolite underwent deformation in the submagmatic stage and later a deformation in solid state at shallow depths. In contrast, the diopside amphibolite was submitted to ductile deformation regime in relatively higher depths. The metamorphic path of the actinolite amphibolite reveals isothermal decompression (metamorphic peak at 2.7 kbar and 430 °C; and retrometamorphic equilibrium at 1.2 kbar and 425 °C), associated with its exhumation and/or emplacement of leucogranite bodies, whereas the diopside amphibolite indicates amphibolite facies metamorphism in intermediate crustal level conditions (5 kbar; 540°C). These data indicate the exposure of relatively deep crustal levels in Água Azul do Norte (9-16 km).

Keywords: Amphibolites, Geochemistry, Thermobarometry, Archean, Carajás.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPITULO 1

- Figura 1. Mapa de localização dos corpos metamáficos da área de Água Azul do Norte.3
 Figura 2. Mapa geológico da Província Carajás.....6

CAPITULO 2

- Figura 2.1- Mapa geológico da Província Carajás e da área de Água Azul do Norte.....15
 Figura 2.2- Aspectos de campo das rochas metamáficas de Água Azul do Norte17
 Figura 2.3- Aspectos microtexturais das rochas metamáficas de Água Azul do Norte19
 Figura 2.4- Diagrama de classificação dos minerais22
 Figura 2.5- Diagrama vetorial do actinolita anfibolito23
 Figura 2.6- Perfil analíticos em minerais dos metabasitos de Água Azul do Norte.....24
 Figura 2.7- Diagramas geoquímicos discriminantes dos anfibolitos.....27
 Figura 2.8- Diagramas de variação Mg# versus óxidos e traços 28
 Figura 2.9- Diagramas de elementos terras raras (ETR) e multielementar29
 Figura 2.10- Condições termobarométricas do diopsídio anfibolito30
 Figura 2.11- Condições termobarométricas do actinolita anfibolito32
 Figura 2.12- Inferência da(s) fonte(s) das rochas metabásicas de Água Azul do Norte.36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composições químicas representativas de plagioclásio, anfibólio e piroxênio das rochas metabásicas de Água Azul do Norte.	21
Tabela 2.2- Composição química dos metabasitos da região de Água Azul do Norte.....	26
Tabela 2.3- Reações metamórficas consideradas nos cálculos termobarométricos das condições P-T de pico metamórfico do diopsídio anfibolito.....	31
Tabela 2.4- Reações metamórficas consideradas nos cálculos geotermobarométricos das condições P-T de pico metamórfico e de retrometamorfismo do actinolita anfibolito.	33

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
CAPITULO 1	1
1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2 CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL	3
1.3 OBJETIVOS	8
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	9
1.4.1 Pesquisa Bibliográfica	9
1.4.2 Mapeamento Geológico	9
1.4.3 Petrografia	9
1.4.4 Geoquímica	9
1.4.5 Química Mineral e Geotermobarometria	10
CAPÍTULO 2	11
Artigo- METAMORFISMO E NATUREZA DOS CORPOS ANFIBOLÍTICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE - PROVÍNCIA CARAJÁS	11
2.1 INTRODUÇÃO	12
2.2 CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL	13
2.3 GEOLOGIA DOS CORPOS METAMÁFICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE	16
2.4 PETROGRAFIA E ASPECTOS MICROTEXURAIS	17
2.4.1 Actinolita anfibolito	17
2.4.2 Diopsídio anfibolito	18
2.5 QUÍMICA MINERAL	20
2.6 GEOQUÍMICA	25
2.7 METAMORFISMO	29
2.8 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
2.8.1 Sobre o regime deformacional e colocação dos corpos	33
2.8.2 Sobre a natureza do protólito	34
2.8.3 Ambiente geotectônico	35
2.8.4 Investigação da fonte mantélica	35
2.8.5 Condições de metamorfismo	37
2.9 CONCLUSÕES	37
2.10 REFERÊNCIAS	39
CAPITULO 3	48
3.1 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	51

CAPITULO 1

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A Província Carajás está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Almeida *et al.*, 1981) e faz parte do contexto geológico da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999, 2004) ou Carajás (Santos 2003). Em função de seu enorme potencial metalogenético, a província tem sido alvo de diversos estudos geológicos ao longo das últimas décadas, resultando na individualização de diversos granitoides antes atribuídos ao embasamento da província e incluídos no Complexo Xingu. Esses estudos possibilitaram, juntamente com estudos geofísicos e estruturais, propostas de compartimentação da província em segmentos crustais tectonicamente distintos (Costa *et al.*, 1995; Souza *et al.*, 1996; Althoff *et al.*, 2000; Dall’Agnol *et al.*, 2006). Neste contexto, Dall’Agnol *et al.* (2006) denominaram o segmento de crosta situado entre o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) e a Bacia Carajás (BC) como Domínio de Transição (DT), interpretado como uma extensão do TGGRM afetado pelos eventos neoarqueanos que deram origem à bacia. Posteriormente, Vasquez *et al.* (2008), em revisão à geologia do Estado do Pará e seguindo a proposta de Santos (2003), dividiram a província em dois domínios tectônicos distintos: Domínio Rio Maria de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga) e Domínio Carajás, formado por rochas meso- e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga). Essa nova configuração fez com que Feio *et al.* (2012) redefinisse o DT como Subdomínio de Transição (SDT), o qual se estenderia desde a borda sul da Bacia Carajás até ao norte da cidade de Sapucaia, prolongando-se lateralmente até ao município de São Félix do Xingu, passando por Água Azul do Norte, Ourilândia do Norte e Tucumã.

Mais recentemente, trabalhos realizados por pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG-UFPA) mostraram que o SDT não corresponderia a uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, o que levou à adoção das denominações Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Domínio Sapucaia (DS) para as porções norte e sul do SDT, respectivamente (Dall’Agnol *et al.*, 2013). Os domínios identificados acima são limitados por grandes descontinidades regionais de direção E-W e apresentam significativas diferenças em sua evolução geológica, reconhecidas a partir das associações litológicas presentes nestes blocos. O DCC seria caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* e associações charnockíticas (Suíte Planalto e Diopsídio-Norito Pium), com raras ocorrências de TTG e granitos anorogênicos, enquanto que o DS seria formado por granitoides tipo TTG,

sanukitoides e leucogranitos diversos, análogos àqueles identificados no DRM, sendo, porém, afetados por eventos neoarqueanos.

Embora a região de Carajás seja alvo de pesquisas devido à sua grande riqueza mineral, estudos sobre a evolução magmática e metamórfica de rochas máficas em seus diferentes domínios tectônicos ainda permanecem restritos às áreas de ocorrência das sequências metavulcanossedimentares de idade mesoarqueana. Os trabalhos de Souza & Dall'Agnol (1994, 1996) e Sousa *et al.* (2015), sugerem metamorfismo em condições de fácies xisto-verde a anfibolito para os metabasaltos e metakomatiitos das sequências *greenstone belts* de Identidade e Sapucaia, respectivamente. Esses autores atribuem às rochas vulcânicas, fontes mantélicas e formação em ambiente de arco de ilha (e.g. *Greenstone Belt* de Identidade; Souza *et al.* 1996, 2001) ou associação com platôs ou ilhas oceânicas (e.g. *Greenstone Belt* de Sapucaia; Sousa *et al.* 2015), amalgamados aos proto-continentes. Contudo, apesar dos avanços significativos no estudo de rochas metamáficas na Província Carajás, trabalhos referentes à caracterização metamórfica dos extensos corpos anfibolíticos recentemente identificados na área de Água Azul do Norte, são ainda inexistentes. Naqueles que ocorrem próximo à localidade de Nova Canadá, foram realizadas apenas caracterização petrográfica, que permitiu, a partir do estudo de associações minerais, estimativa das condições de metamorfismo com pico na fácies anfibolito sob temperatura e pressão intermediárias (Marangoanha & Oliveira 2014).

Levando-se em consideração as limitações no conhecimento e a escassez de dados disponíveis sobre os corpos anfibolíticos de Água Azul do Norte (Figura 1), antes inseridos indiscriminadamente no contexto geológico do Grupo Sapucaia e do Complexo Xingu (Araújo & Maia 1991), a proposta deste trabalho visa, sobretudo, aprimorar o conhecimento da geologia da área de Água Azul do Norte, através da definição de parâmetros que estimem as condições de formação e individualização destes corpos, tais como: aspectos texturais e geoquímicos, identificação de reações metamórficas, trajetórias de metamorfismo e processos metassomáticos. A partir da definição da natureza do magmatismo, ambiente de formação, bem como dos processos deformacionais e metamórficos ali registrados, busca-se, assim, contribuir para a reconstituição de parte da história evolutiva arqueana da Província Carajás.

Tais objetivos, uma vez alcançados, futuramente serão integrados as informações obtidas pelas Teses de Doutorado de Soraya Damasceno de Sousa (IG/USP), Eleilson Oliveira Gabriel e Pablo José Leite dos Santos (PPGG/UFGA), cujos objetos de estudo visam o estabelecimento de um modelo de evolução crustal para a região de Água Azul do Norte. Estes estão vinculados às metas e objetivos propostos pelos convênios VALE-FAPESPA

(Edital 01/2010 - ICAFF 053/2011) e INCT / GEOCIAM (Proc. 573733 / 2008-2) e CNPq Universal (proc. 485806/2013-4). Os principais resultados desta dissertação de mestrado são apresentados na forma de um manuscrito científico, com o seguinte título: **METAMORFISMO E NATUREZA DOS CORPOS ANFIBOLÍTICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE - PROVÍNCIA CARAJÁS**. Este manuscrito aborda dados de petrografia, química mineral, geoquímica e termobarometria relacionados às rochas metabásicas de Água Azul do Norte, afim de alcançar os objetivos expostos acima. Os resultados obtidos neste trabalho serão submetidos para a publicação à revista Geologia USP Série Científica ou similar.

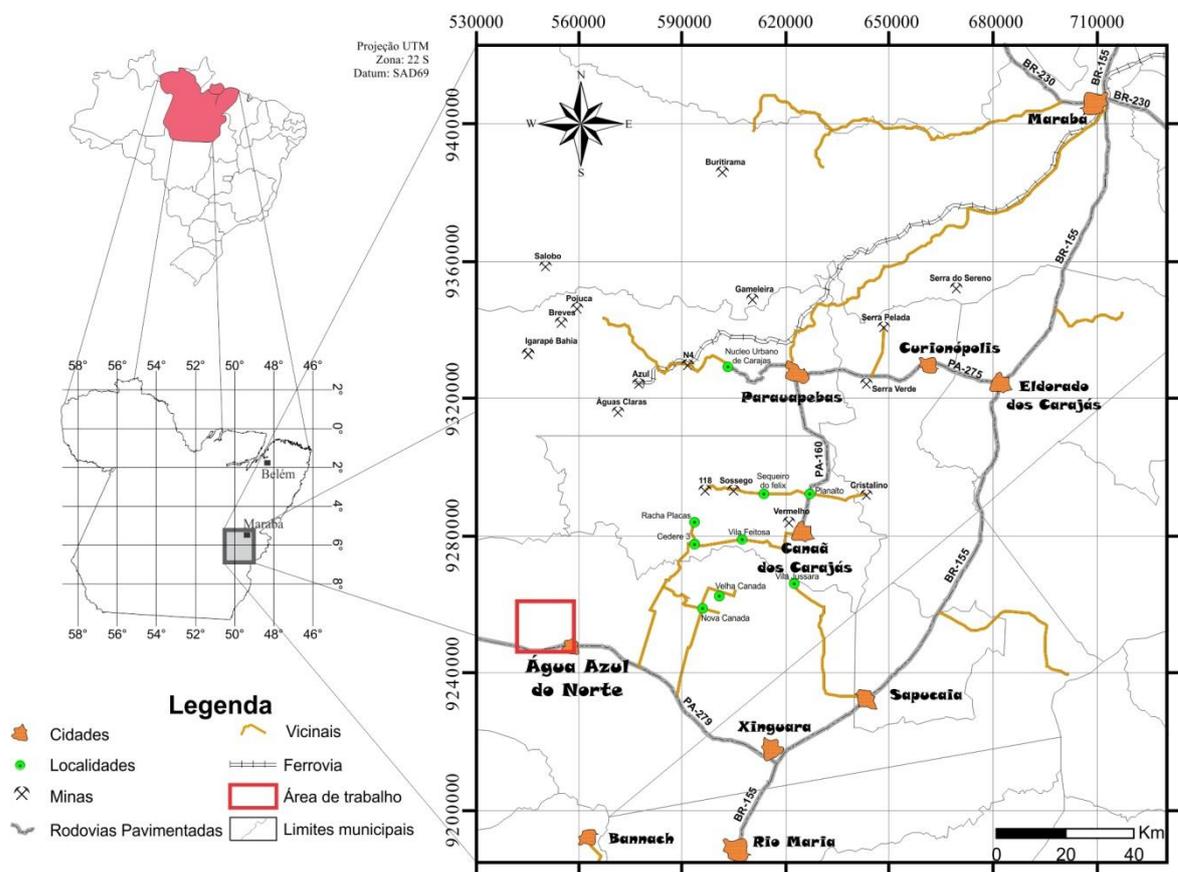


Figura 1.1- Mapa de localização da área de estudo na região de Água Azul do Norte, Pará.

1.2 CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL

A **Província Carajás** (Santos 2003) está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Almeida *et al.*, 1981) e representa uma parte da Província Amazônia Central, previamente definida por Tassinari & Macambira (1999, 2004; Figura 2a). Souza *et al.* (1996) subdividiram esta província em Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM), a sul, e Bloco Carajás (BC), a norte. O primeiro compreenderia as rochas mais antigas e de características ígneas bem preservadas, enquanto que a porção norte manteria um

embasamento mesoarqueano, afetado por eventos tectonotermiais de idade neoarqueana, representado por uma vasta sequência vulcanossedimentar e intrusões granitoides sintectônicas. Posteriormente, Vasquez *et al.* (2008), em revisão à geologia do Estado do Pará e seguindo a proposta de Santos (2003), dividiram a província em dois domínios tectônicos distintos: Domínio Rio Maria de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga), e Domínio Carajás, formado por rochas meso- e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga).

Mais recentemente, trabalhos realizados por pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG-UFGA) mostraram que a área considerada como embasamento da Bacia Carajás, que se estenderia desde a borda sul da mesma até o limite com o TGGRM, não corresponde a uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, o que levou à adoção das denominações Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Domínio Sapucaia (DS) para as porções norte e sul deste segmento crustal da província, respectivamente (Dall’Agnol *et al.* 2013; Figura 2b). O DCC é caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* e associações charnockíticas (Suíte Planalto e Diopsídio-Norito Pium), com raras ocorrências de TTG e granitos anorogênicos, enquanto que o DS é formado por granitoides TTG, sanukitoides e leucogranitos diversos, análogos àqueles identificados no Domínio Rio Maria, sendo, porém, afetados por eventos neoarqueanos.

O **Domínio Rio Maria**, ao sul, é essencialmente Mesoarqueano, e caracterizado por associações *greenstone belt* do Supergrupo Andorinhas de 3,0 a 2,9 Ga (Macambira & Lancelot, 1991; Pimentel & Machado, 1994; Avelar, 1996; Souza *et al.*, 2001; Rolando & Macambira 2003; Lafon *et al.*, 2000) e Grupo Tucumã (Araújo & Maia 1991). Os granitoides englobam: (a) **rochas TTG** de 2,96-2,93 Ga, representados pelo Tonalito Arco Verde, Trondhjemitó Mogno e Tonalito Mariazinha (Macambira & Lafon 1995; Rolando & Macambira 2003; Almeida *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2011); (b) **Suíte Sanukitoide** Rio Maria de 2,87 Ga e rochas associadas (Medeiros & Dall’Agnol 1988; Oliveira *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2013; Santos 2015); (c) **leucogranodioritos-granitos de alto Ba-Sr** representados pelos plútons Guarantã, Trairão e Azulona, agrupados na Suíte Guarantã de 2,87 a 2,86 Ga por Almeida *et al.* (2010); (d) **leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcalina**, caracterizados pelo granito Mata Surrão e afins, datados em 2,87 Ga (Lafon *et al.*, 1994; Almeida *et al.*, 2010). Esses são recobertas pelas rochas sedimentares clásticas, transgressivas, do Grupo Rio Fresco (DOCEGEO 1988). Já no Paleoproterozoico, este terreno foi intrudido por granitos tipo-A de 1,88 Ga da Suíte Jamon (Dall’Agnol *et al.*, 2005; Dall’Agnol & Oliveira 2007). Diques associados a este magmatismo também são frequentes (Silva Jr. 1999; Rivalenti *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2015).

O **Domínio Sapucaia** foi caracterizado a partir de estudos realizados nas regiões de Água Azul do Norte e Sapucaia, e inclui associações *greenstone belt*, anfíbolitos e granitoides diversos. Os litotipos de caráter ultramáfico e máfico são reconhecidos em: (a) sequências de *greenstone belts*, representados pelo Grupo Sapucaia (DOCEGEO, 1988; Costa *et al.*, 1994), que, segundo Sousa *et al.* (2015), inclui rochas metaultramáficas afins de komatítos empobrecidos em alumínio (tipo Barberton), cuja composição química sugere semelhanças com basaltos de ilhas oceânicas (OIB) e hornblenda anfíbolitos formados em ambiente MORB. Estes autores consideram que o Grupo Sapucaia apresenta resquícios de platôs ou ilhas oceânicas, gerados durante o Mesoarqueano; (b) **Anfíbolitos**, identificados na localidade de Nova Canadá e classificados como toleítos de arco de ilha, com assinatura geoquímica de N-MORB, que foram submetidos a metamorfismo de caráter dinâmico em condições dúcteis em fácies xisto verde a anfíbolito baixo (Marangoanha & Oliveira 2014). As unidades granitoides incluem: (a) **granitoides sódicos** distintos dos clássicos TTG arqueanos, representados pelo Tonalito São Carlos (2,93 Ga; Silva *et al.*, 2014); (b) **associações TTG** que ocorrem de forma expressiva no DS e são representadas pelo Tonalito Caracol de 2936 ± 3 Ma (Almeida *et al.*, 2011) e rochas afins do Tonalito Mariazinha de 2912 ± 5 Ma (Almeida *et al.*, 2011). Além dos trondhjemitos Colorado com idade de 2872 ± 1 Ma (Silva *et al.*, 2014; Leite-Santos & Oliveira 2014) e Água Fria de 2864 ± 21 Ma (Leite *et al.*, 2004), que representam as unidades TTG mais jovem deste domínio; (c) **sanukitoides** representados pelos corpos Água Azul e Água Limpa com idade U-Pb SHRIMP de $2879 \pm 1,3$ Ma (Gabriel *et al.*, 2014, 2015); (d) **leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr** de Nova Canadá, com idade de 2895 ± 2 Ma (Oliveira *et al.*, 2010; Leite-Santos & Oliveira 2016); (e) **granitos de alto-K de afinidade cálcio-alcálica** mais restritos no DS e representados pelo Granito Xinguara de $2865 \pm$ Ma (Leite *et al.*, 2004) e Leucogranito Velha Canadá com idade Pb-Pb em zircão de 2747 ± 2 Ma (Oliveira *et al.*, 2010; Leite-Santos & Oliveira, 2016); (f) **granitoides subalcalinos sintectônicos** afins daqueles da Suíte Planalto (Feio *et al.*, 2012), que foram descritos na região de Vila Jussara (Silva *et al.*, 2014).

O **Domínio Canaã dos Carajás** é caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* em relação aos TTG, e também é marcado por eventos meso- e neoarqueanos. Apesar do nível de conhecimento regional ter avançado ao longo dos últimos anos, a problemática do Complexo Xingu, inicialmente datado em 2972 ± 16 Ma (Avelar *et al.*, 1999) com idade de metamorfismo de 2859 ± 4 Ma (Machado *et al.*, 1991), ainda é existente. Datações

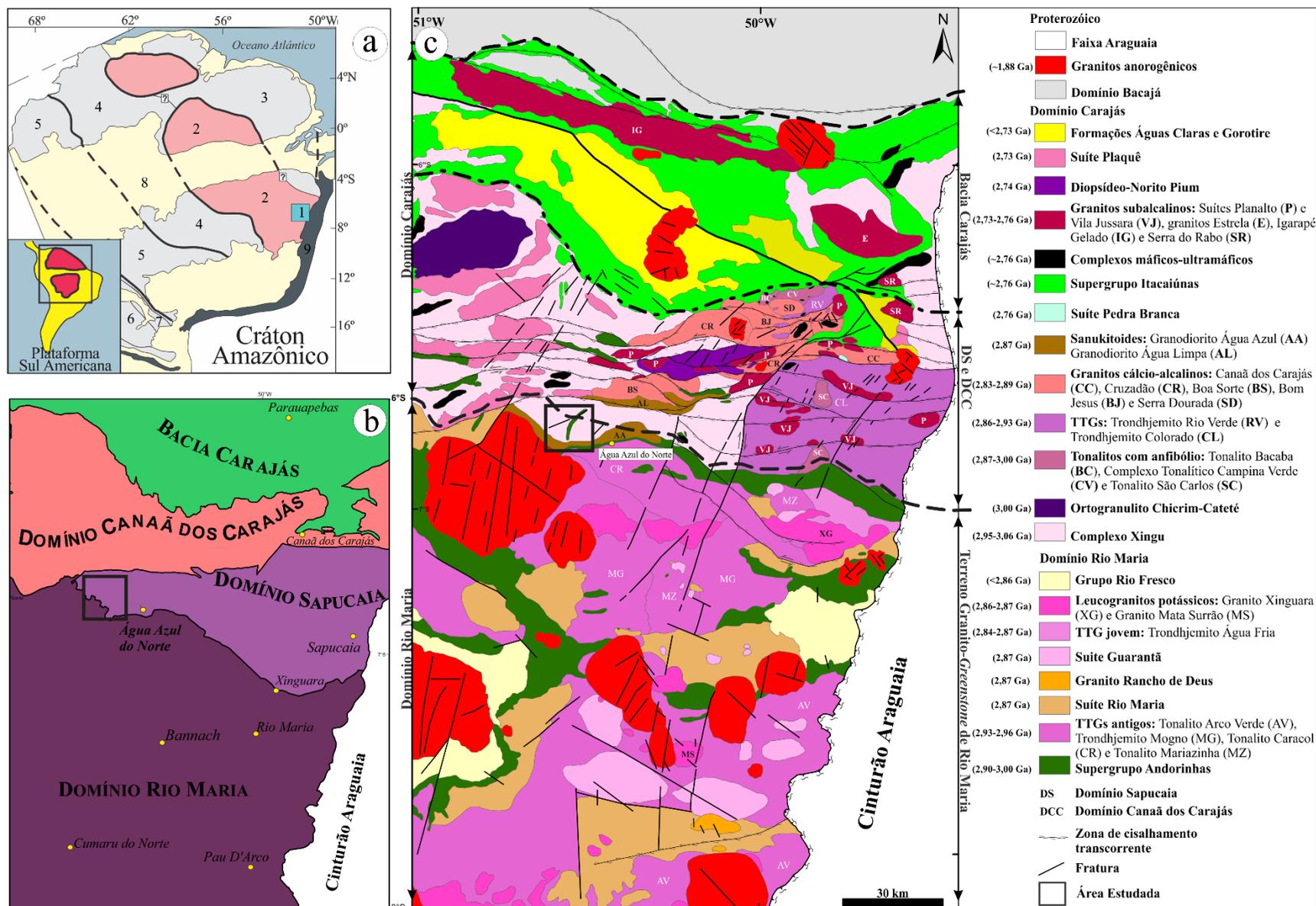


Figura 1.2- (a) Cráton Amazônico e sua posição em relação a plataforma Sul Americana: 1- localização da Província Carajás, 2- Província Amazônia Central, 3- Província Maroni-Itacaiúnas, 4- Província Venturi-Tapajós, 5- Província Rio Negro-Juruena, 6- Província Rondônia-San Ignácio, 7- Província Sunsás, 8- cobertura sedimentar da Bacia do Solimões (Tassinari & Macambira 1999, 2004). (b) Nova proposta de compartimentação tectônica para a Província Carajás (Dall’Agnol *et al.*, 2013). (c) Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de ocorrência dos corpos metamáficos de Água Azul do Norte, objeto de estudo do presente trabalho. Modificado de Vasquez *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2010), Feio *et al.* (2013), Guimarães *et al.* (2012), Santos *et al.* (2012), Santos & Oliveira (2012) e Gabriel (2012).

geocronológicas mais recentes sugerem idade de 2950 ± 25 Ma para as rochas deste complexo na área do Depósito de Cu do Salobo (Melo *et al.*, 2014). Adicionalmente, Delinardo *et al.* (2014, 2015) reconheceram, na região de Canaã dos Carajás, gnaisses migmatíticos de fácies anfíbolito superior a granulito, também atribuídos ao Complexo Xingu, que inclui ortopiroxênio-diopsídio gnaisse com protólito de composição granodiorítica a tonalítica e idade U-Pb SHRIMP de cristalização de $3066\pm 6,6$ Ma e idade de metamorfismo em 2959 ± 15 Ma.

O quadro geológico atual da região de Canaã dos Carajás mostra, além do **Ortogramulito Chicrim-Cateté** (Vasquez *et al.*, 2008), anteriormente denominado Complexo Pium de 3002 ± 14 Ma (Araújo & Maia 1991; Pidgeon *et al.*, 2000), a ocorrência expressiva de granitoides formados no Mesoarqueano, como: (a) **granitoides sódicos distintos dos TTG arqueanos**, representados pelo Tonalito Bacaba de 3005 ± 8 Ma (Moreto *et al.*, 2011) e Complexo Tonalítico Campina Verde, de 2872 ± 1 a 2850 ± 7 Ma (Feio *et al.*, 2013), além do **Granito Canaã dos Carajás** com idade de 2959 ± 6 Ga (Feio *et al.*, 2013), o qual não pode ser classificado como potássico pois tem caráter mais sódico; (b) **Associação TTG**, representada pelo Trondhjemitó Rio Verde, de 2929 ± 3 Ma a 2868 ± 4 Ma (Feio *et al.*, 2013); (c) **granitos potássicos** de afinidade cálcio-alcalina, representados pelos plútons: (i) **Serra Dourada**, datado em 2860 ± 22 Ma (Moreto *et al.*, 2011) e 2831 ± 6 Ma (Feio *et al.*, 2013); (ii) **Granito Boa Sorte**, com idade de cristalização entre 2,85-2,89 Ga (Rodrigues *et al.*, 2014); (iii) **Granito Cruzadão**, de assinatura geoquímica transicional entre as séries cálcio-alcalina e alcalina e idade mínima de cristalização em 2845 ± 15 Ma (Feio *et al.*, 2013); (iv) **Granito Bom Jesus**, com idade mínima de cristalização de 2833 ± 6 Ma (Feio *et al.*, 2013).

O Neoarqueano foi marcado por associações de rochas máfica-ultramáficas, metavulcanossedimentares e granitoides diversos. As rochas **metavulcanossedimentares** são representadas pelo Supergrupo Itacaiúnas de idade 2,76 Ga (Machado *et al.*, 1991) e as intrusivas pelas rochas máfica-ultramáficas da Suíte Cateté (Macambira & Vale 1997), pelo Complexo Intrusivo Luanga (Jorge João *et al.*, 1982; Medeiros Filho & Meireles 1985) e pelo Gabro Santa Inês (Meireles *et al.*, 1984; DOCEGEO, 1988; Pinheiro, 1997). O **Diopsídio-Norito Pium** (Ricci & Carvalho, 2006), datado em 2746 ± 1 Ma (Santos *et al.*, 2013), tem origem controversa, pois anteriormente era atribuído ao Complexo Pium, Mesoarqueano (Pidgeon *et al.*, 2000). Os granitoides incluem: (a) **granitoides subalcalinos e sintectônicos**, colocados em zonas de cisalhamento, representados pelo Complexo Granítico Estrela, de $2,763\pm 7$ Ma (Barros *et al.*, 2001; Barros *et al.*, 2009), o Granito Serra do Rabo, de $2743\pm 1,6$ Ma (Sardinha, 2002; Barros *et al.*, 2009) e o Granito Igarapé Gelado, de 2731 ± 26 Ma

(Barbosa, 2004; Barros *et al.*, 2009); (b) **granitos tipo-A da Suíte Planalto** caracterizados por biotita-hornblenda sienogranitos e monzogranitos com características geoquímicas similares às de granitos tipo-A e idades entre 2747 ± 2 e 2706 ± 5 Ma (Huhn *et al.*, 1999; Gomes, 2003; Sardinha *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2010; Feio *et al.*, 2012); (c) **rochas charnockíticas**, caracterizadas por ortopiroxênio trondhjemitos, datados de 2,75 Ga (Gabriel *et al.*, 2010) que ocorrem associadas aos gabros do Diopsídio-Norito Pium (Santos *et al.*, 2013); (d) **granitoides sódicos de assinatura toleica** da Suíte Pedra Branca (Feio *et al.*, 2012), que ocorrem associados à Suíte Planalto e foram datados pelo método U-Pb em 2765 ± 39 Ma (TIMS, Sardinha *et al.*, 2004) e 2705 ± 5 Ma (Feio *et al.*, 2013); e (e) **os granitos potássicos da Suíte Plaquê** caracterizados por muscovita-biotita leucogranitos peraluminosos, alongados segundo orientação E-W (Araújo *et al.*, 1988; Jorge João & Araújo 1992), datados em 2736 ± 24 Ma (Avelar *et al.*, 1999), e interpretados como produto de retrabalhamento crustal.

No Paleoproterozoico, em torno de 1,88 Ga, a área do Domínio Carajás (Bacia Carajás e embasamento), foi afetada pela colocação dos **granitos anorogênicos** da Suíte Serra dos Carajás, representados pelos maciços Central, Cigano, Pojuca, Breves e Rio Branco (Dall’Agnol *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2013).

1.3 OBJETIVOS

O estudo tem como objetivo geral caracterizar textural e composicionalmente os corpos anfibolíticos de Água Azul do Norte, com o intuito de estimar suas condições de formação, assim como identificar as possíveis afinidades existentes entre esses corpos e as principais ocorrências de rochas metabásicas pertencentes às sequências *greenstone belts* da Província Carajás. Para isto, os seguintes objetivos específicos incluíram:

- i. elaborar um mapa geológico da região estudada em ambiente SIG na escala 1:50.000, priorizando a disposição espacial dos corpos anfibolíticos, suas relações com as rochas encaixantes e a integração com mapas geológicos de áreas adjacentes;
- ii. identificar e classificar o protólito das rochas metamáficas, além de definir o ambiente geotectônico de formação e os processos ígneos e metamórficos que as afetaram.
- iii. classificar de maneira precisa as principais fases minerais (plagioclásio, anfibólio e piroxênio) encontradas nestes litotipos;
- iv. identificar as condições de P e T as quais essas rochas foram formadas e submetidas durante o metamorfismo, e discutir o significado dessas variáveis para o contexto tectônico da área;

v. correlacionar a evolução metamórfica com os principais eventos deformacionais atuantes na área.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Pesquisa Bibliográfica

Esta etapa consistiu de um levantamento bibliográfico com ênfase na geologia regional e no magmatismo máfico da Província Carajás, bem como de uma análise minuciosa de artigos científicos, dissertações e teses, com temas específicos, concernentes à geologia de terrenos arqueanos com enfoque em evolução crustal, petrografia, geoquímica, gênese de rochas máficas e caracterização geotermobarométrica de rochas metamáficas.

1.4.2 Mapeamento Geológico

Foram realizados exames analógicos e digitais de imagens *Landsat* para o planejamento da logística, mosaicos de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para a análise das formas do relevo e o produto integrado de RADAR com cartas aerogamaespectométricas do canal do tório e aeromagnetométricas, para complementar as interpretações e auxiliar na delimitação das zonas de contato das diferentes litologias (Fonte dos dados: Serviço Geológico do Brasil - CPRM). O mapeamento foi realizado na escala de 1:50.000, seguido de coleta sistemática de amostras para estudos petrográficos e geoquímicos. Na etapa de campo ocorreu a descrição de 65 afloramentos em seus aspectos litológicos e estruturais, enfatizando-se as relações de contato dos corpos metamáficos com as rochas encaixantes. Para a localização dos pontos amostrados foi utilizado um aparelho GPS (*Global Position System*) com precisão de aproximadamente 3 metros.

1.4.3 Petrografia

Esta etapa do trabalho consistiu na análise macroscópica de 54 amostras, seguido de estudo em microscópio petrográfico através das técnicas em luz transmitida, envolvendo: (i) identificação de minerais (Kerr 1959; Deer *et al.*, 1992) e sua descrição sistemática; (ii) o estudo das microtexturas e microestruturas (Bard 1980; Mackenzie *et al.*, 1982; Hibbard 1995; Passchier & Trouw 2005); e (iii) classificação das rochas conforme estabelecido pela SSRM (Fettes & Desmons 2008).

1.4.4 Geoquímica

Foram realizadas 18 análises químicas em rocha total nos laboratórios da ACME - *Analytical Laboratories Ltda* (Vancouver, CANADÁ), para quantificar os conteúdos de elementos maiores e menores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , TiO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5 ,

perda ao fogo), analisados por ICP-ES, e os elementos traços (Zn, Cu, Pb, Ba, Be, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, W, Zr, Bi) e terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) por ICP-MS. Os dados adicionais referentes a erros analíticos, limites de detecção, entre outros, estão disponíveis no site do ACME (*acmelab.com*).

A caracterização geoquímica destas rochas teve como base os princípios gerais discutidos em Ragland (1989) e Rollinson (1993), baseados na avaliação dos seguintes elementos:

(a) elementos maiores e menores - utilização de diagramas de variação, classificação e tipologia (Pearce 1968; Irvine & Baragar 1971; Cox *et al.*, 1979; Peloggia & Figueiredo 1991);

(b) elementos-traços - diagramas de variação e discriminantes de ambientes geotectônicos (Pearce & Norry 1979; Pearce 1982); avaliação de possíveis processos magmáticos e;

(c) elementos terras raras - possíveis fases fracionantes durante a geração do magma ou do processo de cristalização.

1.4.5 Química Mineral e Geotermobarometria

As análises dos minerais de 3 lâminas (RL-15, MDF-39 e DME-34) foram obtidas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da UnB, cujo equipamento em rotina é da Jeol, modelo JXA-8230, equipado com 5 espectrômetros WDS e um EDS. Foram analisados cristais de plagioclásio, anfibólio e piroxênio, e classificados conforme as recomendações de Deer *et al.* (1992), Leake *et al.* (1997) e Morimoto (1988), respectivamente. Foram realizados perfis composicionais nestes cristais, a fim de se obter uma caracterização mais precisa de sua composição, assim como identificar os zoneamentos registrados pela história ígnea e metamórfica dessas rochas, com o intuito de facilitar a escolha dos minerais que experimentaram equilíbrio termodinâmico para a realização dos cálculos de geotermobarometria. O grau de equilíbrio das paragêneses foi testado com uma base de dados termodinâmicos internamente consistentes, com a utilização do *software* TWQ1 (Berman 1991).

CAPÍTULO 2

METAMORFISMO E NATUREZA DOS CORPOS ANFIBOLÍTICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE - PROVÍNCIA CARAJÁS

Diwhemerson Barbosa de Souza^{1,2} (diw@ufpa.br)
Davis Carvalho de Oliveira^{1,2} (davis@ufpa.br)
Lena Virgínia Soares Monteiro³ (lena.monteiro@usp.br)
Eleilson Oliveira Gabriel^{1,2} (eleilson@ufpa.br)
Bhrenno Marangoanha^{1,2} (bhrenno@ufpa.br)

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

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

³ Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo (USP).

RESUMO

Os corpos metamáficos de Água Azul do Norte, porção centro-sul do Domínio Carajás, são intrusivos em uma crosta TTG e correspondem a duas variedades: (i) actinolita anfibolito, que ocorre como um corpo alongado de orientação geral N-S e inflexão para NE, com ~17 km de extensão. É formado por plagioclásio e anfibólio, com relíquias de cristais de piroxênio e plagioclásio ígneos associados à textura blasto-subofítica; e (ii) diopsídio anfibolito, de ocorrência restrita, que aflora como pequenos corpos lenticulares, anastomosados e de orientação NW-SE. Estes possuem protólito de composição afim dos basaltos toleíticos e razões HFSE que sugerem uma fonte derivada do manto primitivo, com mudanças significativas na composição do magma devido à interação com a crosta e/ou a litosfera subcontinental. O protólito do actinolita anfibolito foi deformado em estágio submagmático e, posteriormente, em estado sólido em profundidades rasas. Em contrapartida, o diopsídio anfibolito foi submetido a regime de deformação dúctil em profundidades relativamente elevadas. A trajetória metamórfica do actinolita anfibolito revela descompressão isothermal (com pico metamórfico em 2,7 kbar e 430 °C e equilíbrio retrometamórfico a 1,2 kbar e 425 °C), associada à sua exumação e/ou à colocação de corpos de leucogranito, enquanto o diopsídio anfibolito registrou metamorfismo em fácies anfibolito em condições de nível crustal intermediário e ambiente de crosta relativamente fria (5 kbar; 540 °C). Esses dados evidenciam história metamórfica distinta para os corpos anfibolíticos e a exumação e exposição de segmentos de crosta arqueana relativamente profunda na região de Água Azul do Norte (~9-16 km).

Palavras-Chaves: Anfibolito, Geoquímica, Geotermobarometria, Arqueano, Carajás.

ABSTRACT

The metamafics bodies identified in the Água Azul do Norte area, located in the south-central portion of the Carajás Domain, crosscut the TTG basement and encompass two varieties: (i) actinolite amphibolite, an extensive elongated body (~17 km long) with N-S orientation and inflection to NE. It is essentially composed of plagioclase and amphibole, with relics of igneous pyroxene and plagioclase, defining a subophitic texture; and (ii) diopside amphibolite, with occurrence restricted to the extreme east of the area, outcropping as small lenticular anastomosed bodies of NW-SE orientation. These bodies have a protolith with composition compatible with tholeiitic basalts and ratios of incompatible elements HFSE that suggest source derived from primitive mantle, with significant changes in the magma composition due to interaction with the continental crust and/or subcontinental lithosphere. The chemical-mineralogical and textural evidences indicate that the protolith of actinolite amphibolite underwent deformation in the submagmatic stage and later deformation in solid state at shallow depths. In contrast, the diopside amphibolite was submitted to ductile deformation regime in relatively high depths. The metamorphic path of the actinolite amphibolite reveals isothermal decompression (metamorphic peak at 2.7 kbar and 430 °C; and retrometamorphic equilibrium at 1.2 kbar and 425 °C), associated with its exhumation and/or emplacement of leucogranite bodies, whereas diopside amphibolite indicates metamorphism under amphibolite facies in intermediate crustal level conditions (5 kbar; 540 °C). These data indicate distinct metamorphic evolution for the amphibolites and exhumation the exposure of relatively deep crustal levels in Água Azul do Norte (8.91-16.5 km).

Keywords: Amphibolite, Geochemistry, Thermobarometry, Archean, Carajás.

2.1 INTRODUÇÃO

Em função do seu enorme potencial metalogenético, a Província Carajás tem sido alvo de diversos estudos geológicos ao longo das últimas décadas, resultando na individualização de diversos granitoides nas áreas antes atribuídas ao Complexo Xingu, e que possibilitaram, juntamente com estudos geofísicos e estruturais, elaborar propostas de compartimentação da Província em segmentos crustais tectonicamente distintos (Costa *et al.*, 1995; Souza *et al.*, 1996; Althoff *et al.*, 2000; Dall’Agnol *et al.* 2006; Santos 2003; Dall’Agnol *et al.*, 2013). No entanto, estudos sobre a evolução magmática e metamórfica de rochas ultramáficas e máficas em seus diferentes domínios tectônicos ainda permanecem restritos às áreas de ocorrência das sequências metavulcanossedimentares de idade mesoarqueana. Os trabalhos de Souza *et al.* (1996, 2001) e Sousa *et al.* (2015) sugerem metamorfismo em condições de fácies xisto-verde

a anfibolito para os metabasaltos e metakomatiitos das sequências *greenstone belts* de Identidade e Sapucaia, respectivamente. Esses autores atribuíram às rochas vulcânicas, fontes mantélicas e formação em ambiente de arco de ilha (e.g. *Greenstone Belt* de Identidade; Souza *et al.* 1996, 2001) ou associação com platôs ou ilhas oceânicas (e.g. *Greenstone Belt* de Sapucaia; Sousa *et al.* 2015). Corpos de rochas metamáficas, reconhecidas próximo à cidade de Nova Canadá, foram caracterizados petrograficamente, permitindo estimativa das condições de metamorfismo na fácies anfibolito sob temperatura e pressão intermediárias (Marangoanha & Oliveira 2014). Contudo, apesar dos avanços no estudo de rochas metamáficas na Província Carajás, trabalhos referentes à caracterização dos protólito e evolução metamórfica dos extensos corpos anfibolíticos recentemente identificados na área de Água Azul do Norte, são ainda inexistentes.

Levando-se em consideração as limitações no conhecimento e a escassez de dados disponíveis sobre os corpos metamáficos de Água Azul do Norte, antes inseridos indiscriminadamente no contexto geológico do Grupo Sapucaia e do Complexo Xingu (Araújo & Maia 1991), o presente estudo visa aprimorar o conhecimento da geologia da área de Água Azul do Norte, a partir da definição da natureza do magmatismo máfico, seu ambiente de formação, bem como caracterização dos processos deformacionais e suas trajetórias metamórficas, contribuindo para a reconstituição de parte da história evolutiva arqueana da Província Carajás.

2.2 CONTEXTO GEOLOGICO REGIONAL

A Província Carajás (Santos 2003) está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Almeida *et al.*, 1981) e representa uma parte da Província Amazônia Central, previamente definida por Tassinari & Macambira (1999, 2004; Figura 2.1a). Souza *et al.* (1996) subdividiram esta província em Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM), a sul, e a Bloco Carajás (BC), a norte. O primeiro compreenderia as rochas mais antigas com características ígneas bem preservadas, enquanto que a porção norte incluiria embasamento mesoarqueano, afetado por eventos tectonotermiais de idade neoarqueana, representado por uma vasta sequência vulcanossedimentar e intrusões granitoides sintectônicas. Posteriormente, Vasquez *et al.* (2008), em revisão à geologia do Estado do Pará e seguindo a proposta de Santos (2003), dividiram a província em dois domínios tectônicos distintos: Domínio Rio Maria de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga), e Domínio Carajás, formado por rochas meso- e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga). Mais recentemente, trabalhos realizados por pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG-UFPA) mostraram que a área considerada como embasamento da Bacia Carajás, que se estenderia desde a borda sul

da mesma até o limite com o Domínio Rio Maria, não corresponde a uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, o que levou à adoção das denominações Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Domínio Sapucaia (DS) para as porções norte e sul deste segmento crustal da província, respectivamente (Figura 2.1b, c; Dall’Agnol *et al.*, 2013).

O **Domínio Rio Maria**, mesoarqueano, é caracterizado por associações *greenstone belt* do Supergrupo Andorinhas de 3,0 a 2,9 Ga (Macambira & Lancelot 1991; Pimentel & Machado, 1994; Avelar, 1996; Souza *et al.*, 2001; Sousa *et al.*, 2015). Os granitoides englobam: (a) *rochas TTG* de 2,96-2,93 Ga (Macambira & Lafon, 1995; Almeida *et al.*, 2011); (b) *Suíte Sanukitoide* Rio Maria e rochas associadas de 2,87 Ga (Oliveira, *et al.*, 2009; Santos & Oliveira 2015); (c) *leucogranodiorito-granitos de alto Ba-Sr* agrupados na Suíte Guarantã de 2,87 Ga por Almeida *et al.* (2010); (d) *leucogranitos potássicos* datados em 2,87 Ga (Leite *et al.*, 2004), representado pelo Granito Mata Surrão e afins. Já no Paleoproterozoico, este terreno foi intrudido por granitos tipo-A de 1,88 Ga (Dall’Agnol & Oliveira 2007) e enxames de diques associados (Rivalenti *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 2015).

O DCC é caracterizado pela dominância de granitos mesoarqueanos *stricto sensu* e associações charnockíticas neoarqueanas (Suíte Planalto e Diopsídio-Norito Pium), com raras ocorrências de TTG e granitos anorogênicos (Moreto *et al.*, 2011; Feio *et al.*, 2013; Rodrigues *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2014), enquanto que o DS é formado por granitoides TTG, sanukitoides e leucogranitos diversos, análogos àqueles identificados no Domínio Rio Maria, sendo, porém, afetados por eventos neoarqueanos (Oliveira *et al.*, 2010; Teixeira *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2014; Gabriel & Oliveira 2014, 2015; Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016).

Os litotipos de caráter ultramáfico e máfico são reconhecidos em: (a) sequências de *greenstone belts*, representados pelo Grupo Sapucaia (DOCEGEO, 1988; Costa *et al.*, 1994), que, segundo Sousa *et al.* (2015), inclui rochas metaultramáficas afins de komatiítos empobrecidos em alumínio (tipo Barberton), cuja composição química sugere semelhanças com basaltos de ilhas oceânicas (OIB) e hornblenda anfibolitos formados em ambiente MORB. Estes autores consideram que o Grupo Sapucaia apresenta resquícios de platôs ou ilhas oceânicas, gerados durante o Mesoarqueano; (b) *Anfibolitos*, identificados na localidade de Nova Canadá e Xinguara classificados como toleítos de arco de ilha, com assinatura geoquímica de N-MORB, que foram submetidos a metamorfismo de caráter dinâmico em condições dúcteis em fácies xisto verde a anfibolito baixo (Marangoanha & Oliveira 2014, Silva *et al.*, 2015).

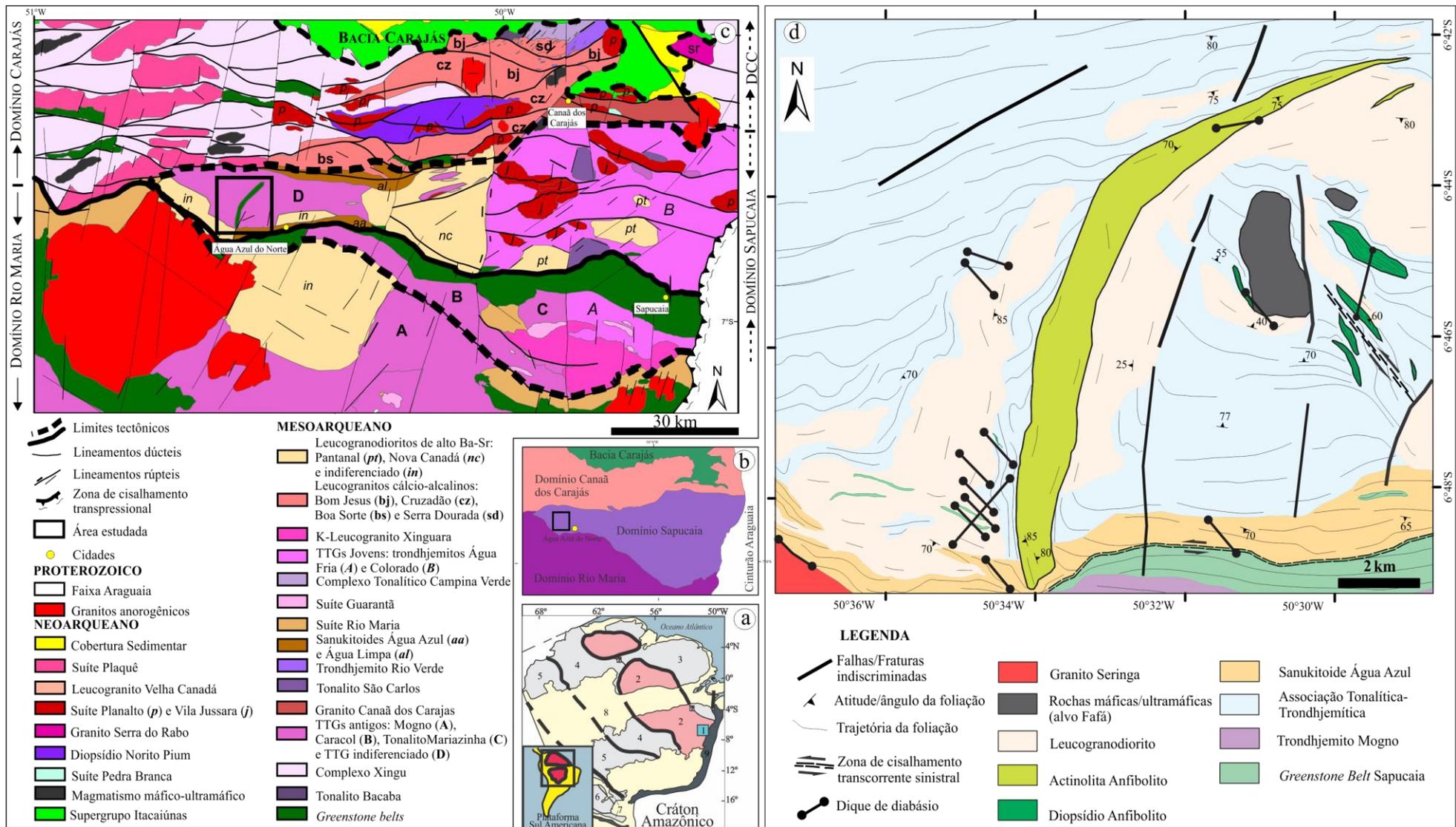


Figura 2.1- (a) Cráton amazônico e sua posição em relação a plataforma sul americana; 1- Província Carajás, 2- Província Amazônia Central, 3- Província Maroni Itacaiúnas, 4- Província Venturi-Tapajós, 5- Província Rio Negro-Juruena, 6- Província Rondônia-San Ignácio, 7- Província Sunsás, 8- cobertura sedimentar da Bacia do Solimões (Tassinari & Macambira 1999, 2004); (b) Nova proposta tectônica para a Província Carajás (Dall’Agnol *et al.*, 2013); (c) Mapa geológico da Província Carajás, destacando a área de ocorrência dos corpos anfibolíticos de Água Azul do Norte. Modificado de Vasquez *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2010), Feio *et al.* (2013), Guimarães *et al.* (2012), Santos *et al.* (2012), Santos & Oliveira (2012), e Gabriel (2012); (d) mapa geológico da área de Água Azul do Norte, com destaque para os corpos anfibolíticos.

2.3 GEOLOGIA DOS CORPOS METAMÁFICOS DE ÁGUA AZUL DO NORTE

O mapeamento geológico realizado na região de Água Azul do Norte permitiu a identificação, em área antes atribuída apenas às rochas metamórficas do Complexo Xingu e da sequência *greenstone belt* do Grupo Sapucaia, a existência de uma crosta tonalítica-trondjemítica cortada por granitoides de alto-Mg e leucogranodiorito-granitos mesoarqueanos (Gabriel & Oliveira 2014, Leite-Santos & Oliveira 2016). Boa parte desse embasamento granitoide é seccionado por diques de diabásio, corpos e lentes de rochas metamáficas e por intrusões máfica-ultramáficas serpentinizadas (Alvo Fafá; Figura 2.1d) ainda pouco estudadas e correlacionadas aquelas de idade neoarqueana (Lafon *et al.* 2000). Os corpos de rochas metamáficas de Água Azul do Norte configuram um relevo definido por morros alinhados de cristas descontínuas, contrastante com aqueles delineados pelas demais unidades, favorecendo a exposição de extensas áreas de ocorrência de rochas metamáficas na porção centro-leste da área de estudo (Figura 2.2a). Corpos afins foram caracterizados na região de Nova Canadá (Marangoanha & Oliveira 2014) e Xinguara (Silva *et al.*, 2015). Nesta última, os corpos de rocha metamáfica ocorrem como diques intrusivos no embasamento TTG (Tonalito Mariazinha de 2,93 Ga; Almeida *et al.*, 2011) e são seccionados por granitoides mais jovens (Leucogranito Xinguara de 2,86 Ga; Leite *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2015). Tais relações podem ser claramente observadas na pedreira de Novo Nascimento (Figura 2.2b), localizada próximo à cidade de Xinguara. A partir das observações de campo, modo de ocorrência, critérios petrográficos e microtexturais, os corpos estudados foram separados em duas variedades:

- (i) actinolita anfíbolito - configura um extenso corpo alongado de orientação geral NNE-SSW, com aproximadamente 17 km de comprimento. Na porção sul da área, este corpo apresenta orientação N-S, bem como foliação com mesmo *trend*, enquanto que na porção norte, nota-se uma inflexão, que passa a ter direção NE-SW, tendendo a paralelizar-se ao *trend* regional E-W, o que confere aspecto curvado ao corpo (Figura 2.1d); tal controle estrutural também é observado nos granitoides encaixantes, que é interpretado como resultado da transposição da foliação mais antiga E-W para uma mais nova de direção geral N-S;
- (ii) diopsídio anfíbolito - identificado no extremo leste da área, aflora como pequenos corpos lenticulares de menor expressão, deformados em meio aos granitoides de uma Associação Tonalítica-Trondjemítica (Figura 2.1d); possuem orientação NW-SE e são balizados por uma zona de cisalhamento transcorrente sinistral paralela à disposição dos corpos, evidenciando forte controle estrutural para a orientação dos mesmos.



Figura 2.2- Aspectos de campo das rochas metamáficas de Água Azul do Norte: (a) relação de contato de diques metamáficos com os granitoides TTG e leucogranitos, afloramento situado na Pedreira Novo Nascimento em Xinguara-PA; (b) forma de ocorrência; (c) feição mesoscópica do actinolita anfibolito, mostrando a coloração cinza da rocha e granulação fina a média; e (d) feição mesoscópica do diopsídio anfibolito, mostrando a coloração cinza escuro da rocha e granulação fina dessa variedade.

2.4 PETROGRAFIA E ASPECTOS MICROTURAIS

2.4.1 Actinolita anfibolito

As rochas dessa unidade possuem coloração cinza esbranquiçado, granulação fina a média (Figura 2.2c) com anisotropia dada pela orientação dos cristais de anfíbólio e plagioclásio. Localmente, é possível observar relíquias de cristais de piroxênio e plagioclásio ígneos caracterizando textura blastosubofítica. Sua mineralogia é representada essencialmente por anfíbólio (43-65%) e plagioclásio (34-56%; Figuras 2.3a, b); titanita, ilmenita, quartzo, apatita e minerais opacos ocorrem como acessórios; os minerais secundários são representados por epidoto e sericita, de forma subordinada.

O plagioclásio ocorre como aglomerados de cristais anédricos ou subédricos, inequigranulares com dimensões de 0,2 a 4mm, contornos subretilíneos, e geralmente substituídos por sericita e epidoto. Ocasionalmente, ocorre como inclusões nos cristais de

anfíbólio. O maclamento do tipo albita é o mais comum, com aqueles do tipo albita-Carlsbad subordinados. Localmente, cristais prismáticos de plagioclásio apresentam microfraturas preenchidas por anfíbólio, plagioclásio e quartzo (Figura 2.3c). Lamelas de geminação irregulares, descontínuas e truncadas são frequentes.

O anfíbólio ocorre como cristais anédricos, de dimensões inferiores a 2,5 mm. Possui pleocroísmo moderado com tonalidades que variam de verde claro a verde oliva e moderada birrefringência. Seus contatos são irregulares com os cristais de plagioclásio. Geminação múltipla, maclamento e zoneamento são características comuns nesses cristais.

A titanita ocorre como cristais finos (< 1,5 mm), anédricos e frequentemente associa-se a ilmenita, formando texturas de reações coroníticas (Figura 2.3d), que encontram-se principalmente nas bordas dos cristais de anfíbólio, formando contatos irregulares e interlobados. O quartzo ocorre como cristais anédricos de dimensões inferiores a 0,3 mm, com contornos irregulares. Por vezes, possui extinção ondulante e, localmente, ocorre como subgrãos ou encontra-se estirado, formando fitas (*quartz ribbon*).

2.4.2 Diopsídio anfíbolito

Essa unidade é caracterizada por rochas de coloração cinza escura com granulação fina ou média (Figura 2.2d, 2.3e). Mostra textura porfiroblástica com matriz nematoblástica e, sem resquícios texturais do seu protólito. Apresenta foliação contínua a espaçada zonal, disjuntiva suave e localmente anastomosada. A foliação milonítica e estruturas S-C ocorrem localmente, principalmente nas rochas localizadas próximo à zona de cisalhamento sinistral (ver mapa geológico; Figura 2.1d). As paragêneses minerais reconhecidas nessa variedade incluem: Plg+Amph+Di+Ilm, que representa o pico metamórfico, e Plg+Amph+Ep+Czo+Tit+Ap+Qtz+Ser, associada ao retrometamorfismo.

O plagioclásio ocorre como cristais subédricos, equigranulares com dimensões menores que 4mm, e diferem daqueles descritos anteriormente pela ausência de cristais preservados e menor grau de alteração para sericita. O anfíbólio ocorre principalmente como cristais subédricos, fortemente orientados, com dimensões de até 3,8 mm. Mostra pleocroísmo forte com variações de verde claro ao verde escuro. Ocorre mantendo e substituindo os cristais de diopsídio (Figura 2.3f) ou como porfiroblastos anédricos com dimensões que variam de 6 a 10 mm (Figura 2.3g). Em geral, a foliação amolda-se à forma destes cristais, sendo que, em alguns casos, estes porfiroblastos possuem uma foliação interna, oblíqua à foliação milonítica, sugerindo sua blastese sin-cinemática em relação a uma foliação metamórfica prévia ao cisalhamento. Isto sugere a existência de pelo menos duas gerações de

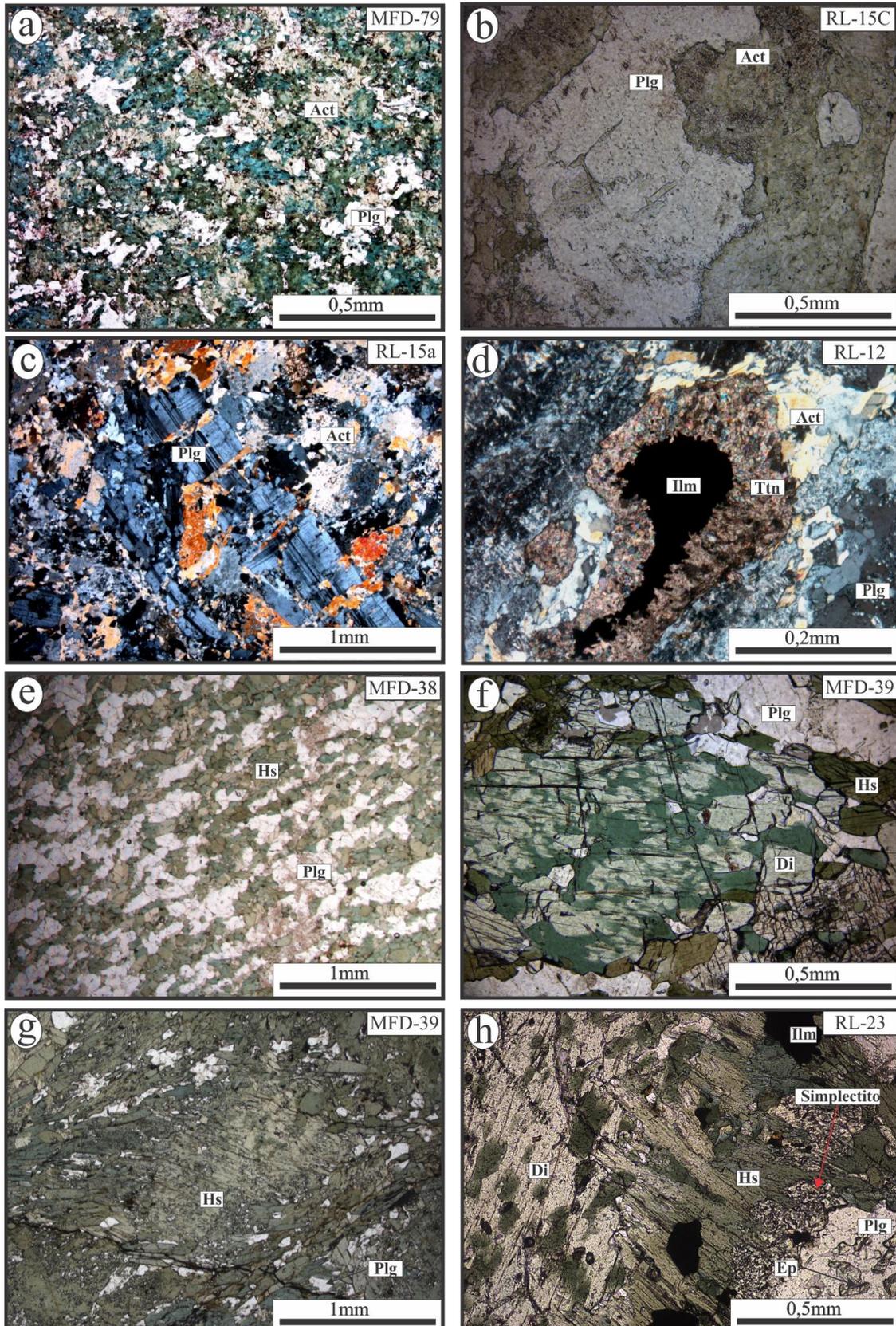


Figura 2.3- Aspectos texturais das rochas metabásicas de Água Azul do Norte: (a) aspecto microtextural do actinolita anfibólito, mostrando conteúdo mineral com predominância de plagioclásio e anfibólio (polarizadores paralelos, PP); (b) cristal de actinolita, mostrando contato irregular e interlobado com plagioclásio; (c) cristal subédrico de plagioclásio reliquiar com microfraturas preenchidas por anfibólio, quartzo e recristalização de plagioclásio (polarizadores cruzados, PC); (d) cristal xenomórfico de ilmenita manteado por titanita, evidenciando reação metamórfica; (e) aspecto microtextural do diopsídio anfibólito, com destaque para textura granoblastica (PP); (f) cristal anédrico de diopsídio, parcialmente substituído por Mg-hastingsita (PP); (g) porfiroblasto de Mg-hastingsita; notar a foliação principal moldando-se à forma deste cristal e uma foliação interna oblíqua, evidenciando seu caráter sin-cinematismo à essa foliação (PP); e (h) simplectitos constituídos por intercrescimentos de epidoto rico em Fe e clinozoisita com finas lamelas de quartzo nas bordas dos cristais de Mg-hastingsita em contato com o plagioclásio (PP); Legenda: actinolita (Act), diopsídio (Di), epidoto (Ep), hastingsita (Hs), ilmenita (Ilm), plagioclásio (Plg), titanita (Ttn). Abreviações de minerais: Kretz (1973).

anfیبólio nestas rochas: a primeira prévia à milonitização, representada pelos porfiroblastos, e a segunda, representada pelo anfیبólio retrometamórfico que ocorre nas bordas do diopsídio. Associados a essa segunda geração de anfیبólio, são reconhecidos finos simplectitos nos contatos entre clinopiroxênio e plagioclásio, caracterizados pelo intercrescimento de epidoto rico em Fe e clinozoisita com diminutas lamelas de quartzo (Figuras 2.3h). A Titanita ocorre como pequenos cristais subédricos com dimensões inferiores a 1,5mm, e contatos interlobados com o anfیبólio. Ocorre também substituindo a ilmenita que, por sua vez, apresenta-se como cristais subédricos, finos (< 0,5 mm) e dispostos segundo os planos de clivagem do anfیبólio ou em vênulas milimétricas.

2.5 QUÍMICA MINERAL

As análises de química mineral dos metabasitos de Água Azul do Norte foram obtidas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da UnB, com equipamento Jeol, modelo JXA-8230 equipado com 5 espectrômetros WDS e um EDS, sob as seguintes condições de análise: corrente de aceleração do feixe de elétrons de $20 \pm 0,1 \text{ nA}$, tensão de 15 kV e feixe de elétrons de 5 μm (de diâmetro). Silicatos naturais foram usados como padrões para todos os elementos. Foram analisados plagioclásio, anfیبólio e piroxênio, e classificados conforme as recomendações de Deer *et al.* (1992), Leake *et al.* (1997) e Morimoto (1988), respectivamente.

Plagioclásio - As variações da composição do plagioclásio analisado (Figura 2.4a) e as suas fórmulas estruturais (1, 2, 3 e 4), calculadas na base de 32 oxigênios, são apresentados na Tabela 2.1. No actinolita anfیبólito, o plagioclásio possui uma ampla variação composicional, desde oligoclásio cálcico a labradorita cálcica (An_{28} a An_{65}). As figuras 2.6 a e b evidenciam que alguns cristais de plagioclásio representam heranças ígneas, o que é indicado pelo maior conteúdo de Ca e Al total (conteúdo mais elevado da molécula anortita, $\text{An} = \sim 52$) e das razões $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ e $(\text{Al}-1)/(\text{Al}+\text{Si}-3)$. No entanto, o plagioclásio metamórfico também foi reconhecido, e apresenta-se mais enriquecido em Na e Si (mais sódico, $\text{An} = \sim 31$). O plagioclásio do diopsídio anfیبólito possui composição mais homogênea, concentrada no campo da andesina sódica (An_{31} a An_{35}). Apesar de não haver um zoneamento expressivo nos cristais deste conjunto de rochas, é possível notar o centro dos cristais levemente mais enriquecidos em Ca e Al em detrimento do Si e Na que, por sua vez, são mais abundantes nas bordas (Figura 2.6c), o que pode refletir reequilíbrio retrometamórfico.

Actinolita anfibolito – Amostra DME-34 (um cristal)

Núcleo (n): (Ab_{47,42} An_{52,23} Or_{0,35}) - (Na_{0,47} Ca_{0,52} K_{0,003}) Al_{1,58} Si_{2,43} O₈ – labradorita (1)

Borda (b): (Ab_{67,43} An_{32,23} Or_{0,34}) - (Na_{0,67} Ca_{0,32} K_{0,003}) Al_{1,40} Si_{2,61} O₈ – andesina (2)

Diopsídio Anfibolito– Amostra MDF-39 (um cristal)

Núcleo (n): (Ab_{65,26} An_{33,50} Or_{1,24}) - (Na_{0,65} Ca_{0,33} K_{0,012}) Al_{1,39} Si_{2,62} O₈ – andesina (3)

Borda (b): (Ab_{65,43} An_{33,26} Or_{1,31}) - (Na_{0,65} Ca_{0,33} K_{0,013}) Al_{1,39} Si_{2,62} O₈ – andesina (4)

Tabela 2.1. Composições químicas representativas de plagioclásio, anfibólio e piroxênio dos metabasitos de Água Azul do Norte.

Mineral	Plagioclásio						Anfibólio				Piroxênio	
	Act anfibolito			Di Anfibolito			Act anfibolito		Di anfibolito		Di anfibolito	
	DME-34		RL15	MFD-39		DME-34	RL-15	MDF-39		MFD-39		
Amostra	n	b	n	b	n	b	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	54,35	58,65	54,51	54,06	58,87	59,81	52,34	51,53	43,50	43,29	52,55	51,83
TiO ₂	0,12	0,09	0,08	0,00	0,00	0,06	0,25	0,45	1,08	0,44	0,18	0,17
Al ₂ O ₃	29,95	26,61	29,32	24,24	26,59	26,87	3,73	1,65	11,95	12,00	1,53	1,28
Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,07	0,03	0,01	0,01	0,02
FeO	0,10	0,07	0,05	0,01	0,11	0,08	12,18	6,50	17,53	17,43	9,41	9,86
MnO	0,02	0,06	0,08	0,03	0,00	0,00	0,13	0,27	0,31	0,24	0,26	0,38
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,30	14,62	10,97	11,24	13,21	12,91
CaO	10,69	6,86	10,19	8,13	7,02	7,03	12,54	23,53	11,68	11,93	23,42	23,73
Na ₂ O	5,37	7,93	5,54	9,24	7,56	7,64	0,40	0,29	1,64	1,46	0,63	0,46
K ₂ O	0,06	0,06	0,08	0,53	0,22	0,23	0,14	0,03	0,98	0,96	0,01	0,02
Total	100,65	100,33	99,84	96,23	100,41	101,72	98,04	98,93	99,65	98,99	101,21	100,65
Si	9,74	10,45	9,83	10,24	10,47	10,50	7,38	7,71	6,04	6,03	1,95	1,94
Ti	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,12	0,05	0,00	0,00
Al	6,32	5,59	6,23	5,41	5,57	5,56	0,62	0,29	1,96	1,97	0,07	0,06
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	1,45	0,71	2,09	2,09	0,29	0,31
Mn	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,46	2,84	2,33	2,41	0,73	0,72
Ca	2,05	1,31	1,97	1,65	1,34	1,32	1,91	3,29	1,79	1,84	0,93	0,95
Na	1,86	2,74	1,94	3,39	2,61	2,60	0,11	0,07	0,45	0,41	0,05	0,03
K	0,01	0,01	0,02	0,13	0,05	0,05	0,02	0,00	0,18	0,18	0,00	0,00
Total	20,02	20,13	20,02	20,82	20,07	20,04	15,00	15,00	15,00	15,00	4,03	4,04
An	52,23	32,23	50,18	31,88	33,50	33,26	-	-	-	-	-	-
Ab	47,42	67,43	49,38	65,64	65,26	65,43	-	-	-	-	-	-
Or	0,35	0,34	0,44	2,48	1,24	1,31	-	-	-	-	-	-
Mg*	-	-	-	-	-	-	0,70	0,80	0,53	0,53	-	-
Wo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,66	48,05
En	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,40	36,37
Fs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,94	15,58
Classif.	Lbr	Ands	Lbr	Ands	Ands	Ands	Mg-Hbl	Act	Mg-Hs	Mg-Hs	Di	Di

Os teores de An (anortita), Ab (albita), Or (ortoclásio), Wo (wollastonita), En (enstatita) e Fs (ferrossilita) são dados em percentagem; Mg# = Mg/(Mg+Fe⁺²); Legenda: n = núcleo; b = borda; - = sem correspondência. Act = actinolita; Ands = andesina; Lbr = labradorita; Mg-Hbl = magnésio hornblenda; Mg-Hs = magnésio hastingsita. Abreviações de minerais de Kretz (1973).

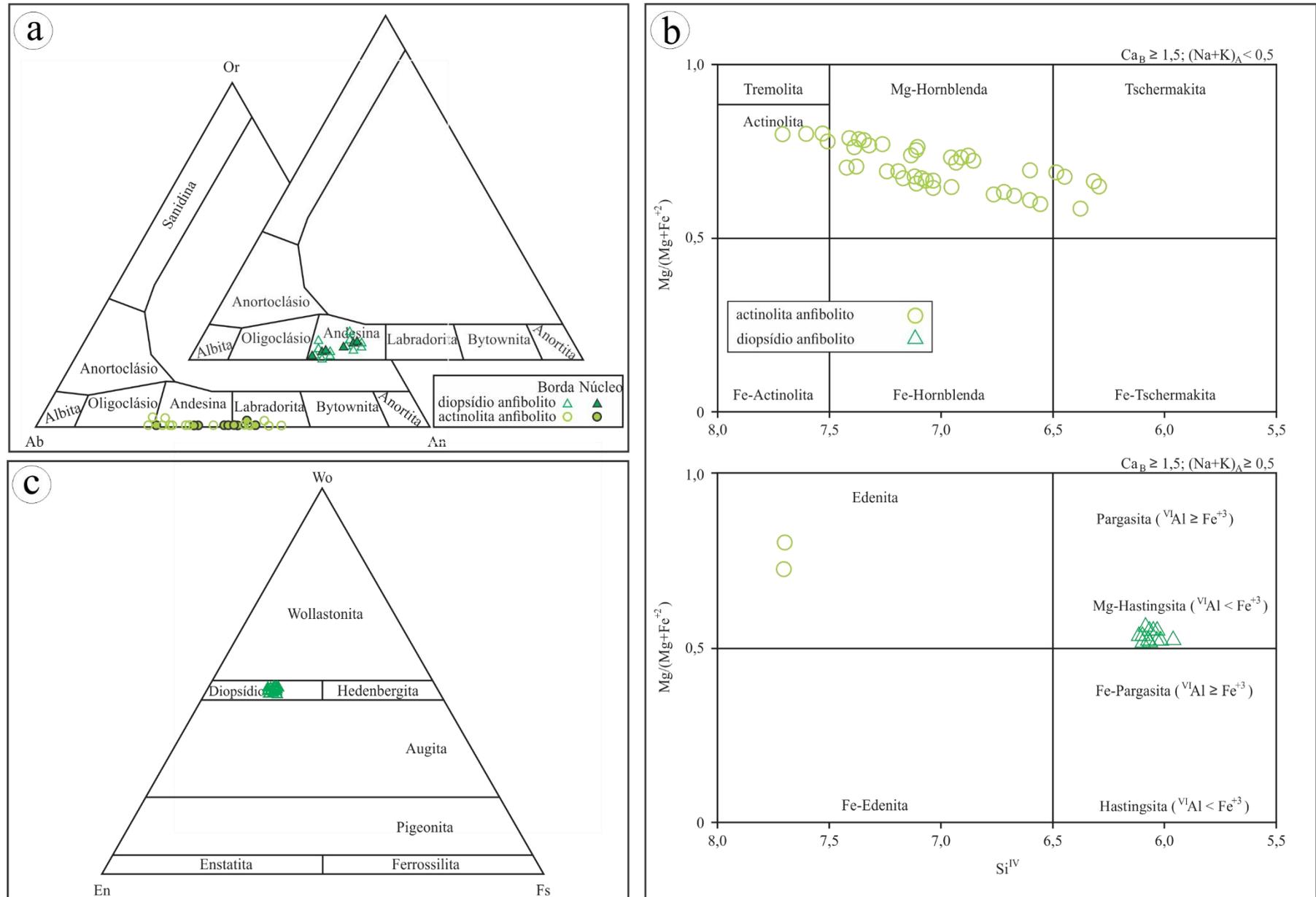


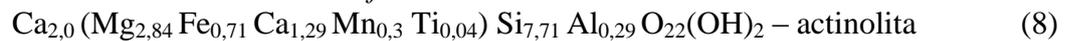
Figura 2.4- Diagramas de classificação de minerais das rochas metabásicas de Água Azul do Norte: (a) plagioclásio, segundo Deer *et al.* (1992); (b) anfíbólio, segundo Leake *et al.* (1997); e, (c) piroxênio, segundo Morimoto (1988).

Anfibólio - Os dados analíticos obtidos para o anfibólio e o cálculo de sua fórmula estrutural (7, 8 e 9) na base de 23 átomos de oxigênio são mostrados na Tabela 2.1. O anfibólio do actinolita anfibolito apresenta-se zonado com razão Mg/Fe levemente maior em relação ao anfibólio do diopsídio anfibolito. Mostra ampla variação composicional, com análises incidindo nos campos da Mg-hornblenda, tschermakita, actinolita e edenita (Figura 2.4b), de acordo com a classificação de Leake *et al.* (1997). As composições obtidas no núcleo dos cristais são mais enriquecidas em Al, Na, K e Ti, o que favorece a formação da molécula de tschermakita (Figura 2.7). Por outro lado, as bordas são empobrecidas nesses elementos e são ricas em Ca e Si, denunciando a presença de actinolita. Na transição entre tais zonas, observa-se um aumento no conteúdo de Mg, o que resulta na formação de Mg-hornblenda (Figura 2.6 e 2.7). No diopsídio anfibolito, o anfibólio além de apresentar razão Mg/Fe levemente menor do que aquela dos cristais de anfibólio do actinolita anfibolito, possui conteúdos de ^{VI}Al de $\sim 0,397$ e de Fe^{3+} entre 0,72 e 0,80, o que permite classificá-lo como Mg-hastingsita. O núcleo destes cristais é levemente empobrecido em Si e Al, e enriquecido em Mg e Ca, porém não ocorre uma variação composicional capaz de mudar a classificação dos mesmos.

Actinolita anfibolito – amostra DME-34



Actinolita anfibolito – amostra RL-15



Diopsídio anfibolito – amostra MDF-39

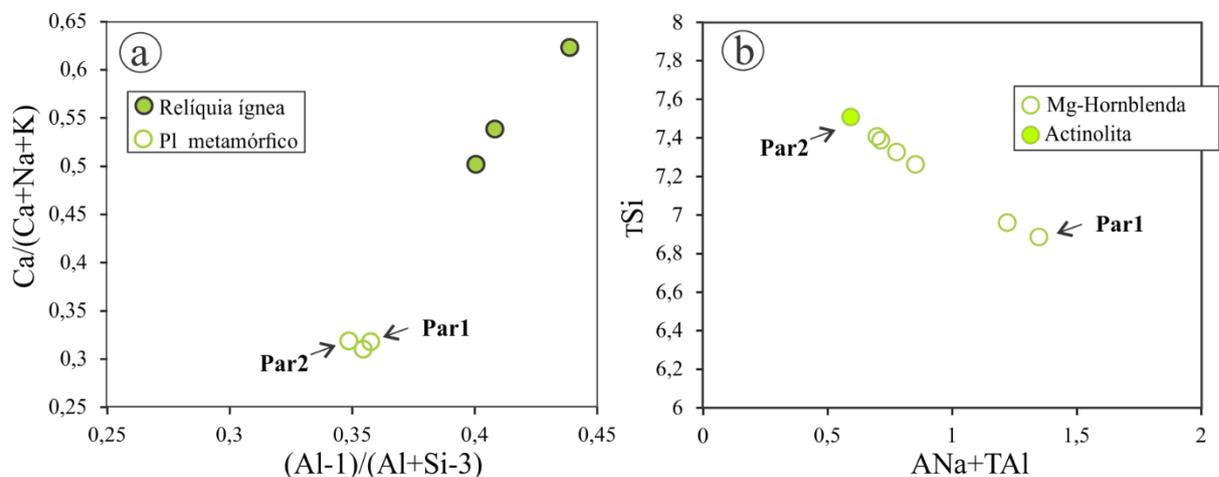


Figura 2.5- Diagrama vetorial para minerais do actinolita anfibolito, mostrando diferenças entre o plagioclásio ígneo e o metamórfico em (a), e ampla variação composicional do anfibólio em (b). Legenda: Par1 e Par2= pares escolhido para realização de cálculos no TWQ, T e A = posição estrutural do cátion.

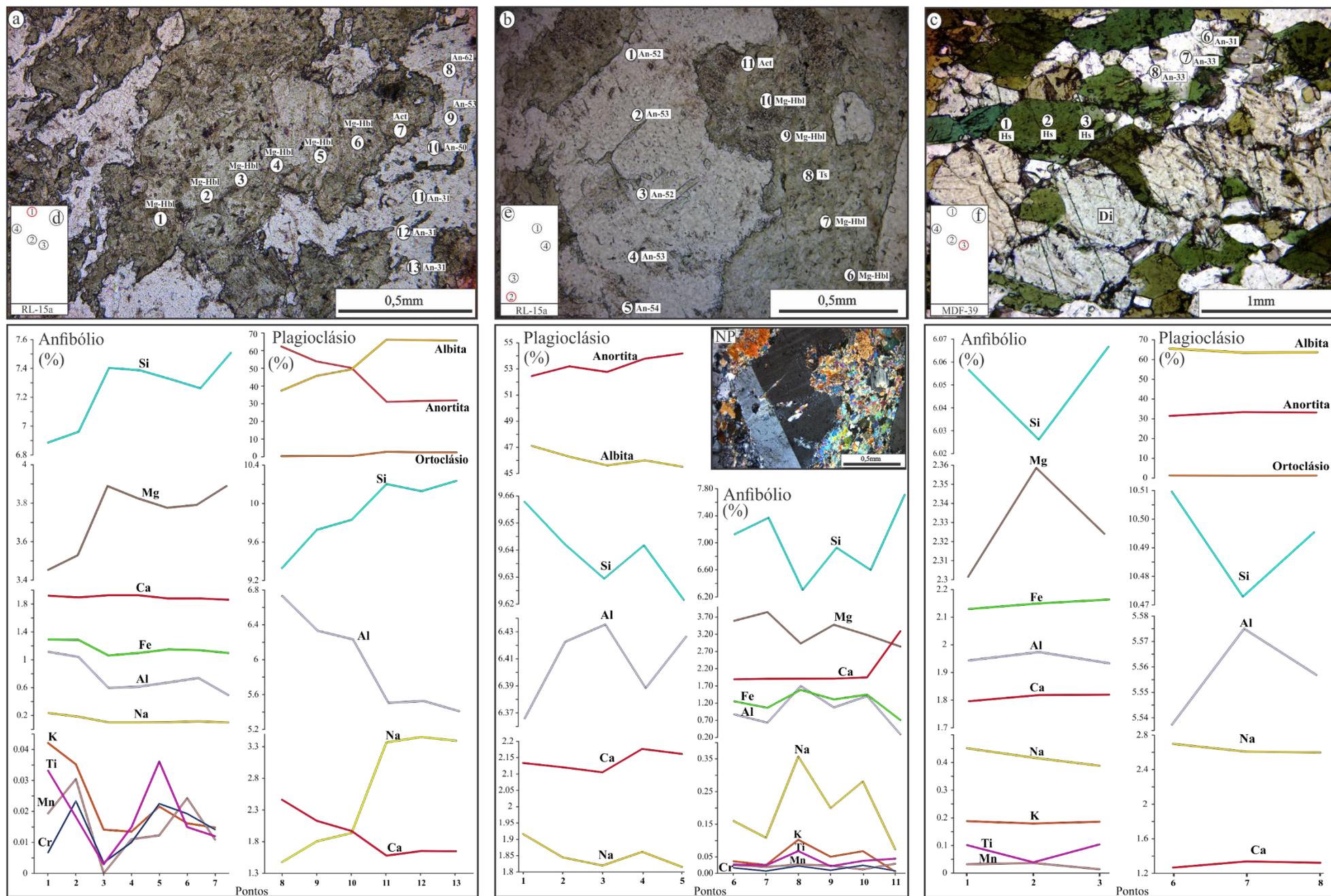


Figura 2.6. Perfis analíticos em minerais dos metabasitos de Água Azul do Norte: (a) e (b) fotomicrografias do actinolita anfibólito (NP; amostra RL-15a) e (c) do diopside anfibólito (NP; lâmina MDF-39), mostrando abaixo a variação composicional nos cristais de anfibólio e plagioclásio, das diferentes seções; (d), (e) e (f) mapa das lâminas delgadas utilizadas, com destaque para o posicionamento do círculo no qual a análise foi realizada.

Piroxênio - As fórmulas estruturais (10 e 11) desse mineral foram calculadas na base de 6 átomos de oxigênio, com seus resultados projetados no diagrama de Morimoto (1988; Figura 2.4c), que mostra as porcentagens das moléculas de wollastonita, enstatita e ferrossilita (Wo-En-Fs; ver Tabela 2.1). O piroxênio da amostra MDF-39 foi analisado em 15 pontos e apresentou um comportamento homogêneo, com todos os pontos com composição no campo do diopsídio.

Diopsídio anfíbolito – amostra MFD-39



2.6 GEOQUÍMICA

Para a caracterização geoquímica das rochas metabásicas de Água Azul do Norte, foram realizadas 18 análises químicas em rocha total no ACME - *Analytical Laboratories Ltda.* (Vancouver, CANADÁ) em 11 amostras representativas do actinolita anfíbolito e 6 do diopsídio anfíbolito (Tabela 2.2). A classificação química de Miyashiro (1978), baseada no total de álcalis vs. sílica, evidencia que as rochas metabásicas de Água Azul do Norte correspondem, em sua maioria, a basaltos subalcalinos (Figura 2.7a), com exceção de três amostras que plotam no campo do Andesito basalto (subalcalinos) e uma no campo dos basaltos alcalinos. O diagrama R1-R2 (De La Roche *et al.*, 1980; Figura 2.7b) aponta o caráter toleítico dessas rochas, com uma tendência transicional a olivina basalto. O diagrama Al_2O_3 -Al de Middlemost (1975) reforça a assinatura toleítica dessas rochas em relação aos Al-basaltos (Figura 2.7c).

Diagramas binários de variação de óxido de elementos maiores e traços em função do número de Mg (Mg#), revelam algumas diferenças entre os litotipos estudados (Figura 2.8). Em geral, estas rochas apresentam variações do Mg# no intervalo de 0,49 a 0,71, sendo que o diopsídio anfíbolito apresenta os valores mais baixos, variando entre 0,50 e 0,62, enquanto que as amostras do actinolita anfíbolito detêm os valores mais elevados, com teores entre 0,63 e 0,71, excetuando-se duas amostras com valores coincidentes aos daquelas de conteúdos mais baixos do diopsídio anfíbolito. Apesar do conjunto de amostras do actinolita anfíbolito apresentarem maior dispersão nos diagramas binários, é possível notar alguns *trends* que podem sugerir a atuação de processos de cristalização fracionada nestas rochas. Neste sentido, nota-se um decréscimo dos conteúdos de CaO, Ni e Cr com a diminuição dos valores de #Mg, enquanto que o comportamento inverso é observado para Al_2O_3 , Zr e FeO_T o que sugere um controle pelo fracionamento de minerais ferromagnesianos.

Tabela 2.2. Composições químicas das rochas metabásicas da região de Água Azul do Norte.

Liotipo	actinolita anfibólito											diopsídio anfibólito						
	Amostras	DME-22	DME-33	DME-21	DME-12	DME-24	DME-38	RL-15A	RL-14B	RL-66	RL-136	DME-09	DME-14	MDF-39	MDF-38	RL-21	MDF-31	DME-17
SiO ₂ (% em peso)	55,92	53,60	53,15	51,35	51,35	51,32	50,82	50,49	49,41	47,98	47,71	51,62	50,89	50,84	50,45	48,63	48,37	
TiO ₂	0,23	0,51	0,40	0,25	1,75	0,41	0,26	0,87	0,99	0,99	0,78	1,37	1,39	0,67	1,42	0,92	0,85	
Al ₂ O ₃	15,80	15,60	16,63	13,14	11,51	14,79	14,10	7,02	5,67	14,92	14,87	9,06	8,30	13,83	9,07	15,25	15,49	
Fe ₂ O _{3t}	6,07	7,82	7,27	8,52	14,45	8,17	8,28	12,61	12,61	14,74	10,36	13,08	13,26	11,14	13,85	13,90	14,15	
MnO	0,10	0,11	0,12	0,12	0,29	0,12	0,12	0,24	0,20	0,22	0,16	0,21	0,20	0,16	0,20	0,21	0,21	
MgO	6,05	6,74	6,64	10,76	7,27	9,04	10,30	13,72	15,74	7,02	9,67	9,91	11,05	8,69	10,04	7,19	7,20	
CaO	10,05	10,73	10,73	12,19	7,81	12,69	12,04	11,49	11,94	10,52	8,84	11,22	11,00	10,51	10,52	10,44	10,27	
Na ₂ O	4,26	3,87	3,37	1,98	3,82	2,42	2,18	1,40	1,19	2,08	2,04	2,05	1,79	2,91	2,28	2,20	2,10	
K ₂ O	0,25	0,21	0,51	0,52	0,61	0,30	0,30	0,35	0,26	0,53	1,52	0,67	0,72	0,62	0,59	0,39	0,31	
P ₂ O ₅	0,05	0,05	0,07	0,04	0,15	0,04	0,03	0,06	0,08	0,10	0,23	0,13	0,10	0,09	0,11	0,08	0,07	
LOI	1,00	0,60	0,90	0,90	0,70	0,50	1,30	1,40	1,50	0,70	3,40	0,40	0,90	0,30	1,20	0,60	0,80	
Total	99,80	99,86	99,82	99,88	99,71	99,89	99,83	99,75	99,81	99,84	99,64	99,79	99,73	99,83	99,78	99,85	99,86	
K (ppm)	2075	1743	4234	4317	5064	2490	2490	2906	2158	4400	12618	5562	5977	5147	4898	3238	2573	
Ba	74	73	109	75	220	50	83	194	35	122	843	210	325	105	220	63	96	
Rb	4,30	6,20	21,60	18,50	25,80	12,50	17,30	5,60	1,40	10,40	38,20	12,30	5,30	11,60	9,60	9,50	12,90	
Sr	278	218	232	116	546	150	126	290	134	123	598	263	240	124	259	171	124	
Zr	32	51	30	15	148	30	17	59	68	60	80	102	102	82	104	54	52	
Ti	1379	3058	2398	1499	10492	2458	1559	5216	5935	5935	4676	8213	8333	4017	8513	5516	5096	
Nb	1,10	4,60	1,90	3,20	11,60	3,60	3,40	7,80	7,90	2,80	4,80	14,40	9,30	6,30	9,20	3,30	5,10	
Y	8,80	13,10	10,20	6,90	20,30	9,90	6,20	14,00	17,50	22,30	13,80	14,70	35,50	21,70	22,10	19,20	19,00	
Ga	13,40	14,30	14,10	9,40	17,80	11,00	11,30	10,60	8,40	17,20	14,90	13,60	13,50	13,80	13,50	16,90	14,80	
Sc	34,00	34,00	31,00	45,00	29,00	45,00	47,00	41,00	37,00	42,00	37,00	35,00	35,00	36,00	37,00	42,00	41,00	
Th	1,00	1,70	2,20	0,50	4,10	0,80	0,20	1,10	1,40	0,70	1,50	2,30	2,40	2,60	2,00	0,90	0,50	
U	0,20	0,30	<0,1	<0,1	0,80	0,20	<0,1	0,10	0,50	0,20	0,20	0,60	0,40	0,40	0,20	0,10	0,20	
V	163	172	152	181	254	197	186	222	203	289	206	244	243	210	261	270	257	
Cr	144	151	219	732	21	616	705	691	1505	246	411	458	889	506	363	239	253	
La (ppm)	6,90	5,10	3,80	3,20	22,30	4,20	3,20	18,40	16,30	6,20	22,70	19,10	51,70	13,20	66,80	5,00	4,30	
Ce	8,10	10,80	8,70	5,40	47,50	10,20	5,00	26,20	23,10	11,20	42,70	37,20	37,30	25,70	34,30	11,10	7,80	
Pr	1,29	1,54	1,23	0,66	6,44	1,23	0,58	4,60	4,48	1,54	5,17	4,95	14,77	3,36	14,00	1,68	1,35	
Nd	5,70	6,90	5,10	3,20	27,20	5,80	3,00	19,00	18,90	7,60	19,30	21,70	61,80	13,80	51,70	7,30	7,40	
Sm	1,09	1,61	1,32	0,81	6,42	1,27	0,63	3,67	4,37	2,33	3,05	4,50	12,90	2,66	9,77	2,14	2,02	
Eu	0,35	0,64	0,44	0,30	1,76	0,56	0,34	1,32	1,34	0,90	1,04	1,34	4,20	0,68	2,65	0,85	0,71	
Gd	1,42	2,12	1,74	1,18	5,69	1,72	1,10	3,88	4,49	3,15	2,87	4,11	11,65	3,61	7,86	3,21	2,76	
Tb	0,23	0,36	0,28	0,18	0,88	0,29	0,21	0,63	0,65	0,60	0,46	0,62	1,64	0,63	1,16	0,59	0,50	
Dy	1,19	2,03	1,64	1,13	4,77	1,90	1,44	3,18	3,33	3,51	2,72	3,24	7,66	3,57	5,44	3,50	3,37	
Ho	0,28	0,48	0,38	0,24	0,81	0,41	0,29	0,55	0,62	0,79	0,55	0,56	1,35	0,74	0,88	0,77	0,72	
Er	0,81	1,32	1,10	0,74	2,05	1,06	0,80	1,34	1,54	2,12	1,71	1,40	3,16	2,34	2,28	2,16	2,01	
Tm	0,11	0,21	0,19	0,09	0,30	0,17	0,10	0,19	0,18	0,34	0,25	0,19	0,39	0,32	0,29	0,32	0,28	
Yb	0,71	1,31	1,06	0,74	1,71	1,11	0,74	1,16	1,05	2,15	1,42	1,15	2,14	2,11	1,73	2,28	2,02	
Lu	0,12	0,22	0,17	0,10	0,25	0,16	0,10	0,18	0,15	0,39	0,24	0,17	0,31	0,32	0,26	0,35	0,31	
La/Yb N	6,55	2,62	2,42	2,92	8,79	2,55	2,92	10,69	10,47	1,94	10,78	11,20	16,29	4,22	26,03	1,48	1,44	
La/Sm N	3,98	1,99	1,81	2,49	2,18	2,08	3,20	3,15	2,35	1,67	4,68	2,67	2,52	3,12	4,30	1,47	1,34	
Gd/Yb N	1,61	1,31	1,32	1,29	2,69	1,25	1,20	2,70	3,45	1,18	1,63	2,88	4,39	1,38	3,67	1,14	1,10	
# Mg	0,66	0,63	0,64	0,71	0,50	0,69	0,71	0,68	0,71	0,49	0,65	0,60	0,62	0,61	0,59	0,51	0,50	

O diagrama de elementos terras raras (ETR) normalizado para os valores do condrito, segundo Boynton (1984; Figura 2.9a, e b), mostra que os metabasitos podem ser divididos em dois subgrupos: (i) anfibólitos com razão Gd/Yb_N maior que 2 (Figura 2.9a), semelhante aos toleítos enriquecidos de Condie (1981), estes possuem padrão semelhante aos basaltos de ilha oceânica (OIB) e uma pronunciada anomalia negativa de Ce que pode evidenciar um ambiente com mais alto grau de oxidação; e (ii) anfibólitos com Gd/Yb_N próximo de 1 (Figura 2.9b), correlato a toleítos empobrecidos de Condie (1981), em contrapartida, este grupo apresenta menor fracionamento de ETRL e assemelha-se ao padrão ETR do E-MORB. Tais diferenças pode ser resultado da heterogeneidade do reservatório fonte dessas rochas ou envolvimento de processos de assimilação crustal e/ou metassomáticos.

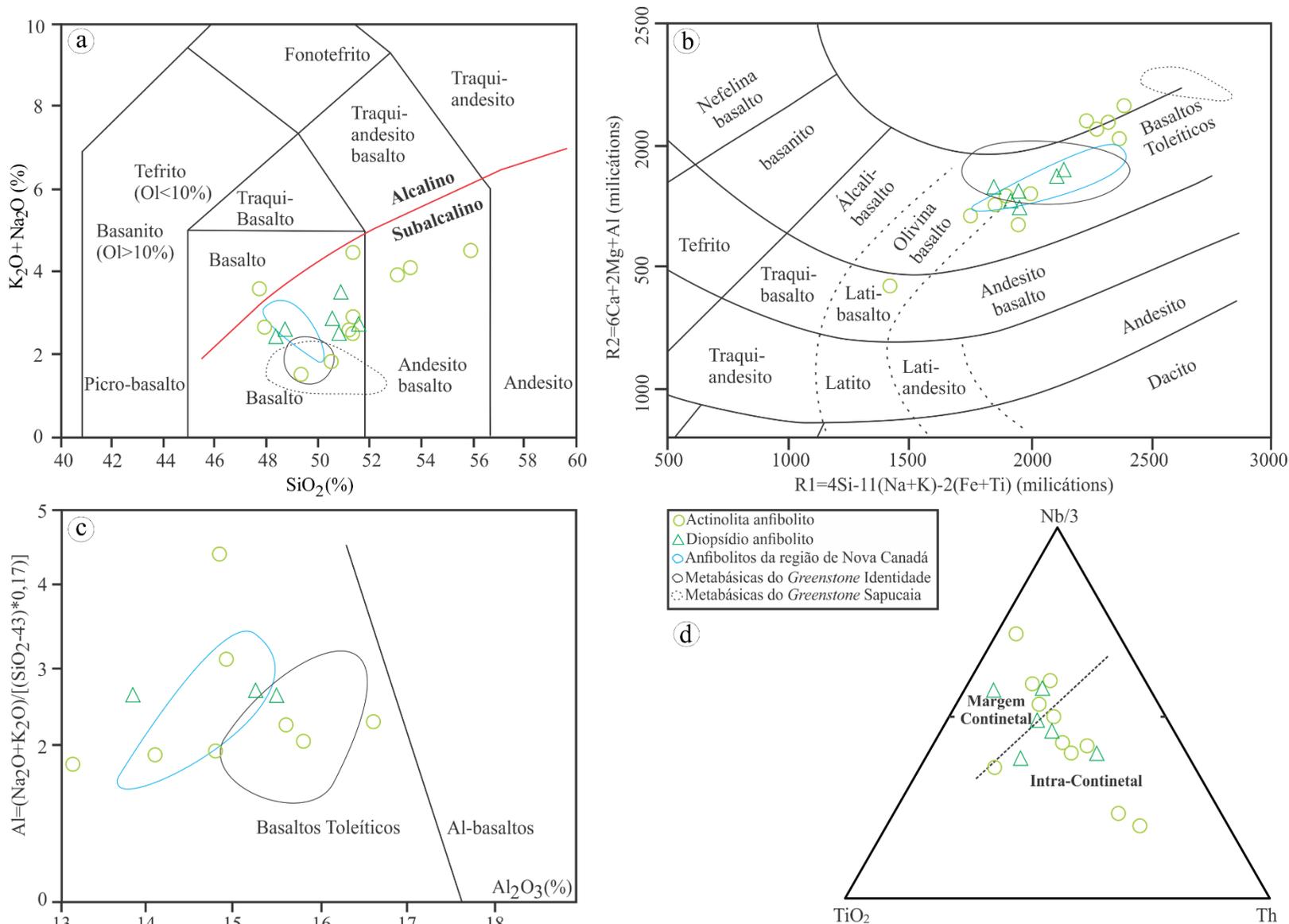


Figura 2.7- Diagramas geoquímicos discriminantes com plotagem dos metabásitos de Água Azul do Norte: (a) diagrama de classificação geral dos litotipos estudados, de acordo com Miyashiro (1978); (b) diagrama R1-R2 de De La Roche *et al.* (1980), evidenciando caráter toleítico dessas rochas, com tendência transicional a olivina basalto; (c) diagrama Al_2O_3 -Al de Middlemost (1975), reforçando o caráter toleíticos dos anfíbolitos de Água Azul do Norte em relação aos Al-basaltos; (d) Diagrama de discriminação de ambiente TiO_2 -Nb/3-Th para essas rochas, segundo Pearce *et al.* (1975)

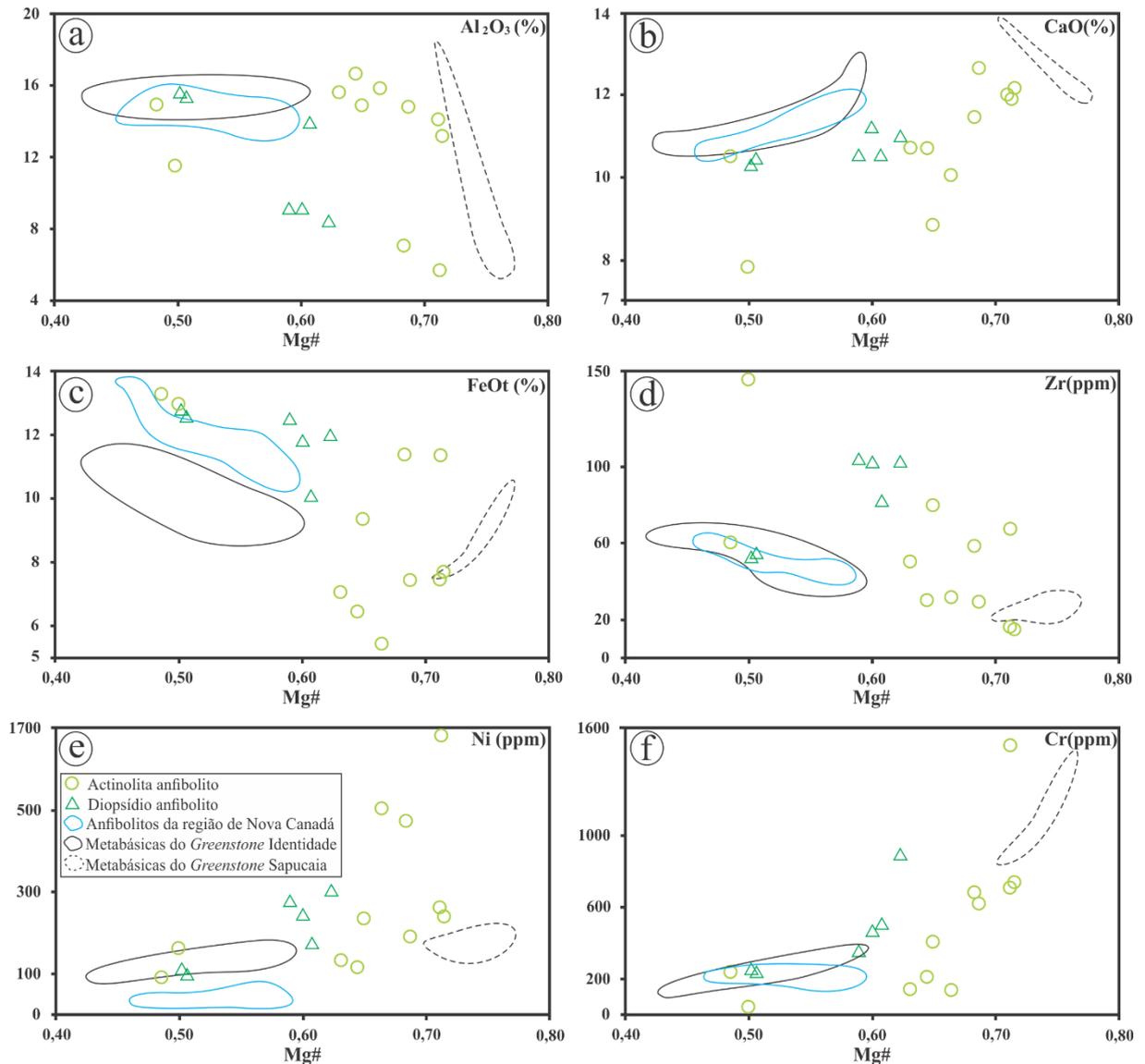


Figura 2.8- Diagramas de variação Mg# versus óxidos elementos maiores (%) e elementos traços (ppm) dos metabasitos de Água Azul do Norte [Mg# = MgO/(MgO+FeO_T) em razão molar]. Campo referente aos anfibolitos de Nova Canadá segundo Marangoanha & Oliveira (2014), e rochas metabásicas dos *Greenstones* Identicidade e Sapucaia, segundo Souza *et al.* (1996) e Sousa *et al.* (2015), respectivamente.

No diagrama multielementar, normalizado pelo manto primitivo (Wood *et al.*, 1979; Figura 2.9b, e c), os metabasitos apresentam dois padrões, similares aos discutidos por Holm (1985): (i) basaltos toleíticos de baixo K (Figura 2.9a; amostras DME-22, RL-15A, RL-136 e DME-12), típicos de margens continentais e arcos de ilha, com pronunciada anomalia negativa de Nb, moderada anomalia negativa de Ti e P, e anomalias positivas de Ba, La e Sm, sendo que a amostragem para esse grupo se restringe ao actinolita anfibolito; e (ii) basaltos toleíticos continentais (Figura 2.9b; amostras DME-24, MDF-38 e DME-14), com um padrão mais fracionado e moderada anomalia negativa de Nb sendo importante. O diopsídio anfibolito predomina neste grupo.

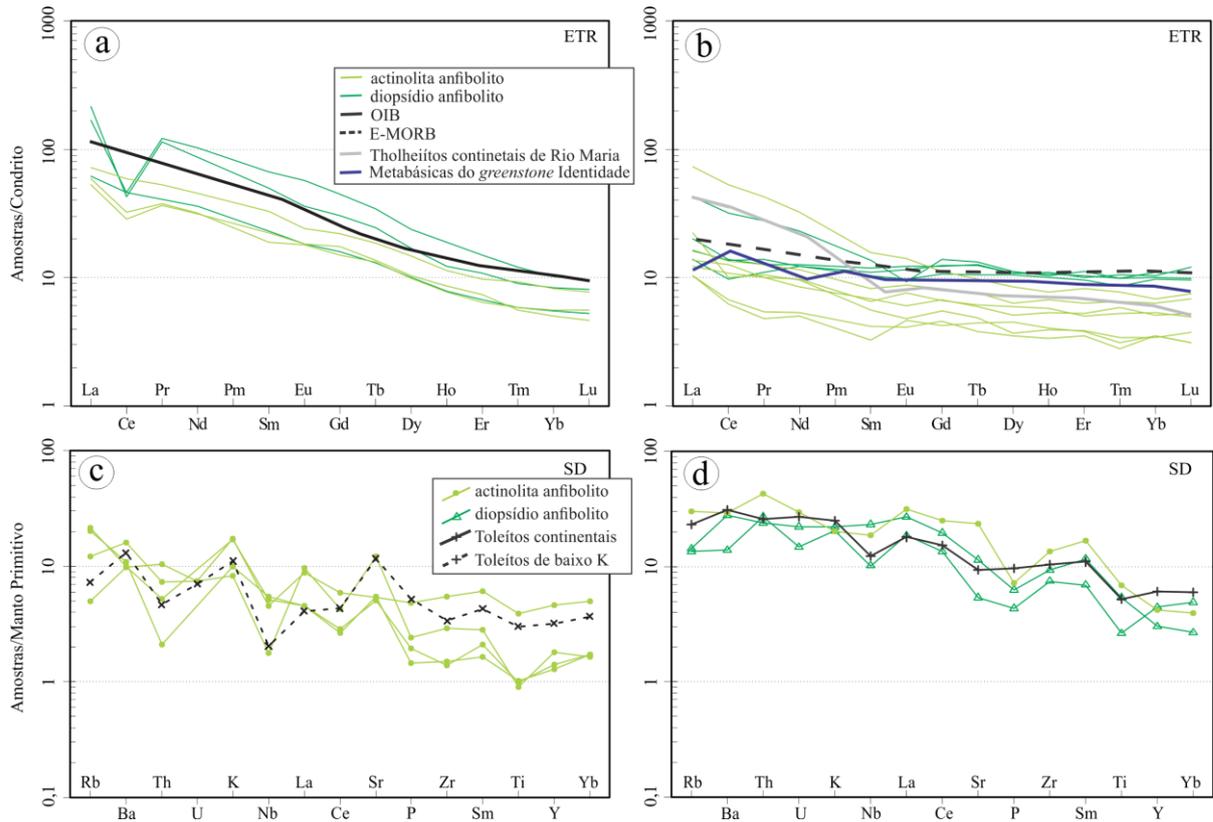


Figura 2.9- Digramas geoquímicos dos metabasitos de Água Azul do Norte: (a) e (b) diagramas de elementos terras raras (ETR) normalizado para os valores do condrito, segundo Boynton (1984), (a) $Gd/Yb_N > 2$ e (b) $Gd/Yb_N \sim 1$; (c) e (d) diagramas multielementares, normalizados ao manto primitivo, segundo Wood *et al.* (1979). Padrões (a) OIB e (b) E-MORB segundo Boynton (1984), (b) Toleiitos continentais de Rio Maria segundo Silva Jr. *et al.* (1999), (b) metabásicas do greenstone identidade segundo Souza & Dall’Agnol (1995), e (c) Toleiitos de baixo K e (d) Toleiitos continentais segundo Holm (1985).

2.7 METAMORFISMO

Uma vez que os dois grupos de rochas metabas de Água Azul do Norte apresentam paragêneses metamórficas distintas, a determinação da evolução do metamorfismo deve registrar trajetórias metamórficas diferentes nesses litotipos. Para isso, cálculos geotermobarométricos foram realizados a fim de estimar as condições de P-T do pico metamórfico e o retrometamorfismo, pelo qual essas rochas foram submetidas. O grau de equilíbrio das paragêneses foi testado com uma base de dados termodinâmicos internamente consistentes, com a utilização do *software* TWQ1 (Berman 1991).

Diopsídio anfíbolito - apresenta paragêneses minerais do pico metamórfico com $Di+MgHs+Ands$ e associações minerais retrometamórficas com Mg-hastingstita e simplectitos de epidoto-clinzoisita e quartzo. Os cálculos para a paragênese de pico metamórfico desse litotipo foram realizados considerando o sistema químico Mg-Ca-K-Na-Fe-Mn-Ti-Al-Si-H₂O-CO₂ e as reações (Tabela 2.3) entre os membros finais diopsídio, albita-anortita, tremolita-tschermakita-pargasita e quartzo beta (Figura 2.10a). Também foram feitos cálculos para a mesma paragênese mineral, incluindo-se também os membros finais

ricos em ferro (hedenbergita, Fe-tschersmackita, Fe-actinolita, Fe-pargasita, na presença de quartzo beta; Figura 2.10b).

Por esse método, as condições de equilíbrio para a associação de pico metamórfico foram estimadas em aproximadamente 5,1 kbar e 540 °C, a $X_{H_2O} = 1,0$. Cálculos considerando também os membros finais ricos em ferro evidenciam condições P-T análogas, definidas pela área de intersecção das reações dependentes da temperatura, ou geotermômetros, e da reação dependente da pressão – geobarômetro. Contudo, esses cálculos resultam em estimativas mais imprecisas e evidenciam disequilíbrios (Figura 2.10b).

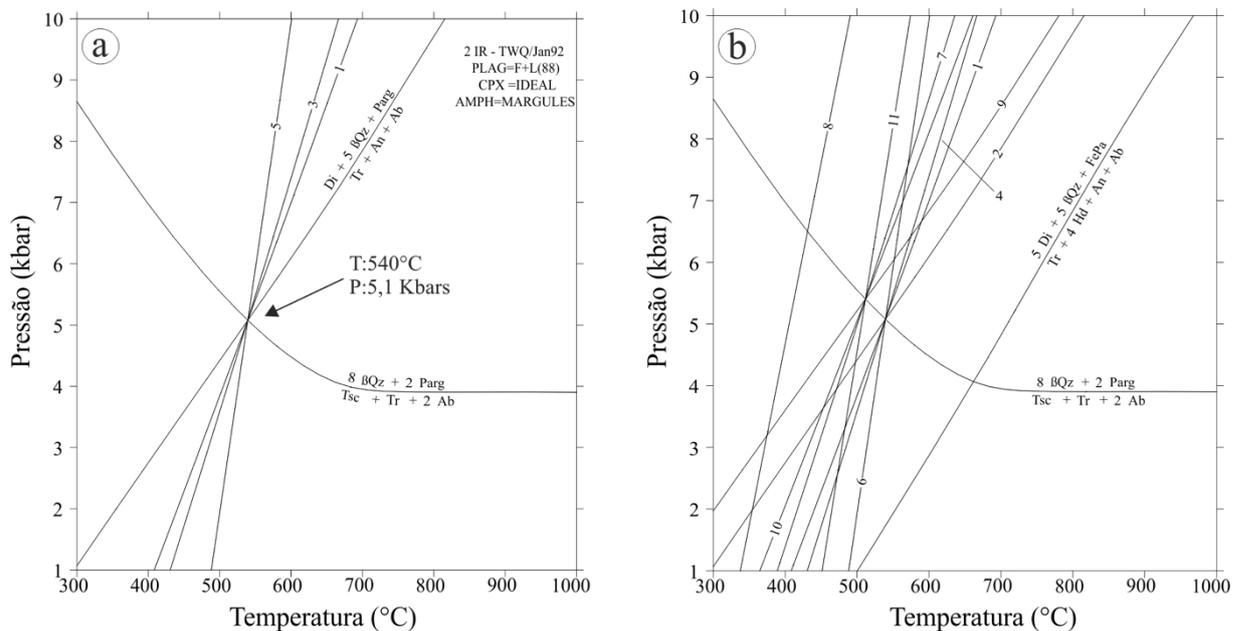


Figura 2.10- Condições termobarométricas estimadas a partir do TWQ1 para a paragênese de pico metamórfico do diopsídio anfibolito, estimadas a partir da composição do plagioclásio, diopsídio e da Mg-hastingstita, considerando: (a) presença dos membros finais diopsídio, tschermackita, tremolita, pargasita, albita, anortita, na presença de quartzo beta e H_2O ; e (b) presença dos membros finais diopsídio, hedenbergita, Fe-tschermackita, Fe-actinolita, Fe-pargasita, albita, anortita, na presença de quartzo beta e H_2O . As reações são indicadas por números e apresentadas na Tabela 2.2. Abreviações de minerais: Kretz (1973). Atividades dos membros finais de Berman (1988); McMullin *et al.* (1991); Mader & Berman (1992); Fuhrman & Lindsley (1988).

As texturas coroníticas e simplectíticas refletem reações metamórficas relativas à evolução retrógrada. Comumente, a Mg-hastingstita ocorre na borda do diopsídio, separando-o do plagioclásio e é, por sua vez, envolvido pelos simplectitos de epidoto-clinozoisita-quartzo. Embora a Mg-hastingstita represente uma fase mineral estável no pico metamórfico, essas texturas também evidenciam sua formação a partir de reações entre diopsídio e plagioclásio. Localmente, simplectitos são observados internamente na Mg-hastingstita, indicando progressão dessa reação e consumo total do diopsídio. Tais relações texturais permitem sugerir a formação dos simplectitos e do anfibólio retrometamórfico, a partir da reação:



A reação acima é análoga aquela estimada por Chalokwu e Kuehner (1992) para texturas simplectíticas de epidoto-quartzo descritas em metabasitos metamorfisados em fácies anfíbolito dos Apalaches, na Geórgia, EUA. Cálculos de balanço de massa permitiram estimar a seguinte reação retrometamórfica:

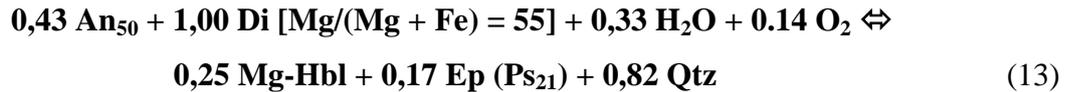


Tabela 2.3. Reações metamórficas consideradas nos cálculos termobarométricos das condições P-T de pico metamórfico do diopsídio anfíbolito

Reações metamórficas (a): *End members*: Di-Ts-Parg-Tr-Ab-An

-
- 1) $2 \text{ Di} + 2 \text{ bQz} + \text{Ts} = \text{Tr} + 2 \text{ An}$
 - 2) $\text{Di} + 5 \text{ bQz} + \text{Parg} = \text{Tr} + \text{An} + \text{Ab}$
 - 3) $2 \text{ Ab} + 8 \text{ Di} + 5 \text{ Ts} = 2 \text{ Parg} + 3 \text{ Tr} + 8 \text{ An}$
 - 4) $8 \text{ bQz} + 2 \text{ Parg} = \text{Ts} + \text{Tr} + 2 \text{ Ab}$
 - 5) $\text{Ab} + \text{Di} + \text{Ts} = \text{Parg} + 3 \text{ bQz} + \text{An}$
-

Reações metamórficas (b): *End members*: Di-Hd; Fe-Ts; Fe-Parg; Fe-Act; Ab-An

-
- 1) $2 \text{ Di} + 2 \text{ bQz} + \text{Ts} = \text{Tr} + 2 \text{ An}$
 - 2) $\text{Di} + 5 \text{ bQz} + \text{Parg} = \text{Tr} + \text{An} + \text{Ab}$
 - 3) $5 \text{ Di} + 5 \text{ bQz} + \text{Fe-Parg} = \text{Tr} + 4 \text{ Hd} + \text{An} + \text{Ab}$
 - 4) $2 \text{ Ab} + 8 \text{ Di} + 5 \text{ Ts} = 2 \text{ Parg} + 3 \text{ Tr} + 8 \text{ An}$
 - 5) $8 \text{ bQz} + 2 \text{ Parg} = \text{Ts} + \text{Tr} + 2 \text{ Ab}$
 - 6) $\text{Ab} + \text{Di} + \text{Ts} = \text{Parg} + 3 \text{ bQz} + \text{An}$
 - 7) $2 \text{ Ab} + 8 \text{ Hd} + 5 \text{ Ts} = 2 \text{ Fe-Parg} + 3 \text{ Tr} + 8 \text{ An}$
 - 8) $\text{Ab} + 4 \text{ Hd} + \text{Ts} = \text{Fe-Parg} + 3 \text{ bQz} + 3 \text{ Di} + \text{An}$
 - 9) $5 \text{ Parg} + 20 \text{ bQz} + 4 \text{ Hd} = 4 \text{ Ab} + 4 \text{ An} + 4 \text{ Tr} + \text{Fe-Parg}$
 - 10) $\text{Parg} + 2 \text{ Ts} + 4 \text{ bQz} + 4 \text{ Hd} = 4 \text{ An} + 2 \text{ Tr} + \text{Fe-Parg}$
 - 11) $4 \text{ Ab} + 4 \text{ Hd} + 4 \text{ Ts} = \text{Fe-Parg} + 3 \text{ Parg} + 12 \text{ bQz} + 4 \text{ An}$
-

Legenda: Ab=albita, An=anortita, bQz=Quartzo beta, Di=diopsídio, Fe-Act=ferro-actinolita, Fe-Parg=ferro-pargasita, Fe-Ts=ferro-tschermackita, Hd=hedenbergita, Parg=pargasita, Tr= tremolita, Ts= tschermackita. Abreviações de acordo com Kretz (1973).

Cálculos geotermobarométricos não foram feitos para a associação mineral de retrometamorfismo, uma vez que a ocorrência de simplectitos evidencia desequilíbrio. Contudo, essa associação mineral sugere condições de retrometamorfismo na fácies anfíbolito inferior, ou epidoto anfíbolito, o que é corroborado pela presença de titanita, que torna-se

instável em condições superiores. Adicionalmente, a textura simplectítica também sugere, como discutido por Chalokwu e Kuehner (1992), alta atividade de H₂O durante o retrometamorfismo. O desenvolvimento de foliação milonítica nessas rochas, que pode favorecer processos associados a influxos de H₂O, contudo, resulta em maior consumo total do diopsídio e progressiva destruição das texturas simplectíticas. Portanto, os anfibolitos cisalhados apresentam predominantemente a associação de Mg-hastingsita-plagioclásio-epidoto-quartzo-titanita, que também pode ser explicada como produto da reação (1).

Actinolita anfibolito - apresenta relíquias de textura e minerais ígneos. Porém, nessas rochas foi possível também a identificação de associações minerais metamórficas parciais que refletem tanto as condições de pico metamórfico, estimadas a partir do núcleo dos minerais, como de retrometamorfismo, estimadas a partir de suas bordas. A escolha dos pares minerais (anfibólio-plagioclásio) para os cálculos termobarométricos foi feita considerando-se os vetores $Ca/(Ca+Na+K)$ e $(Al-1)/(Al+Si-3)$, mostrados na Figura 2.5, que indicam trocas catiônicas sensíveis às mudanças nas condições de temperatura e pressão.

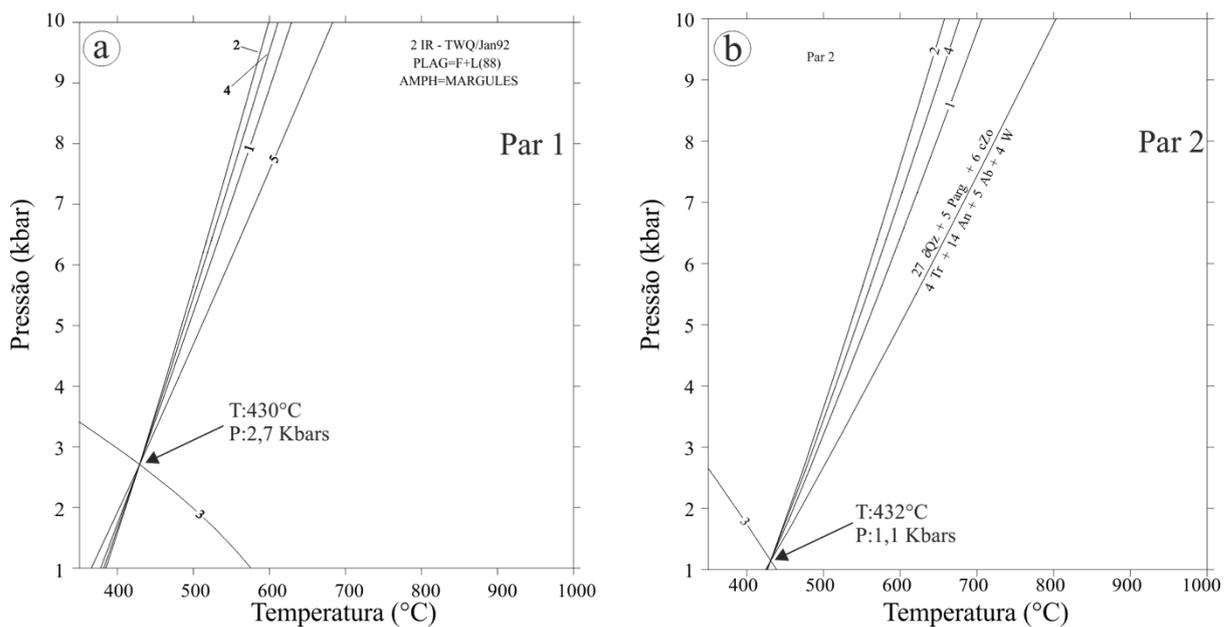


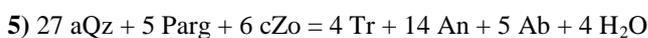
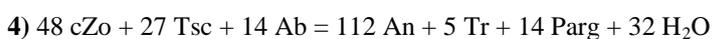
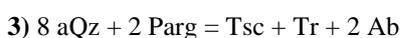
Figura 2.11- Condições termobarométricas estimadas a partir do TWQ1 para o actinolita anfibolito considerando-se a composição de pares minerais em equilíbrio: (a) Mg-hornblenda-plagioclásio do pico metamórfico; (b) actinolita-plagioclásio retrometamórficos. Foram considerados para os cálculos a presença dos *end-members* tschermackita, tremolita, pargasita, zoisita, albita e anortita, na presença de quartzo alfa e H₂O. As reações são indicadas por números e apresentadas na Tabela 2.3. Abreviações de minerais: Kretz (1973). Atividades dos membros finais de Berman (1988); McMullin *et al.* (1991); Mader & Berman (1992); Fuhrman & Lindsley (1988).

Os cálculos realizados para o actinolita anfibolito consideraram o sistema Mg-Ca-K-Na-Fe-Mn-Ti-Al-Si-H₂O-CO₂ e as reações (Tabela 2.4) entre os membros finais tschermackita, tremolita, pargasita, zoisita, albita e anortita, na presença de quartzo alfa e H₂O (Figura 2.11).

Por esse método, as condições de equilíbrio para a associação de pico metamórfico foram estimadas em aproximadamente 2,7 kbar e 430 °C (Figura 2.14a), a $X_{H_2O} = 0,9$ e $X_{CO_2} = 0,1$. Cálculos para a associação retrometamórfica indicaram equilíbrio a 1,1 kbar e 432,50 °C (Figura 2.14b).

Tabela 2.4. Reações metamórficas consideradas nos cálculos geotermobarométricos das condições P-T de pico metamórfico e de retrometamorfismo do actinolita anfíbolito.

Reações metamórficas (a) e (b): End members: Ts-Tr-Parg; Zo; Ab-An;



Legenda: Ab=albita, An=anortita, aQz=Quartzo alfa, cZo=clinozoisita, Parg=pargasita, Tr= tremolita, Ts= tschermackita, Zo=Zosita.

2.8 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

2.8.1 Sobre o regime deformacional e colocação dos corpos

No domínio sul da área, o **actinolita anfíbolito**, que é intrusivo em granitoides TTG, apresenta textura ígnea preservada e uma fraca foliação de orientação N-S, provavelmente mais antiga. Na porção norte, este corpo sofre forte influência de deformação com inflexão e transposição para NE, gerando foliações com direção NE-SW a E-W. Tal arranjo sugere que estruturas N-S no embasamento TTG condicionaram a colocação do magma máfico precursor do corpo de anfíbolito, que ainda sofreu efeitos da tectônica regional. Evidências microestruturais, tais como anisotropia, relíquias de cristais de plagioclásio e piroxênio ígneos, plagioclásio com zoneamento composicional, cristais prismáticos de plagioclásio (mineralogia ígnea) com microfraturas preenchidas por anfibólio, plagioclásio e quartzo, associados à textura blasto-subofítica, indicam que o protólito sofreu deformação em estágio submagmático (magma em proporções menores que 10-20% para rochas gabroicas, Nicolas *et al.* (1988), no qual a deformação envolve fluxo de magma e cristais, acompanhada de deformação cristaloplástica (Paterson *et al.* 1998; Blenkinsop 2000; Vernon 2004); enquanto que quartzo com extinção ondulante e localmente recristalizado na forma de subgrãos ou *ribbon* indicam que estas rochas sofreram ainda um pico de deformação no estado sólido em profundidades rasas, em condições de crosta relativamente fria e com pouca influencia de deformação dinâmica (Passchier & Trouw 2005; Fossen 2012). O amplo espectro composicional do plagioclásio (An_{28-65}), além das altas razões $Ca/(Ca+Na+K)$ de alguns cristais, confirmam a presença de heranças ígneas nessas rochas. Já os anfíbolitos

pertencentes à variedade **diopsídio anfibolito**, formam pequenos corpos anastomosados com orientação subparalela à uma zona de cisalhamento sinistral de orientação NW-SE, o que sugere que a foliação milonítica dessa variedade tenha relações genéticas com tal estrutura. A presença de texturas nematoblástica e porfiroblástica, trama planar bem desenvolvida, diopsídio na paragênese e ausência de resquícios texturais do seu protólito, reforçam a hipótese da importante atuação de um regime de deformação dúctil em profundidades relativamente elevadas nestes corpos.

Os cristais de anfibólio do **actinolita anfibolito** apresentam-se zonados, com maior razão Mg/Fe em relação aqueles do **diopsídio anfibolito**, e mostram ainda, uma ampla variação composicional (Mg-hornblenda, tschermakita, actinolita e edenita), enquanto que neste último o anfibólio apresenta composição uniforme (Mg-hastingsita). Comportamento similar também é observado para os cristais de plagioclásio destas variedades, sendo que aqueles do **actinolita anfibolito** variam de oligoclásio à labradorita, contrastando com a composição restrita à andesina sódica (An₃₁₋₃₅) do plagioclásio do **diopsídio anfibolito**. Tais contrastes composicionais também foram identificados nos anfibolitos de Nova Canadá por Marangoanha & Oliveira (2014). Nestes, as amostras que sofreram menor influência da deformação apresentam comportamento análogo às amostras do actinolita anfibolito, com o plagioclásio variando de andesina sódica a bytownita sódica (An₃₄₋₇₈) e o anfibólio de composições de Mg-tschermakita, Mg-hornblenda e Fe-tschermakita, enquanto que naquelas mais deformadas, predominam pargasita e andesina sódica (An₃₄₋₃₇). Tal comportamento indica o maior envolvimento de fluídos e uma cinética de reações metamórficas mais eficaz nas rochas do diopsídio anfibolito, submetidas à tensões cisalhantes em níveis crustais mais profundos (~15 km).

2.8.2 Sobre a natureza do protólito

Os anfibolitos de Água Azul do Norte possuem protólitos de composição basáltica pertencentes à série toleítica. O **actinolita anfibolito** apresenta maior semelhança, em termos de Mg#, com os metabasitos do Grupo Sapucaia, enquanto que o **diopsídio anfibolito** possui afinidade com os metabasitos do Supergrupo Identidade do TGGRM e com os corpos anfibolíticos de Nova Canadá. As amostras do **actinolita anfibolito** com os mais baixos valores de Mg# (0,49 – 0,51) representariam líquidos basálticos mais evoluídos (Jaques & Green 1979; Jaques & Green 1980; Takahashi & Kushiro 1983; Bossi *et al.*, 1993). Os valores de Mg# mais elevados de algumas amostras do **actinolita anfibolito** (0,63 – 0,71) indicariam um protólito de líquido primário derivado de peridotitos mantélicos, enquanto os

valores inferiores do **diopsídio anfíbolito** (0,50 – 0,62) evidenciarão uma evolução moderada destas magmas. O decréscimo de CaO, Ni e Cr com a evolução destas rochas sugere o fracionamento de olivina, diopsídio e cromita.

2.8.3 Ambiente tectônico

O **diopsídio anfíbolito** apresenta padrão geoquímico multielementar compatível com aquele dos basaltos toleíticos continentais discutidos por Holm (1985), com importante anomalia negativa de Nb, que indicaria participação de crosta continental durante os processos magmáticos ou a presença de uma fase residual rica em Nb (rutilo) durante a fusão parcial (Thompson 1984; Weaver & Tarney 1985; Wilson 1989). As moderadas anomalias negativas de Zr, Ti e P, a leve anomalia positiva de Sr e a acentuada anomalia negativa de Nb encontradas no **actinolita anfíbolito**, são características dos basaltos toleíticos de baixo K (KLT) típicos de margens continentais, entretanto, também podem estar presentes nos toleitos continentais (CT) com grau de alteração considerável (Holm, 1985). Pearce *et al.* (1975) utiliza o diagrama $TiO_2-Nb/3-Th$ para distinguir os basaltos intra-continentais daqueles derivados de margem continental (Figura 2.7d). Em sua maioria, os anfíbolitos de Água Azul do Norte demonstram um enriquecimento em Th em relação ao Nb e sugerem um ambiente intra-continental para estes corpos, sendo que 6 amostras incidem no campo dos basaltos toleíticos de margem continental.

2.8.4 Investigação da fonte mantélica

Devido ao alto grau de remobilização de isótopos de Sr, U e Pb durante os processos secundários, tem se tornando um grande desafio estender a classificação dos componentes ou domínios mantélicos identificados na fonte das rochas básicas do pós-arqueano para aquelas encontradas no Arqueano. Uma solução para este problema é a utilização das razões entre elementos de alto potencial iônico (HFSE), uma vez que tais elementos são incompatíveis e imóveis e suas razões não mudam com o tempo (Weaver 1991; Hart *et al.*, 1992; Fitton *et al.*, 1997; Baksi 2001; Leal *et al.*, 2008). Neste sentido, as razões Nb/Th, Zr/Nb, Zr/Y e Nb/Y são utilizadas para discriminar os componentes mantélicos ligados a fonte de basaltos e diferenciar fontes derivadas de plumas mantélicas de fontes do manto empobrecido raso e/ou arcos magmáticos (não-pluma; Condie 2005). O comportamento dos anfíbolitos de Água Azul do Norte para estas razões evidencia fonte derivada de plumas mantélicas, como pode ser visualizados no diagrama que utiliza as razões Zr/Y e Nb/Y (Figura 2.12a). De modo geral, diferentes graus de mistura entre componentes enriquecidos (EN) e primitivos (PM), sugerem para essas rochas uma fonte derivada do manto primitivo, mais frequente no Arqueano, com

mudanças significativas na composição do magma devido à interação com a crosta continental (UC) e/ou a litosfera subcontinental, como também pode ser observado no diagrama Nb/Th vs. Zr/Nb (Figura 2.12b). Cinco amostras evidenciam a participação de um componente reciclado (REC), dentre as quais, quatro plotam próximo à composição do *end-member* EM2 (Figura 2.12b), que representaria contribuição de sedimentos de crosta continental subductada (Hart *et al.*, 1992; Hofmann 1997) ou que, alternativamente, poderia estar relacionada à litosfera oceânica reciclada com frações de magma aprisionado (Workman *et al.*, 2003) e às anomalias negativas de Ce. Uma amostra incide próximo ao *end-member* HIMU, interpretado como crosta oceânica reciclada (Van Ken *et al.*, 2002). Da mesma forma, os padrões ETR apresentados pelos anfibolitos (moderada e baixa razão La/Yb), sugerem mistura de componentes de pluma (OIB) com aqueles de fonte mantélica enriquecida (E-MORB). A ausência de um componente empobrecido raso (DM) no Arqueano (fonte dos MORB's) pode ser explicado pela reciclagem da litosfera oceânica no manto em altas profundidades e incorporada por plumas mantélicas, ou até mesmo, a reciclagem e mistura do manto com componentes enriquecidos (crosta continental ou litosfera subcontinental), conforme discutido por Condie (2005). O comportamento de elementos traços observado para os anfibolitos de Água Azul do Norte é coincidente com aqueles atribuídos a toleítos continentais (Figura 2.12b), por outro lado, tais padrões diferem claramente do que é documentado para os anfibolitos de Nova Canadá e metabasaltos pertencentes às sequências *greenstone belts* de Carajás, para os quais é sugerido uma origem a partir da fusão parcial do manto empobrecido em profundidades relativamente rasas em ambiente de arco de ilhas (Souza & Dall'Agnol 1995; Marangoanha & Oliveira 2014).

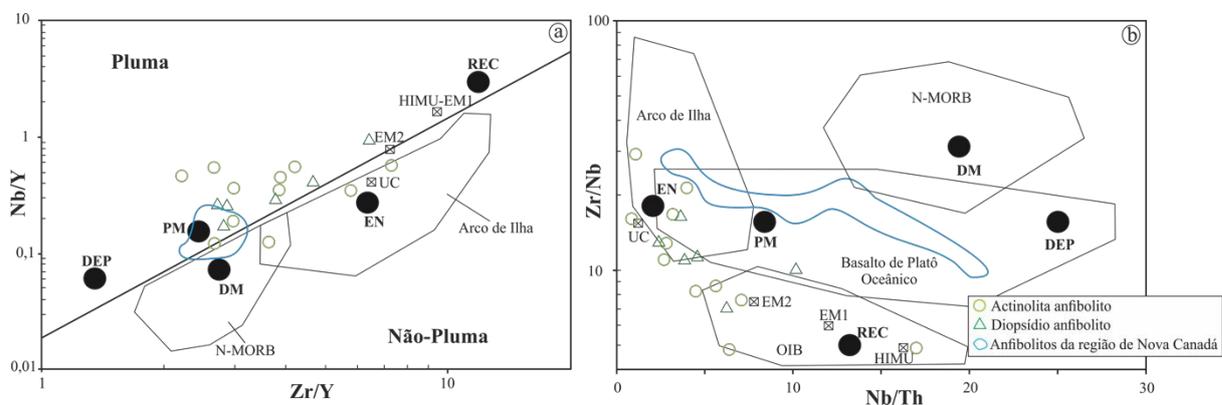


Figura 2.12- Inferência da(s) fonte(s) das rochas metabásicas de Água Azul do Norte utilizando diagramas de variação (a) Zr/Y vs. Nb/Y e (b) Nb/Th vs. Zr/Nb. Nestas figuras, são mostrados campos de fontes mantélicas de basaltos associados a diversos ambientes tectônicos (Condie 2005). Abreviações: UC, crosta continental superior; PM, manto primitivo; DM, manto empobrecido raso; HIMU, alto μ U (fonte U/Pb); EM1 e EM2, fontes mantélicas enriquecidas; ARC, basaltos de arco de ilha; DEP, fonte mantélica empobrecida profunda; EN, componentes enriquecidos; REC, componentes reciclados. Campo dos anfibolitos de Nova Canadá, segundo Marangoanha (2014).

2.8.5 Sobre o metamorfismo

Os dados obtidos a partir de estudos geotermobarométricos estão de acordo com as observações microtexturais, que indicam que o diopsídio anfíbolito e o actinolita anfíbolito não seguiram em sua evolução, uma mesma trajetória metamórfica. O **actinolita anfíbolito** foi metamorfozido em condições de baixa pressão na fácies xisto verde (430 °C e 2,7 kbar), e os cálculos para a associação retrometamórfica indicaram reequilíbrio a 1,1 kbar e 432 °C. A trajetória metamórfica dessa rocha revela, portanto, descompressão isotermal, associada à sua exumação. O metamorfismo desta rocha poderia estar relacionado à colocação dos diversos corpos de leucogranito reconhecidos na área que teriam alçado as isotermas, uma vez que a colocação de seus magmas também se daria posteriormente ao longo da falha que hospeda o corpo do actinolita anfíbolito. O **diopsídio anfíbolito** registra condições de pico bórico de aproximadamente 5 kbar a temperaturas relativamente baixas (540 °C), o que indica condições de nível crustal intermediário e ambiente de crosta relativamente fria. Tais condições metamórficas em fácies anfíbolito, evidenciam atuação de metamorfismo regional anterior ao cisalhamento e são compatíveis com aquelas estimadas para os metabasitos do Grupo Sapucaia. Contudo, a ausência de estudos termobarométricos para as rochas do Grupo Sapucaia não permite, sob o ponto de vista do metamorfismo, relacioná-las ao mesmo *trend* de evolução tectonometamórfica. Os parâmetros de metamorfismo encontrados para os anfíbolitos de Água Azul do Norte indicam que a colocação dessas rochas não foi sincrônica, uma vez que o **diopsídio anfíbolito** (rochas de mais alto grau) revela uma história metamórfica bem mais complexa, relacionada a metamorfismo regional de margens ativas, ou seja, em ambiente distinto daquele de sua colocação, enquanto que o **actinolita anfíbolito** foi colocado e metamorfozido em condições próximas.

2.9 CONCLUSÕES

Os corpos anfíbolíticos de Água Azul do Norte estão inseridos no contexto geológico da porção centro-sul do Domínio Carajás, mais precisamente no extremo oeste do Subdomínio Sapucaia. São intrusivos nos granitoides TTG mesoarqueanos, e podem ser caracterizados como **actinolita anfíbolito**, que configura um extenso corpo alongado de orientação N-S com inflexão para NE, com pelo menos 17 km de comprimento, e **diopsídio anfíbolito**, que aflora como pequenos corpos lenticulares descontínuos de orientação NW-SE. O primeiro é constituído essencialmente por plagioclásio e anfíbólio, onde localmente ainda é possível observar relíquias de cristais de piroxênio e plagioclásio ígneos associados à textura blasto-subofítica, enquanto no último, as paragêneses minerais reconhecidas incluem:

plagioclásio, anfibólio, diopsídio e ilmenita, que representa o pico metamórfico, e plagioclásio, anfibólio, epidoto, clinozoisita, titanita, apatita, quartzo e sericita, associada ao retrometamorfismo.

Os anfibolitos de Água Azul do Norte possuem um protólito de composição compatível com basaltos toleíticos, padrão multielementar de toleítos continentais (diopsídio anfibolito) e toleítos de baixo K (actinolita anfibolito), e razões de elementos incompatíveis HFSE que sugerem uma fonte derivada do manto primitivo, com mudanças significativas na composição do magma devido à interação com a crosta continental e/ou a litosfera subcontinental. As evidências químico-mineralógicas e texturais indicam que o actinolita anfibolito, originalmente um dique de orientação N-S, preserva texturas ígneas e de deformação no estágio submagmático, com posterior deformação e metamorfismo em condições de fácies xisto verde. A trajetória metamórfica do actinolita anfibolito revela decompressão isothermal, associada à sua exumação, que pode ter sido concomitante à colocação de corpos de leucogranito, responsáveis por alçar as isotermas em níveis crustais rasos. Em contrapartida, o diopsídio anfibolito foi submetido à metamorfismo regional em fácies anfibolito em ambiente de crosta relativamente fria e deformação dúctil condicionada a zona de cisalhamento sinistral NW-SE em profundidades relativamente elevadas. Esses dados denunciam a exposição de uma crosta arqueana relativamente profunda na região de Água Azul do Norte (~9–16 km).

2.10 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A. (1981). Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17, 1-29.
- 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. *Lithos*, 120, 235–257.
- ALMEIDA, J. A. C., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, M. A., MACAMBIRA, M. B., PIMENTEL, M. M., RÄMÖ, O. T., GUIMARÃES, F. V., LEITE, A. A. S. (2011). Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás province, Brazil. *Precambrian Research*, 187, 201-221.
- 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 (3-4), 187-206.
- ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N. (1991). Folha Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, 136p.
- BAKSI, A. K. (2001). Search for a deep mantle component in mafic lava using a Nb-Y-Zr plot. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38, 913-824.
- BERMAN, R. G. (1988). Internally – Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. *Journal of Petrology*, 29, 445-522.
- BERMAN, R. G. (1991). Thermobarometry Using Multi-Equilibrium Calculations: A New Technique, With Petrological Applications; *In*, Quantitative Methods in Petrology: an Issue in Honor of Hugh J. Greenwood. *Canadian Mineralogist*, 29, 833-855.
- BESWICK, A. E. (1982). Some Geochemical Aspects of Alteration and Genetic Relations in komatiitic Suites. *In*: Arndt & Nesbitt. (Eds.) *Komatiites*, London, George Allen and Unwin, p. 283-308.
- BLENKINSOP, T. G. (2000). Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 150 pp.
- BOYNTON, W. V. (1984). Cosmochemistry of the Rare-Earth Elements: Meteorite Studies. *In*: Henderson, P. (Ed.) *Rare-Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier, p. 63-114.
- BOSSI, J., CAMPAL, N., CIVETTA, L., DEMARCHI, G., GIRARDI, V. A. V., MAZZUCHELLI, M., NEGRINI, L., RIVALENTI, G., FRAGOSO CESAR, A. R. S.,

- SINIGOI, S., TEIXEIRA, W., PICCIRILLO, E. M., MOLESINI, M. (1993). Early Proterozoic Dike Swarms from Western Uruguay: Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Petrogenesis. *Chemical Geology*, 106, 263-277.
- CHALOKWU, C. I., KUEHNER, M. (1992). Mineral Chemistry and Thermobarometry of a Southern Appalachian amphibolite with epidote + quartz symplectite. *American Mineralogist*, 77, 617-630.
- CHAVES, A. O. (2011). O Enxame de Diques de Anfibolito do Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(3), 509-524.
- CONDIE, K. C. (1981). *Archean Greenstone Belts*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 434 p.
- CONDIE, K. C. (2005). High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 79, 491-504.
- 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, Simpósio Geologia da Amazônia*, 4, 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.
- COX, K. G., BELL, J. D., PANKHURST, R. J. (1979). *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen & Unwin, 450 p.
- CUNHA, I. R. V., DALL'AGNOL, R., Feio, G. R. L. (2016). Mineral Chemistry and Magnetic Petrology of the Archean Planalto Suite, Carajas Province e Amazonian Craton: Implications for the Evolution of Ferroan Archean 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: R. Dall'agnol, L. T. Rosa-Costa, E. L. Klein. (Eds.) Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogensis of the Amazonian Craton. Abstracts, Volume and Field Trips Guide*, Belém, PRONEX-UFPA/SBG, p. 97-150.

- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C. (2007). Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93, 215–233.
- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C., GUIMARÃES, F. V., GABRIEL, E. O., FEIO, G. R. L., LAMARÃO, C. N., ALTHOFF, F. J., SANTOS, P. A., TEIXEIRA, M. F. B., SILVA, A. C., RODRIGUES, D. S., SANTOS, M. J. P., SILVA, C. R. P., SANTOS, R. D., SANTOS, P. J. L. (2013). Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – Implicações para a Evolução Arqueana da Província Carajás - Pará. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 13, Belém (PA), CD-rom.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2. ed. Harlow, Essex; New York: Longman Scientific & Technical: Wiley. 696 p.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANCLAUDE, P., MARCHAL, M. (1980). A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R1-R2 Diagram and Major – Element Analyses – Its Relationship With Current Nomenclature. *Chemical Geology*, 29, 183-210.
- DOCEGEO, (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais, Anexo aos anais, CVRD, Belém, p.11-59.
- 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.
- FITTON, J. G., SAUNDER, A. D., NORRY, M. J., HARDARSON, B. S., TAYLOR, R. N., (1997). Thermal and chemical structure of the Iceland pume. *Earth Planet Science Letters*, 153, 197-208.
- FOSSEN, H. (2010). *Structural Geology*, 1 ed. New York: Cambridge University Press, 480p.
- FOSSEN, H. (2012). *Geologia estrutural*, 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 584 p.
- FUHRMAN, M. L., LINDSLEY, D. H. (1988). Ternary Feldspar Modeling and Thermometry. *American Mineralogist*, 73, 201-215.
- GABRIEL, E. O. (2012). Geologia, geoquímica e petrologia magnética da porção nordeste de Água azul do norte, Província Carajás. Dissertação de mestrado. Belém: Instituto de Geociências - Universidade Federal do Pará.
- 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 da porção sul do Domínio Carajás. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 14, Marabá (PA), CD-rom.
- GELINAS, L., MELLINGER, M., TRUDEL, P. (1982). Archean Mafic Metavolcanics from the Rouyn – Nooranda District, Albitibi Greenstone Belt, Quebec. 1. Mobility of the Major Elements. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19, 2258-2275.
- GUIMARÃES, F. V., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C., SILVA, A. C., TEIXEIRA, M. F. B., SANTOS, P. A. (2012). Geologia Preliminar da Porção Leste do Subdomínio de Transição da Província Carajás - PA. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 46, Santos (SP), CD-rom.
- HART, S. R., HAURI, E. H., OSCHMANN, L. A., WHITEHEAD, J. A. (1992). Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence. *Science* 256, 517-519.
- HIRTH, G., TULLIS, J. (1992). Dislocation Creep Regimes in Quartz Aggregates. *Journal of Structural Geology*, 14, 145-159.
- HOFMANN, A. W. (1997). Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*, 385, 219-229.
- HOLM, P. E. (1985). The Geochemical Fingerprints of Different Tectonomagmatic Environments Using Chondromagmatophile Element Abundances of Tholeiitic Basalts and Basaltic Andesites. *Chemical Geology*, 51, 303-323.
- 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.
- JAQUES, A. L., GREEN, D. H. (1979). Determination of Liquid Compositions in High-Pressure Melting of Peridotite. *American Mineralogist*, 64, 1312-1321.
- JAQUES, A. L., GREEN, D. H. (1980). Anhydrous Melting of Peridotite at 0-15 Kb Pressure and the Genesis of Tholeiitic Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, 287-310.
- KNOOPER, M. W., CONDIE, K. C. (1988). Geochemistry and Petrogenesis of Early Proterozoic Amphibolites, West-Central Colorado, U.S. *Chemical Geology*, 67, 209-225.
- KRETZ, R. (1973). Kinetics of the Crystallization of Garnet at Two localities Near Yellowknife. *Canadian Journal of the Earth Sciences*. 12, 1-20.

- 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: International Geological Congress, 31, Abstracts, Rio de Janeiro, CDrom.*
- LEAL, A. B. M., PAUL, D., SILVEIRA, W. P., LEAL, L. R. B., CRUZ, S. C. P., SANTOS, J. P. (2008). Geoquímica das rochas meta-vulcânicas máficas do *greenstone belt* de Riacho de Santana, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 38, 476-487.
- LEAKE, B. E., SCHUMACHER, J. C., SMITH, D. C., UNGARETTI, I., WHITTAKER, E. J. W. (1997). Youzhi, G. Nomenclature of Amphiboles. *European Journal of Mineralogy*, 9, 623-651.
- LEITE, A. A. S., DALL'AGNOL, R., MACAMBIRA, M. 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, 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, 635-659.
- LEITE-SANTOS, P. J., OLIVEIRA, D. C. (2016). Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Leucograníticas Arqueanas da Área de Nova Canadá – Província Carajás. *Geologia USP. Série Científica*.
- MACAMBIRA, M. J. B., LANCELOT, J. (1991). Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do Estado do Pará. *In: RBG, Simpósio de Geologia da Amazônia*, 3, Resumos Expandidos, Belém, 49-58.
- MADER, U., BERMAN, R. (1992). Amphibole Thermobarometry: a Thermodynamic Approach. *Current Research, Part E, Geological Survey of Canada Paper 92-1E*: 393-400.
- MARANGOANHA, B., OLIVEIRA, D. C. (2014). Diabásios e Anfibolitos da Área de Nova Canadá: Natureza e Implicações Tectônicas Para a Província Carajás. *Boletim Ciências Naturais-Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG)*, 9, 565-596.
- MCMULLIN, D. W. A., BERMAN, R. G., GREENWOOD, H. J. (1991). Calibration of the SGAM Thermobarometer for Pelitic Rocks Using Data from Phase-Equilibrium Experiments and Natural Assemblages. *Canadian Mineralogist*, 29, 889-908.
- MIDDLEMOST, E. A. K. (1975). The Basalt Clan. *Earth Science Reviews*, 11, 337-364.
- MIYASHIRO, A. (1978). Nature of Alkalic Volcanic Rocks Series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66, 91-104.

- MORETO, C. P. N., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., AMARAL, W. S., SANTOS, T. J. S., JULIANI, SOUZA FILHO, C., 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 Deposita*, 46, 789-811.
- MORIMOTO, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *American Mineralogist*, 73, 1123-1133.
- NICOLAS, A., REUBER, I., BENN, K. (1988). A New Magma Chamber Model Based On Structural Studies in the Oman Ophiolite: *Tectonophysics*, 151, 87-105.
- OLIVEIRA, M. A., DALL'AGNOL, R., ALTHOFF, F. J., LEITE, A. A. S. (2009). Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite–Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 27, 146-160.
- OLIVEIRA, M. A. R., DALL'AGNOL, SCAILLET, B. (2010). Petrological Constraints on Crystallization Conditions of MesoArchean Sanukitoid Rocks, Southeastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 51, 2121-2148.
- PASSCHIER, C. W., TROUW, R. A. J. (2005). *Microtectonics*. Springer, 289 p.
- PATERSON, S. R., FOWLER, JR. T. K., SCHMIDT, K. L., YOSHINOBU, A. S., YUAN, E. S., MILLER, R. B. (1998). Interpreting Magmatic Fabric Patterns in Plutons. *Lithos*, 44, 53-82.
- PEARCE, T. H. (1968). A Contribution to the Theory of Variations Diagrams. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 19, 42-57.
- PEARCE, J. A. (2008). Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48.
- PEARCE, J. A. (1975). Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environment on Cyprus. *Tectonophysics*, 25, 41-67.
- PELOGGIA, A. U. G., FIGUEIREDO, M. C. H. (1991). Utilização de Diagrama Ferro-Titânio na Distinção Química Entre Orto- e Para- Anfibolitos. *Boletim Geologia Usp, Série Científica*, 22, 51-60.
- 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.
- SANTOS, J. O. S. (2003). Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil – Central. *In: BIZZI L. A., C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI, J.H. GONÇALVES, (Ed.). Geologia,*

- tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, 169-226.
- SANTOS, P. J. L., OLIVEIRA, D. C. (2012). Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas-Graníticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.
- SANTOS, R. D., GALARZA, M. A., OLIVEIRA, D. C. (2012). Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium - Província Carajás, *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.
- SANTOS, M. N. S., OLIVEIRA, D. C. (2015). Rio Maria Granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte, Carajás Province: Geology and petrological affinities. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Anais, Marabá-Pa, CDrom.
- SILVA, A. C., DALL'AGNOL, R., GUIMARÃES, F. V., OLIVEIRA, D. C. (2014). Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemíticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, 9, 13-46.
- SILVA, F. F., OLIVEIRA, D. C., ANTONIO, P. Y. J., D'AGRELLA-FILHO, M. S., LAMARÃO, C. N. (2015). Bimodal magmatism of the Tucumã area, Carajás Province: U-Pb geochronology, classification and processes. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Anais, Marabá-Pa, CDrom.
- SILVA, L. P. A., OLIVEIRA, D. C., GABRIEL, E. O., LEITE, A. A. S. (2015). Geologia e Petrografia dos Granitoides Arqueanos da Pedreira Novo Nascimento, Xinguara – Pará. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, 9, 185-199
- SOUSA, S. D., MONTEIRO, L. V. S., OLIVEIRA, D. C., SILVA, M. A. D., MORETO, C. P. N., JULIANI, C. (2015). O Greenstone Belt Sapucaia na Região de Água Azul do Norte, Província Carajás: Contexto Geológico e Caracterização Petrográfica e Geoquímica. SBG, Núcleo Norte, *Contribuição à Geologia da Amazônia*, 9, 289-312.
- SOUZA, Z. S., DALL'AGNOL, R. (1995c). Geochemistry of Metavolcanic Rocks in the Archean Greenstone Belt of Identidade, SE Pará, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76, 217-233.
- 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. *Extended Abstracts of the Symposium on Archean Terranes of South America Platform*, SBG, Brasília, 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, 293-315.
- SUN, S. S., MCDONOUGH, W. F., (1989). Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *In: Magmatism in the Ocean Basins*. Saunders, A. D. and Norry, M. J. (Eds.), Geological Society of London, 42, 313-345.
- TAKAHASHI, E., KUSHIRO, I. (1983). Melting of Dry Peridotite at High Pressures and Basalt Magma Genesis. *American Mineralogist*, 68, 859-879.
- TASSINARI, C. G., MACAMBIRA, M. J. B. (1999). Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22, 174-182.
- 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, p. 471-485.
- TEIXEIRA, M. F. B., R. DALL'AGNOL, A. C. SILVA & P. A. SANTOS, 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área a norte de Sapucaia, Província Carajás, Pará: implicações petrogenéticas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, 8, 291-323.
- THOMPSON, R. N. (1984). Dispatches from the Basalt Front. 1. Experiments. *Proc. Geol. Ass.*, 95, 249-262.
- VASQUEZ, L. V., ROSA-COSTA, L. R., SILVA, C. G., RICCI, P. F., BARBOSA, J. O., KLEIN, E. L., LOPES, E. S., MACAMBIRA, E. B., CHAVES, C. L., CARVALHO, J. M., OLIVEIRA, J. G., ANJOS, G. C., SILVA, H. R. (2008). 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. Organizadores: Vasquez M. L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM.
- VAN KEKEN, P. E., HAURI, E. H., BALLENTINE, C. J., (2002). Mantle mixing: the generation, preservation, and destruction of chemical heterogeneity. *Earth Planet Science Letters*, 30, 493-525.
- VERNON, R. H. (2004). *A Practical Guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press, 594 p.

- WEAVER, B. L., TARNEY, J. (1985). Structure and Evolution of the Continental Lithosphere, Major and Trace Element Composition of the Continental Lithosphere. *In*: Pollack, H. N., Murthy, V. R. (Eds.), *Physics and Chemistry of the Earth*, 15, 39-68.
- WILSON, M. (1989). *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. London, Chapman & Hall. 466 p.
- WINCHESTER, J. A. (1984). Element Mobility Associated With Syn-Metamorphic Shear Zones Near Scotchport, NW Mayo, Ireland. *Journal of Metamorphic Geology*, 2, 1-11.
- WOOD, D. A., JORON, J. L., TREUIL, M. (1979). A Reappraisal of the Use of Trace Elements to Classify and Discriminate Between Magma Series Erupted in Different Tectonic Settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 326-36.
- WORKMAN, R. K., HART, S. R., BLUSZTAJN, J., JACKSON, M., KURZ, M., STAUDIGEL, H. (2003). Enriched mantle II: a new view from the Samoan hotspot. *Geophysical Research Letters*, 5, 13656.

CAPITULO 3

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS

O **actinolita anfibolito**, intrusivo em granitoides TTG, apresenta texturas ígneas preservadas com fraca foliação e orientação N-S com forte influência de deformação com inflexão e transposição para NE, gerando foliações NE-SW a E-W. Isso sugere que estruturas N-S de natureza rúptil no embasamento TTG condicionaram a colocação do magma máfico precursor desses anfibolitos, que sofreu ainda efeito da deformação e metamorfismo regional posterior. Infere-se com base nas evidências microtexturais que o protólito sofreu deformação em estágio submagmático e, posteriormente, deformação no estado sólido em profundidades rasas e em condições de crosta fria. O amplo espectro composicional do plagioclásio (An_{28-65}), além das altas razões $Ca/(Ca+Na+K)$ de alguns cristais, confirmam a presença de heranças ígneas nessas rochas. Já os anfibolitos pertencentes à variedade **diopsídio anfibolito** formam pequenos corpos anastomosados com orientação condicionada à uma zona de cisalhamento sinistral de orientação NW-SE. A presença de texturas granoblástica e porfiroblástica, trama planar bem desenvolvida, diopsídio na paragênese, e ausência de resquícios texturais do seu protólito, reforçam a hipótese da atuação de um regime de deformação dúctil em profundidades relativamente mais elevadas nestes corpos.

Os cristais de anfibólio do **actinolita anfibolito** apresentam-se zonados, com maior razão Mg/Fe em relação aqueles do diopsídio anfibolito, e mostram ainda, uma ampla variação composicional (Mg-hornblenda, tschermakita, actinolita e edenita), enquanto que neste último o anfibólio apresenta composição uniforme (Mg-hastingsita). Comportamento similar também é observado para os cristais de plagioclásio destas variedades, onde aqueles do **actinolita anfibolito** variam de oligoclásio à labradorita, contrastando com a composição restrita à andesina sódica (An_{31-35}) do plagioclásio do **diopsídio anfibolito**. Tais contrastes composicionais também foram identificados nos anfibolitos de Nova Canadá por Marangoanha & Oliveira (2014). Nestes, as amostras que sofreram metamorfisados em menor grau apresentam comportamento análogo às amostras do actinolita anfibolito, com o plagioclásio variando de andesina sódica a bytownita sódica (An_{34-78}) e o anfibólio de composições de Mg-tschermakita, Mg-hornblenda e Fe-tschermakita, enquanto que naquelas mais deformadas, predominam pargasita e andesina sódica (An_{34-37}). Tais evidências indicam reações metamórficas em fácies anfibolito nos corpos deformados em níveis crustais mais elevados.

Os anfibolitos de Água Azul do Norte possuem um protólito de composição basáltica pertencente à série toleítica. O **actinolita anfibolito** apresenta maior semelhança, em termos de #Mg, com os metabasitos do Grupo Sapucaia, enquanto que o **diopsídio anfibolito** possui afinidade com os metabasitos do Supergrupo Identidade do TGGRM e com os corpos anfibolíticos de Nova Canadá. As amostras que apresentam os mais baixos valores de #Mg (0,49 – 0,51) representariam os líquidos basálticos mais evoluídos. Já os valores de #Mg mais elevados do **actinolita anfibolito** (0,63 – 0,71) indicariam um protólito de líquido primário derivado de peridotitos mantélicos. Por outro lado, os valores inferiores de #Mg do **diopsídio anfibolito** (0,50 – 0,62) evidenciaria uma evolução moderada destes magmas antes da intrusão.

Os anfibolitos de Água Azul do Norte possuem um protólito de composição compatível com basaltos toleíticos, padrão multielementar de toleítos continentais (diopsídio anfibolito) e toleítos de baixo K (actinolita anfibolito), e razões de elementos incompatíveis HFSE que sugerem uma fonte derivada do manto primitivo, com mudanças significativas na composição do magma devido à interação com a crosta continental e/ou a litosfera subcontinental. Por outro lado, tais padrões diferem claramente do que é documentado para os anfibolitos de Nova Canadá e metabasaltos pertencentes às sequência *greenstone belts* da Província Carajás, para os quais é sugerido origem a partir da fusão parcial do manto empobrecido em profundidades relativamente rasas em ambiente de arco de ilhas (Souza & Dall'Agnol 1995, Marangoanha & Oliveira 2014) ou do manto peridotítico em maiores profundidades (Sousa *et al.*, 2015).

As evidências químico-mineralógicas e texturais indicam que o **actinolita anfibolito** sofreu influência de regime de deformação dúctil-rúptil em profundidades rasas associada a estruturas (N-S) da área. Em contrapartida, o **diopsídio anfibolito** foi submetido a metamorfismo regional e regime de deformação dúctil em profundidades relativamente elevadas. Os dados obtidos a partir de estudos termobarométricos estão de acordo com as observações microtexturais e indicam que o diopsídio anfibolito e o actinolita anfibolito não seguiram em sua evolução uma mesma trajetória metamórfica. O **actinolita anfibolito** foi metamorfizado em condições de baixa pressão na fácies xisto verde (430 °C e 2,7 kbar). A trajetória metamórfica dessa rocha revela descompressão isothermal, associada à sua exumação. O metamorfismo desta rocha poderia estar relacionado à colocação dos diversos corpos de leucogranitos que teriam alçado as isothermas, cuja colocação de seus magmas também teria se dado posteriormente ao longo das estruturas N-S que hospedam o corpo do actinolita anfibolito. O **diopsídio anfibolito** registra condições de pico bórico de

aproximadamente 5 kbar a temperaturas relativamente baixas (540 °C), o que indica condições de nível crustal intermediário e ambiente de crosta relativamente fria. Tais condições metamórficas, em fácies anfibolito, são compatíveis com aquelas estimadas para os metabasitos do Grupo Sapucaia. Contudo, a ausência de estudos termobarométricos para as rochas do Grupo Sapucaia não permite, sob o ponto de vista do metamorfismo, relacioná-las ao mesmo *trend* de evolução tectonometamórfica. Esses dados denunciam a exposição de uma crosta arqueana relativamente profunda na região de Água Azul do Norte (9-16 km).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A., 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17, 1-29.
- 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). Programa Geobrasil, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 147p.
- 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. *Lithos*, 120, 235-257.
- ALMEIDA, J. A. C., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, M. A., MACAMBIRA, M. B., PIMENTEL, M. M., RÄMÖ, O. T., GUIMARÃES, F. V., LEITE, A. A. S., 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás province, Brazil. *Precambrian Research*, 187, 201-221.
- ALTHOFF, F. J., P. BARBEY, BOULLIER, A. M., 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, 104, 187-206.
- ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N., JORGE JOÃO, X. S., COSTA, J. B. S., 1988. A megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás. *In: SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia*, 7, Anais, Belém, p. 324-338.
- ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N., 1991. Folha Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, 136p.
- 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. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 149p.
- AVELAR, V. G., LAFON, J. M., CORREIA JR, F. C., MACAMBIRA, E. M. B., 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã - Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 29, 453-460.
- BARBOSA, J. P. O., 2004. Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitoides da região do Igarapé Gelado, Norte da Província Mineral de Carajás. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 96p.

- BARD, J. P., 1980. Microtextures of igneous and metamorphic rocks. Tokyo, D. Reidel Publishing Company, 246p.
- 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 syntectonic granites of the Carajás metallogenic province, Northern Brazil. In: Servicio Nacional de Geología Y Minería, Simpósio Sudamericano de Geología Isotópica, 3, Resumos Expandidos, Pucon, Chile, 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, 1423-1440.
- BERMAN, R. G., 1991. Thermobarometry Using Multi-Equilibrium Calculations: A New Technique, With Petrological Applications. In: Quantitative Methods in Petrology: an Issue in Honor of Hugh J. Greenwood; Gordon, T M., Martin R. F., (Eds.), *Canadian Mineralogist*, 29, 833-855.
- BERMAN, R. G., 1988. Internally - Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. *Journal of Petrology*, 29, 445-522.
- BLENKINSOP, T. G., 2000. Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 150 p.
- BOSSI, J., CAMPAL, N., CIVETTA, L., DEMARCHI, G., GIRARDI, V. A. V., MAZZUCHELLI, M., NEGRINI, L., RIVALENTI, G., FRAGOSO CESAR, A. R. S., SINIGOI, S., TEIXEIRA, W., PICCIRILLO, E. M., MOLESINI, M., 1993. Early Proterozoic Dike Swarms from Western Uruguay: Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Petrogenesis. *Chemical Geology*, 106, 263-277.
- 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, Simpósio Geologia da Amazônia, 4, Belém, p. 314-317.
- COSTA, J. B. S., ARAÚJO, O. 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.

- COX, K. G., J. D. BELL, PANKHURST, R. J., 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin, 450 p.
- CUNHA, I. R. V., DALL'AGNOL, R., Feio, G. R. L., 2016. Mineral Chemistry and Magnetic Petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province e 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., RĂMÖ, O. T., MOURA, C. A. V., MACAMBIRA, M. J. B., OLIVEIRA, D. C., 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, 80, 101-129.
- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, M. A., ALMEIDA, J. A. C., ALTHOFF, F. J., LEITE, A. A. S., OLIVEIRA, D. C., BARROS, C. E. M., 2006. Archean and Paleoproterozoic Granitoids of the Carajás Metallogenic Province, Eastern Amazonian Craton. *In: Dall'agnol, R., Rosa-Costa, L. T., Klein E. L (Eds.), Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogensis of the Amazonian Craton. Abstracts, Volume and Field Trips Guide, Belém, PRONEX-UFPA/SBG, 97-150.*
- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C., 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93, 215-233.
- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C., GUIMARÃES, F. V., GABRIEL, E. O., FEIO, G. R. L., LAMARÃO, C. N., ALTHOFF, F. J., SANTOS, P. A., TEIXEIRA, M. F. B., SILVA, A. C., RODRIGUES, D. S., SANTOS, M. J. P., SILVA, C. R. P., SANTOS, R. D., SANTOS, P. J. L., 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás - Implicações para a Evolução Arqueana da Província Carajás - Pará. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 13, Belém (PA), CD-rom.*
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2. ed. Harlow, Essex; New York: Longman Scientific & Technical: Wiley. 696p.
- DELINARDO, M. A. S., MONTEIRO, L. V. S., MORETO, C. P. N., SOUSA, S. D., MELO, G. H. C., 2014. Complexo Xingu: Uma secção da crosta inferior exumada durante a evolução do Domínio Carajás, Pa. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 47, Anais, Salvador-Ba, SBG. CDrom.*
- DELINARDO, M., MONTEIRO, L. V. S., SANTOS, T. J. S., MORETO, C. P. N., SOUSA, S. D., 2015. Partial melting and magma generation in the Mesoarchen (ca. 3.0 Ga) TTG gneisses of the Xingu Complex, Carajás Province, Amazon Craton. *In: 8th Hutton Symposium on granites and related rocks. SBG, Florianópolis-SC, p. 28-28.*

- DOCEGEO, 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais, Anexo aos anais, CVRD, Belém, p. 11-59.
- 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.
- FETTES, D., DESMONS, J., 2008. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- FOSSEN, H. *Geologia estrutural*, 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 584 p.
- GABRIEL, E. O., 2012. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética da porção nordeste de Água azul do norte, Província Carajás*. Dissertação de mestrado. Belém: Instituto de Geociências - Universidade Federal do Pará. 117 p.
- GABRIEL, E. O., OLIVEIRA, D. C., GALARZA, M. A., 2010. *Geologia, petrografia e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu da região nordeste de Água Azul do Norte-PA, Província Mineral de Carajás*. *In*: CBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 45, 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, 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 da porção sul do Domínio Carajás*. *In*: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 14, Marabá (PA), CD-rom.
- GOMES, A. C. B., 2003. *Geologia, Petrografia e Geoquímica dos Granitoides de Canaã dos Carajás, SE do Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 160p.
- GUIMARÃES, F. V., 2009. *Geologia, petrografia e geoquímica do trondhjemitó Mogno e rochas arqueanas associadas, terreno granito-greenstone de Rio Maria - SE do Pará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 102p.

- GUIMARÃES, F. V., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D. C., SILVA, A. C., TEIXEIRA, M. F. B., SANTOS, P. A., 2012. Geologia Preliminar da Porção Leste do Subdomínio de Transição da Província Carajás - PA. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos (SP), CD-rom.
- HIBBARD, M. J., 1995. *Petrography to Petrogenesis*. New Jersey, Prentice-Hall, Incorporation, 587p.
- HIRTH, G., TULLIS, J., 1992. Dislocation Creep Regimes in Quartz Aggregates. *Journal of Structural Geology*, 14, 145 – 159.
- HOLM, P. E., 1985. The Geochemical Fingerprints of Different Tectonomagmatic Environments Using Chondritic Element Abundances of Tholeiitic Basalts and Basaltic Andesites. *Chemical Geology*, 51, 303-323.
- 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*: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6. Manaus, Anais, SBG (1). 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, 523-547.
- JAQUES, A. L., GREEN, D. H., 1979. Determination of Liquid Compositions in High-Pressure Melting of Peridotite. *American Mineralogist*, 64, 1312-1321.
- JAQUES, A. L., GREEN, D. H., 1980. Anhydrous Melting of Peridotite at 0-15 Kb Pressure and the Genesis of Tholeiitic Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73, 287-310.
- JORGE JOÃO, X. S., NEVES, A. P., LEAL, J. W. L., 1982. Ouro da Serra Pelada: aspectos da geologia e garimpagem. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Anais, Belém, 2, 52-62.
- JORGE JOÃO, X. S., ARAÚJO, J. B., 1992. Magmatismo granítico sin-cisalhamento Itacaiúnas no SW do Estado do Pará. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, Resumos expandidos, São Paulo, 2, 36-38.
- KERR, P., 1959. *Optical Mineralogy*. New York, McGraw Hill Book Company (3 ed.), 492p.
- LAFON, J. M., RODRIGUES E., DUARTE, K. D., 1994. Le granite Mata Surrão: un magmatisme monzogranitique contemporain des associations tonalitique-trondhjemitiques-granodioritiques archéennes de la région de Rio Maria (Amazonie Orientale, Brésil). *Comptes Rendues de la Academie de Sciences de Paris*, II, 318, 642–649.
- 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*: International Geological Congress, 31, Abstracts, Rio de Janeiro, CDrom.
- LEAKE, B. E., SCHUMACHER, J. C., SMITH, D. C., UNGARETTI, I., WHITTAKER, E. J. W., 1997. Youzhi, G. Nomenclature of Amphiboles. *European Journal of Mineralogy*, Stuttgart, 9, 623-651.
- LEITE, A. A. S., DALL'AGNOL, R., MACAMBIRA, M. 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. *Revista Brasileira de Geociências*. 34, 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, 635-659.
- LEITE-SANTOS, P. J., OLIVEIRA, D. C., 2016. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Leucograníticas Arqueanas da Área de Nova Canadá - Província Carajás. *Geologia USP, Série Científica*, 2, 7-66.
- MACAMBIRA, M. J. B., LANCELOT, J., 1991. Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do Estado do Pará. *In*: RBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 3, Resumos Expandidos, Belém, 49-58.
- MACAMBIRA, M. J. B., LAFON, J. M., 1995. Geocronologia da Síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7, 263-288.
- MACAMBIRA, E. M. B., VALE, A. G., 1997. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Felix do Xingu. Folha SB. 22-Y-B. Estado do Pará, DNPM/CPRM, Brasília, 384p.
- MACHADO, N., LINDENMAYER, Z., KROGH, T. E., LINDENMAYER D., 1991. U/Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Área, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49, 329-354.
- MACKENZIE W. S., C. H. DONALDSON, C. GUILFORD, 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 Ciências Naturais - Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG)*, 9, 565-596.
- MEDEIROS, FILHO, C. A., MEIRELES, E. M., 1985. Dados preliminares sobre a ocorrência de cromita na área de Luanga. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 2, Atlas, Belém, 3, 1488-1499.

- MEDEIROS, H., DALL'AGNOL, R., 1988. Petrologia da porção leste do batólito Granodiorítico Rio Maria, sudeste do Pará. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Anais, Belém, 3, 1488-1499.
- 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, Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Anais, Rio de Janeiro, 5, 2164-2174.
- MELO, G. H. C., MONTEIRO, L. V. S., Xavier, R. P., Santiago, E. B. S., 2014. Geocronologia U-Pb e uma nova perspectiva sobre a evolução do depósito IOCG de classe mundial Salobo, Província Carajás, Brasil. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 47, Anais. Salvador, SBG. CDrom.
- 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 Deposita*, 46, 789-811.
- MORIMOTO, N., 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *American Mineralogist*, Lancaster, 73, 1123-1133.
- OLIVEIRA, M. A., DALL'AGNOL, R., ALTHOFF, F. J., LEITE, A. A. S., 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 27, 146-160.
- OLIVEIRA, M. A., DALL'AGNOL, R., SCAILLET, B., 2010. Petrological Constraints on Crystallization Conditions of MesoArchean Sanukitoid Rocks, Southeastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 51, 2121-2148.
- PASSCHIER, C. W., TROUW, R. A. J., 2005. *Microtectonics*. Springer, 289 p.
- PEARCE, T. H., 1968. A Contribution to the Theory of Variations Diagrams. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 19, 42-57.
- PEARCE, J. A., M. I. NORRY, 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 33-47.
- PEARCE, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. *In: Thorpe, R. S. Andesites. Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: J. Wiley, 525-547.
- PEARCE, J. A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48.

- PELOGGIA, A. U. G., FIGUEIREDO, M. C. H., 1991. Utilização de Diagrama Ferro-Titânio na Distinção Química Entre Orto- e Para- Anfibólitos. *Boletim Usp, Série Científica*, 22, 51-60.
- PIDGEON, R. T., MACAMBIRA, M. J. B., LAFON, J. M., 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, 166, 159-171.
- PIMENTEL, M. M., MACHADO, N., 1994. Geocronologia U-Pb dos Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia*, 38, *Boletim de Resumos Expandidos*, Camboriú, p. 390-391.
- PINHEIRO, R. V. L., 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip System, Amazon, Brazil. University of Durham, Inglaterra. Tese de Doutorado, 408p.
- RAGLAND, P.C., 1989. *Basic Analytical Petrology*, 2. New York, Oxford University Press.
- RICCI, P. S. F., CARVALHO, M. A., 2006. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil- A Deepseated High-T Gabbroic Pluton (Charnockitoid-Like) with Xenoliths of Enderbitic Gneisses Dated at 3002 Ma - The Basement Problem Revisited. *In: RBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, Boletim de Resumos Expandidos*, Belém, CDrom.
- 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.
- ROLLINSON, H., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*, Zimbabwe, 1-344.
- 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: South American Symposium on Isotope Geology*, 4, *Expanded Abstracts*, Salvador, CDrom.
- 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, 597-633.
- SANTOS, J. O. S., 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil – Central. *In: BIZZI L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., GONÇALVES, J. H. (Eds.), Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM- Serviço Geológico do Brasil, p. 169-226.

- SANTOS, P. J. L., OLIVEIRA, D. C., 2012. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas-Graníticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.
- SANTOS, R. D., GALARZA, M. A., OLIVEIRA, D. C., 2012. Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium - Província Carajás, *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos-SP, CDrom.
- SANTOS, M. J. P., LAMARÃO, C. N., LIMA, P. H. A., GALARZA, M. A., MESQUITA, J. C. L. 2013. 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, 325-354.
- SANTOS, M. N. S., OLIVEIRA, D. C., 2015. Rio Maria Granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte, Carajás Province: Geology and petrological affinities. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Anais, Marabá-Pa, CDrom.
- SANTOS, P. A., FEIO, G. R. L., DALL'AGNOL, R., COSTI, H. T., LAMARÃO, C. N., GALARZA, M. A., 2013. Petrography, magnetic susceptibility and geochemistry of the Rio Branco Granite, Carajas Province, southeast of Pará, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 43, 2-15.
- SANTOS, R. D., GALARZA, M. A., OLIVEIRA, D. C., 2013. Geologia, geoquímica e geocronologia do Diopsídio Norito Pium, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, 8, 355-382.
- SARDINHA, A. S., 2002. Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás. Dissertação de Mestrado, 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 granitóides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 42, CDrom.
- SILVA, A. C., DALL'AGNOL, R., GUIMARÃES, F. V., OLIVEIRA, D. C., 2014. Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemíticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, 9, 13-46.
- SILVA, F. F., OLIVEIRA, D. C., ANTONIO, P. Y. J., D'AGRELLA-FILHO, M. S., LAMARÃO, C. N., 2015. Bimodal magmatism of the Tucumã area, Carajás Province: U-

- Pb geochronology, classification and processes. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Anais, Marabá, CDrom.
- SILVA JR, R. O., DALL'AGNOL R., OLIVEIRA, E. P., 1999. Geologia, Petrografia e Geoquímica dos diques proterozóicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, 13, 163-181.
- SOUSA, S. D., MONTEIRO, L. V. S., OLIVEIRA, D. C., SILVA, M. A. D., MORETO, C. P. N., JULIANI, C., 2015. O Greenstone Belt Sapucaia na Região de Água Azul do Norte, Província Carajás: Contexto Geológico e Caracterização Petrográfica e Geoquímica. SBG, Núcleo Norte, Contribuição à Geologia da Amazônia, 9, 289-312.
- SOUZA, Z. S., R. DALL'AGNOL, 1995c. Geochemistry of Metavolcanic Rocks in the Archean Greenstone Belt of Identidade, SE Pará, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76, 217-233.
- 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, Extended Abstracts of the Symposium on Archean Terranes of South America Platform, Brasília, 1, 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, 293-315.
- SOUZA, Z. S., DALL'AGNOL, R., 1994. Metamorfismo de baixo grau no greenstone belt de Identidade, região de Xinguara - Rio Maria, SE do Pará. *In*: Anais do 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, 387-390.
- SOUZA, Z. S., DALL'AGNOL, R., 1996. Química mineral em rochas metavulcânicas do greenstone belt Identidade, SE do Pará: implicações quanto ao metamorfismo. *In*: Anais do 5º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, 94-96.
- TAKAHASHI, E., KUSHIRO, I., 1983. Melting of Dry Peridotite at High Pressures and Basalt Magma Genesis. *American Mineralogist*, 68, 859-879.
- TASSINARI, C. G., MACAMBIRA, M. J. B., 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22, 174-182.
- 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, 471-485.
- THOMPSON, R. N., 1984. Dispatches From the Basalt Front. 1. Experiments Proceedings of the Geologists' Association, 95, 249-262.
- VASQUEZ, L. V., ROSA-COSTA, L. R., SILVA, C. G., RICCI, P. F., BARBOSA, J. O., KLEIN, E. L., LOPES, E. S., MACAMBIRA, E. B., CHAVES, C. L., CARVALHO, J. M., OLIVEIRA, J. G., ANJOS, G. C., SILVA, H. R., 2008. 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. Organizadores: Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T., Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- VERNON, R. H., 2004. A Practical Guide to Rock Microstructure. Cambridge University Press, 594 p.
- WEAVER, B. L., TARNEY, J., 1985. Structure and Evolution of the Continental Lithosphere, Major and Trace Element Composition of the Continental Lithosphere. *In*: Pollack H. N., Murthy V. R. (Eds.), Physics and Chemistry of the Earth, 15, 39-68.
- WILSON, M., 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. London, Chapman & Hall, 466 p.