



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 657

**AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb
EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO
GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO
SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

ELIZIANE DE SOUZA PINTO

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

**BELÉM – PARÁ
2024**

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

P659a Pinto, Eliziane de Souza.
Afinidades petrológicas e geocronologia U-Pb em zircão de ortognaisses do Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul, Terreno Sapucaia, Província Carajás / Eliziane de Souza Pinto. — 2024.

xvii, 75 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia
e Geoquímica, Belém, 2024.

1. Ortognaisse. 2. TTG. 3. Sanukitoide. 4. Terreno
Sapucaia. 5. Mesoarqueano. I. Título.

CDD 551.701



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

**AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb
EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO
GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO
SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS**


Dissertação apresentada por

ELIZIANE DE SOUZA PINTO


**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, Linha de Pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E
METALOGÊNESE**

Data de Aprovação: 09 / 10 / 2024

Banca Examinadora:


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


Prof. Dr. Marco Antonio Galarza
Toro
(Membro – UFPA)


Prof. Dr. Luciano Ribeiro da Silva
(Membro – UFOPA)

*Ao meu grande amigo Wesley,
saudades eternas*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de pesquisa foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e colaboração de algumas pessoas e instituições, às quais registro meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente à Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências (IG) e ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) pela infraestrutura e suporte técnico e profissional.

Ao orientador prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira, pela oportunidade, orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARA-ISO) do Instituto de Geociências da UFPA e ao prof. Marco Galarza (tutor) pelo auxílio na aquisição dos dados geocronológicos e discussão dos resultados.

Ao Laboratório de Microanálises (LM) do Instituto de Geociências da UFPA pelo apoio com o imageamento dos cristais de zircão analisados, especialmente Gisele Marques (técnica administrativa) e prof. Cláudio Lamarão (coordenador).

Ao Laboratório de Laminação e seus responsáveis (Joelma Lobo e Bruno Fernandes) pelo auxílio na confecção de pastilhas de zircão.

Aos membros do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), em especial à Aline Nascimento e Luciano Ribeiro, pelas contribuições na elaboração dessa dissertação.

Aos professores e funcionários do PPGG, pelos ensinamentos e suporte nas questões administrativas.

Aos meus familiares, principalmente minha mãe Raimunda, por todo carinho e incentivo. Ingressar na universidade seria impossível sem vocês. Ao meu companheiro Leonardo e à sua família, pelo acolhimento e cuidado ao longo desses oito anos.

Aos meus amigos, especialmente ao presente que a geologia me deu (Wesley Achilles). Obrigada por estar presente em todos os momentos torcendo por mim. Sentirei sempre sua falta.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu crescimento profissional, minha eterna gratidão.

“Quando tiver que escolher entre estar certo e ser gentil, escolha ser gentil.”

Extraordinário – R. J. Palacio

RESUMO

A área de Água Azul do Norte está inserida no contexto geológico da Província Carajás, precisamente no Terreno Sapucaia conforme as recentes propostas de compartimentação tectônica apresentadas pelo Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG/UFGA). Esta região é formada por um embasamento ortognáissico mesoarqueano de afinidade TTG (Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul; 2,93 Ga) associado a intrusões mesoarqueanas tardias e de assinaturas sanukitoide (Granodioritos Água Azul e Água Limpa; 2,88-2,87 Ga), sódica de alto Ba-Sr (Granodiorito Nova Canadá; 2,89-2,87 Ga) e cálcico-alcálica de alto-K (Granito Boa Sorte; 2,89-2,85 Ga). A revisão dos dados geológicos e petrográficos apontaram que a crosta TTG de Água Azul do Norte é composicionalmente heterogênea e registram fortes evidências de metamorfismo progressivo e migmatização. Sendo assim, este trabalho reclassifica este embasamento TTG como sendo formado por ortognaisses, que eventualmente apresentam variações para composições tonalíticas a quartzo dioríticas que lembram fragmentos de uma crosta mais primitiva, intensamente deformada e gnaissificada. Tais variedades apresentam bandamento composicional de direção E-W frequentemente perturbado por bandas de cisalhamento e dobras de arrasto. Considerando a classificação de migmatitos, apresentam paleossoma ortognáissico e leucossomas ricos em $Qz+Pl\pm Bt$ paralelos ao bandamento (metatexito estromático) e frequentemente contornados por agregados máficos (melanossoma rico em biotita e hornblenda). Além disso, formam quatro variedades composicionais: i) hornblenda±biotita ortognaisse tonalítico (HBTnl), ii) clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico (CHTnl), iii) epídoto-biotita ortognaisse quartzo diorito (EBQzD) e iv) hornblenda-biotita ortognaisse quartzo diorito (HBQzD). Apresentam uma grande proporção de minerais máficos ($M' > 15\%$), especialmente a biotita e a hornblenda que podem ocorrer ligeiramente estiradas segundo o plano de foliação. O plagioclásio e o quartzo secundário são abundantes e ocorrem na matriz ou, no caso apenas do plagioclásio, como fenocristais, enquanto que o álcali-feldspato e o quartzo primário são praticamente insignificantes. As análises geoquímicas em rocha total apontaram que as amostras MED-120A (EBQzD) e MEP-53B (HBQzD) apresentam caráter moderadamente magnésiano, assinatura cálcico-alcálica de médio-K, relativo empobrecimento em K_2O , MgO , Ba, Ni e Cr e enriquecimento em Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 e Zr, refletindo certa afinidade com associações tonalíticas-trondhjemíticas tradicionais. A presença de muitos cristais de zircão com feições ígneas preservadas nessas amostras marca a idade de cristalização do protólito em 3,06 Ga, sugerindo tratarem-se de fragmentos crustais cerca de 100 Ma mais

antigos que a crosta encaixante (Complexo Ortognáissico de Água Azul). Já a MED-144 (HBTnl) exibiu caráter fortemente magnésiano, assinatura cálcico-alcalina de alto-K, alta razão K_2O/Na_2O e enriquecimento em MgO, Ba, Ni e Cr, muito semelhante à composição observada em sanukitoides. Os dados U-Pb obtidos para esta amostra indicaram uma idade de cristalização em 2,92 Ga, similar ao observado nos sanukitoides descritos na região de Ourilândia do Norte (Granodiorito Arraias). As demais amostras apresentaram conteúdos significativos de elementos compatíveis (e.g. Fe, Mg, Ni, Cr) e moderados de incompatíveis (e.g. K, Rb, Ba, Sr, Zr, Ti) e revelaram um comportamento intermediário entre TTGs e granitoides enriquecidos em Mg, além de forte afinidade com o Ortognaisse São Carlos (2,93 Ga) descrito no mesmo terreno. Idades U-Pb concordantes obtidas para as amostras MED-95A (HBTnl) e EDC-28B (CHTnl) apontaram para uma cristalização em 2,95-2,93 Ga contemporânea à colocação dos TTGs de Água Azul e ao Ortognaisse São Carlos. O comportamento textural do quartzo e dos minerais máficos indicam mecanismos de recristalização dinâmica de temperaturas intermediárias à altas (~500-650°C), enquanto que a morfologia observada nos migmatitos (metatexítica estromática e leucossomas portadores de minerais hidratados) sugerem que houve baixa quantidade de *melt* produzido e participação de fluidos no processo de fusão parcial. Aliado a paragênese mineral (Pl+Qz+Bt±Hbl±Ep), estes fatores apontam para um protólito de composição granítica metamorfizado em condições de fácies anfíbolito, sendo a migmatização fortemente contemporânea à deformação e ao pico de metamorfismo regional descrito na região de Carajás (2,89 Ga; MED-95A).

Palavras-chave: ortognaisse, TTG, sanukitoide, Terreno Sapucaia, Mesoarqueano.

ABSTRACT

The Água Azul do Norte area is part of the geological context of the Carajás Province, precisely in the Sapucaia Terrain, according to the recent tectonic compartmentalization proposals presented by the Granitoid Petrology Research Group (GPPG/UFGA). This region is formed by a mesoarchean orthognathic basement with TTG affinity (Água Azul Gneissic-Migmatitic Complex; 2.93 Ga) associated with late Mesoarchean intrusions with sanukitoid signatures (Água Azul and Água Limpa Granodiorites; 2.88-2.87 Ga), high-Ba-Sr sodic (Nova Canadá Granodiorite; 2.89-2.87 Ga) and high-K calc-alkaline (Boa Sorte Granite; 2.89-2.85 Ga) signatures. The review of geological and petrographic data indicated that the TTG crust of Água Azul do Norte is compositionally heterogeneous and records strong evidence of progressive metamorphism and migmatization. Therefore, this work reclassifies this TTG basement as being formed by orthogneisses, which occasionally present variations to tonalitic to quartz dioritic compositions that resemble fragments of a more primitive, intensely deformed and gneissified crust. These varieties show compositional banding in an E-W direction, often disturbed by shear bands and drag folds. Considering the classification of migmatites, they have an orthognathic paleosome and leucosomes rich in $Qz+Pl\pm Bt$ parallel to the banding (stromatic metatexite) and frequently outlined by mafic aggregates (melanosome rich in biotite and hornblende). They form four compositional varieties: i) hornblende \pm biotite tonalitic orthogneiss (HBTnl), ii) clinopyroxene-hornblende tonalitic orthogneiss (CHTnl), iii) epidote-biotite orthogneiss quartz diorite (EBQzD) and iv) hornblende-biotite orthogneiss quartz diorite (HBQzD). They present a large proportion of mafic minerals ($M' > 15\%$), especially biotite and hornblende, which can occur slightly stretched along the foliation plane. Plagioclase and secondary quartz are abundant and occur in the matrix or, in the case of plagioclase, as phenocrysts, while alkali-feldspar and primary quartz are practically insignificant. Whole rock geochemical analysis indicated that samples MED-120A (EBQzD) and MEP-53B (HBQzD) present moderately magnesian character, medium-K calcium-alkaline signature, relative depletion in K_2O , MgO , Ba, Ni and Cr and enrichment in Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 and Zr, reflecting a certain affinity with traditional tonalite-trondhjemitic associations. The presence of many zircon crystals with igneous features preserved in these samples marks the crystallization age of the protolith at 3.06 Ga, suggesting that they are crustal fragments approximately 100 Ma older than the underlying crust (Água Azul Orthognathic Complex). MED-144 (HBTnl) exhibited a strongly magnesian character, high-K calcium-alkaline signature, high K_2O/Na_2O ratio and enrichment in MgO ,

Ba, Ni and Cr, very similar to the composition observed in sanukitoids. The U-Pb data obtained for this sample indicated a crystallization age of 2.92 Ga, similar to that observed in sanukitoids described in the Ourilândia do Norte region (Arraias Granodiorite). The other samples showed significant contents of compatible elements (e.g. Fe, Mg, Ni, Cr) and moderate contents of incompatible elements (e.g. K, Rb, Ba, Sr, Zr, Ti) and revealed an intermediate behavior between TTGs and granitoids enriched in Mg, as well as a strong affinity with the São Carlos Orthogneiss (2.93 Ga) described in the same terrain. Concordant U-Pb ages obtained for samples MED-95A (HBTnl) and EDC-28B (CHTnl) indicated a crystallization at 2.95-2.93 Ga contemporaneous with the emplacement of the Água Azul TTGs and the São Carlos Orthogneiss. The textural behavior of the quartz and mafic minerals indicates dynamic recrystallization mechanisms at intermediate to high temperatures (~500-650°C), while the morphology observed in the migmatites (stromatic metatexitic and leucosomes with hydrated minerals) suggests that there was a low amount of melt produced and fluids participation in the partial melting process. Combined with the mineral paragenesis (Pl+Qz+Bt±Hbl±Ep), these factors point to a granitic protolith metamorphosed under amphibolite facies conditions, with the migmatization being strongly contemporaneous with the deformation and peak of the regional metamorphism described in the Carajás region (2.89 Ga; MED-95A).

Keywords: orthogneiss, TTG, sanukitoid, Sapucaia Terrain, Mesoarchean.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| Figura 1 – (a) Localização das amostras coletadas por Santos <i>et al.</i> (2018), sendo em amarelo as amostras datadas neste trabalho; (b) Mapa de localização da área de Água Azul do Norte contendo as principais vias de acesso; (c) Localização da área de estudo no sudeste do Estado do Pará, norte do Brasil. | 2 |
| Figura 2 – Quadro tectônico regional: (a) Mapa geológico da Província Carajás e coluna litoestratigráfica contendo as suítes/grupos, seus respectivos corpos/formações e idades de cristalização; (b) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás. Fontes: Oliveira <i>et al.</i> (2023), (Silva 2022). | 5 |
| CAPÍTULO 2 AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS..... | 16 |
| Figura 1 – Contexto geológico regional e local: (a) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás segundo Oliveira <i>et al.</i> (2023), com destaque para a área de Água Azul do Norte em amarelo; (b) Mapa geológico do Terreno Sapucaia e coluna estratigráfica; (c) Mapa geológico da área de Água Azul do Norte incluindo os pontos onde as amostras foram coletadas por Santos <i>et al.</i> (2018). Ressalta-se que as rochas estudadas formam o Complexo Gnáissico-migmatítico Água Azul (CgAA) juntamente com os ortognaisses de afinidade TTG. Modificado de Oliveira <i>et al.</i> (2023), Santos <i>et al.</i> (2018) e Silva (2022). | 22 |
| Figura 2 – Aspectos geológicos das rochas de Água Azul do Norte: (a) e (b) Contatos do ortognaisse tonalítico (HBTnl) com o Granodiorito Nova Canadá, destacando os dois tipos de ocorrência (lajedos e corpos centimétricos, respectivamente); (c) ortognaisse migmatizado com leucossoma quartzo-feldspático estromático (microveios paralelos ao bandamento composicional), assim como textura <i>augen</i> subordinada (apontada pelas setas); (d) afloramento perturbado por banda de cisalhamento e por migmatização; (e) e (f) amostras de mão destacando a granulação média e enriquecimento de minerais máficos das rochas estudadas. | 23 |

- Figura 3 – Diagramas de análises modais Q-A-P e Q-(A+P)-M' (Le Maitre 2002) para os ortognaisses da área de Água Azul do Norte. Legenda: Q – quartzo; A – álcali-feldspato; P – plagioclásio; M – minerais máficos.....24
- Figura 4 – Aspectos texturais e microestruturais do grupo de rochas tonalíticas – quartzo dioríticas de Água Azul do Norte: (a) Mosaico da amostra MEP-16 pertencente à variedade principal (HBTnl), com destaque para a textura representativa dessas amostras (microbandamento composicional de quartzo e plagioclásio alternado com aglomerados máficos orientados), assim como porfiroclastos de hornblenda bordejados por quartzo recristalizado; (b) foliação contínua demarcada pela orientação de hornblenda e biotita em contato com a foliação oblíqua de quartzo estirado (*ribbon*); (c) e (d) Porfiroclastos de plagioclásio imersos em matriz alotriomórfica predominantemente máfica, com a ocorrência de poucos cristais de quartzo de granulção média (MED-144) à fina (MED-120A), assim como cristais de quartzo com contatos retos e pontos tríplice (canto superior direito da MED-144) sugerindo a redução de limite de grão (GBAR); (e) Abundância de clinopiroxênio e hornblenda em textura alotriomórfica marcam a variedade mais máfica observada (CHTnl).27
- Figura 5 – Classificação e série magmática dos ortognaisses: (a) Diagrama P-Q (Debon & Le Fort 1983); (b) Diagrama normativo Ab-An-Or (O'Connor 1965); (c) Diagrama Na₂O+K₂O-CaO (MALI) vs. SiO₂ (Frost *et al.* 2001); (d) Diagrama K₂O vs. SiO₂ (Peccerillo & Taylor 1976); (e) Diagrama K-Na-Ca (Barker & Arth 1976); (f) Índice de ferro (Fe*) vs. SiO₂ (Frost *et al.* 2001). Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suíte Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).....30
- Figura 6 – Diagramas de Harker para elementos maiores e menores: (a) TiO₂; (b) Al₂O₃; (c) Fe₂O₃; (d) MgO; (e) CaO; (f) K₂O/Na₂O. Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suíte Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).....31

- Figura 7 – Diagramas de Harker para elementos-traço, Diagrama ETR normalizado para o condrito (Boyton 1984) e Multielementos normalizado para o manto primitivo (McDonough & Sun 1995): (a) Rb/Sr, (b) Ba e c) Nb vs. SiO₂; (d) Sr/Y vs. Y; (e) ETR; (f) Multielementos. Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suíte Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisses São Carlos (Silva *et al.* 2014).33
- Figura 8 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idade média ponderada obtidas para a amostra MED-120A, com destaque para as populações A (em amarelo) e B (em rosa); (b) Idade concórdia de $3057,9 \pm 7,6$ Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.36
- Figura 9 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idade média ponderada obtidas para a amostra EDC-28B (populações B em rosa e E em laranja); (b) Idade concórdia de $2934,2 \pm 7,4$ Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais com os *spots* identificados e suas respectivas idades.37
- Figura 10 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idades médias ponderadas obtidas para a amostra MED-144, com destaque para as populações B (em rosa), C (em azul) e D (em verde); (b) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.37
- Figura 11 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idades médias ponderadas obtidas para a amostra MED-95A, com destaque para as populações B (em rosa), C (em azul) e D (em verde); (b) Idade concórdia de $2953,7 \pm 6,0$ Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.....42

Figura 12 – Aspectos petrogenéticos dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Diagramas TiO_2 vs. K/Na e (b) Zr vs. Ni (Moyen *et al.* 2003); (c) Diagrama de classificação $\text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O}$ vs. 2^*A/CNK ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) vs. $2^*(\text{FeO}_t+\text{MgO})^*(\text{Sr}+\text{Ba})\%$ (Laurent *et al.* 2014); (d) Diagrama ternário de fontes $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}_t+\text{MgO})$ vs. 3CaO vs. $5(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ de Laurent *et al.* (2014); (e) Diagrama La/Yb vs. Yb (Almeida *et al.* 2011); (f) Diagrama triangular $(\text{Ba}+\text{Sr})/1000$ vs. Er vs. $1/\text{Er}$ (Heilimo *et al.* 2010).....48

Figura 13 – Aspectos de mesoescala dos migmatitos: (a) Modelo de classificação petrográfica e genética (Mehnert 1968, Nédélec & Bouchez 2015); (b) Representação da textura estromática relacionada à classificação de segunda ordem de Sawyer (2008); (c) e (d) Metatexito estromático (MED-144) marcado por leucossomas concordantes (paralelos ao bandamento composicional) e discordantes formados a partir de redes de fluxo; (e) neossoma contendo mineralogia característica de fusão com influência de fluidos (Bt-Hbl).....50

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| Tabela 1 – Síntese dos dados geocronológicos do Domínio Rio Maria..... | 6 |
| Tabela 2 – Síntese dos dados geocronológicos do Terreno Sapucaia. | 9 |
| Tabela 3 – Síntese dos dados geocronológicos do Terreno Canaã dos Carajás. | 11 |
| CAPÍTULO 2 AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS..... | 16 |
| Tabela 1 – Composição modal das rochas tonalíticas ± quartzo dioríticas de Água Azul do Norte..... | 25 |
| Tabela 2 – Composições químicas dos ortognaisses. Fe_2O_{3T} – ferro total recalculado como Fe_2O_3 ; LOI – <i>loss on ignition</i> ; $A/CNK = [Al_2O_{3mol}]/(CaO_{mol} + Na_2O_{mol} + K_2O_{mol})$; $Mg\# = [100 * (MgO_{mol}) / (MgO_{mol} + FeO_{mol})]$ e $Eu/Eu^* = [(Eu_N) / ((Sm_N + Gd_N) / 2)]$ | 29 |
| Tabela 3 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-120A. | 38 |
| Tabela 4 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra EDC-28B. | 39 |
| Tabela 5 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-144. | 40 |
| Tabela 6 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-95A. | 41 |
| Tabela 7 – Aspectos petrográficos e geoquímicos adotados para caracterizar rochas de afinidade TTG e SNK a partir de diferentes autores. | 45 |
| Tabela 8 – Afinidades petrológicas das amostras estudadas em comparação aos parâmetros adotados por autores de petrologia para diferenciar TTGs e SNKs. | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| DEDICATÓRIA | iv |
| AGRADECIMENTOS | v |
| EPÍGRAFE | vi |
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | ix |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | xi |
| LISTA DE TABELAS | xv |
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA | 1 |
| 1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL | 3 |
| 1.2.1 Domínio Rio Maria | 4 |
| 1.2.2 Domínio Carajás | 8 |
| 1.2.2.1 Terreno Sapucaia | 8 |
| 1.2.2.2 Terreno Canaã dos Carajás | 10 |
| 1.3 OBJETIVOS | 12 |
| 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS | 13 |
| 1.4.1 Pesquisa Bibliográfica | 13 |
| 1.4.2 Petrografia | 13 |
| 1.4.3 Geoquímica | 13 |
| 1.4.4 Geocronologia | 14 |
| CAPÍTULO 2 AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS. | 16 |
| 2.1 INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL | 19 |
| 2.3 GEOLOGIA | 21 |
| 2.4 PETROGRAFIA..... | 23 |
| 2.4.1 Composições modais e classificação | 23 |
| 2.4.2 Aspectos texturais e deformacionais | 25 |
| 2.5 GEOQUÍMICA | 26 |
| 2.5.1 Procedimentos analíticos | 26 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2 Classificação geoquímica e série magmática | 28 |
| 2.5.3 Elementos maiores e menores | 28 |
| 2.5.4 Elementos-traço | 32 |
| 2.5.5 Elementos terras raras e padrão multielementar | 32 |
| 2.6 GEOCRONOLOGIA | 34 |
| 2.6.1 Epidoto-biotita ortognaisse quartzo diorítico | 34 |
| 2.6.2 Clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico | 35 |
| 2.6.3 Hornblenda ± Biotita ortognaisse tonalítico | 35 |
| 2.7 DISCUSSÕES | 42 |
| 2.7.1 Natureza geoquímica e afinidades petrológicas | 42 |
| 2.7.2 Considerações sobre os aspectos deformacionais e condições de migmatização | 47 |
| 2.7.3 Interpretação dos dados geocronológicos | 51 |
| 2.8 CONCLUSÕES | 52 |
| CAPÍTULO 3 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 63 |
| REFERÊNCIAS | 65 |

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Província Carajás, mais precisamente Terreno Sapucaia, próximo ao limite com o Terreno Canaã dos Carajás e o Domínio Rio Maria (Dall’Agnol *et al.* 2013, Oliveira *et al.* 2023). Esta região abrange a porção centro-oeste de Água Azul do Norte, sudeste do Estado do Pará, sendo limitada a norte pelos municípios de Parauapebas e Canaã dos Carajás, a sudeste pelo município de Xinguara e a sudoeste por Ourilândia do Norte. O acesso por via terrestre dá-se a partir de Marabá pela rodovia PA-150 até o município de Xinguara, seguindo pela rodovia PA-279 até a região de estudo (Figuras 1b e c). Os ortognaisses migmatítico estudados foram coletados durante o mapeamento geológico em escala de semidetalhe (1:50.000) realizado pelo Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), sendo referente às atividades do mestrado acadêmico de Marcela da Silva Santos e doutorado de Eleilson Oliveira Gabriel, ambos vinculados ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA (PPGG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Foram coletadas 9 amostras em toda a extensão E-W desta área (Figura 1a), sendo submetidas à caracterização petrográfica e análise química em rocha total por Santos *et al.* (2018) e, dentre essas, foram selecionadas 4 amostras para análise U-Pb em zircão *in situ* por LA-Q-ICP-MS neste trabalho.

Essas rochas foram inicialmente descritas como granitoides de composição tonalítica inseridos em uma extensa crosta de afinidade TTG, onde dominam rochas de composição trondhjemítica. Tais granitoides representam porções ou fragmentos de uma crosta mais primitiva do embasamento TTG de Água Azul do Norte, os quais são ricos em anfibólio e em elementos compatíveis e incompatíveis (como Fe₂O₃, MgO, Ni e Cr), além de forte afinidade geoquímica com o Ortognaisse São Carlos (2934 ± 8,6 Ma, Pb-Pb em zircão por evaporação; Silva *et al.* 2014) até então apontado como fragmento Mesoarqueano mais antigo do Terreno Sapucaia. Apesar das relações de contato com os TTGs, Santos *et al.* (2018) alertaram para as características que sinalizaram que nosso objeto de estudo não corresponderia à uma típica associação tonalítica-trondhjemítica. No entanto, a ausência de uma discussão geoquímica direcionada para as amostras dos granitoides portadores de hornblenda, assim como daqueles de composição quartzodiorítica, não permitiu que se determinasse a afinidade petrológica das mesmas, e nem tampouco se são co-genéticas ao típico magmatismo TTG. Além disso, a ausência de dados geocronológicos U-Pb impediu que fosse estabelecida uma relação de

temporalidade mais precisa entre tais rochas, visto que sem as respectivas idades de cristalização não é possível estabelecer se todas as amostras objeto deste estudo fazem parte de um mesmo complexo gnáissico ou se representam fragmentos de uma crosta mais antiga do que aquela formada pelos típicos granitoides TTG.

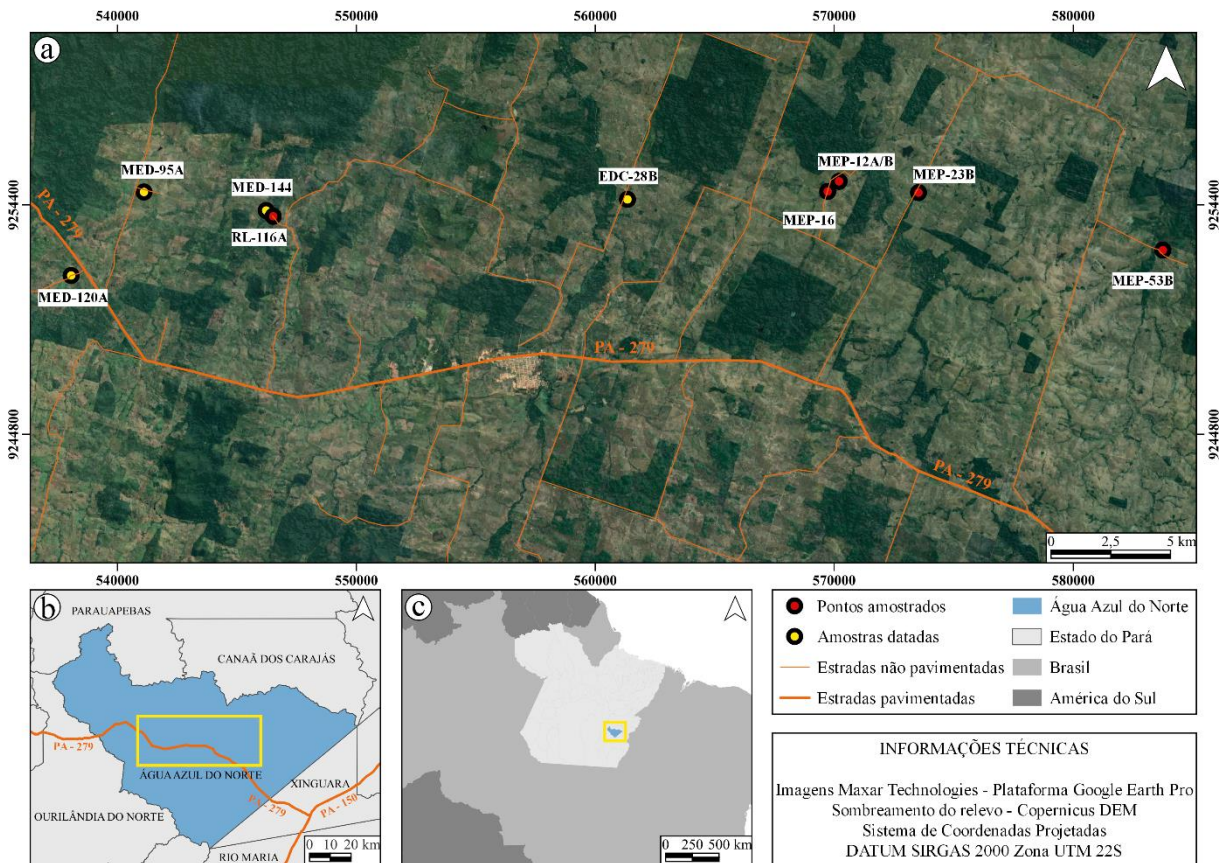


Figura 1 – (a) Localização das amostras coletadas por Santos *et al.* (2018), sendo em amarelo as amostras datadas neste trabalho; (b) Mapa de localização da área de Água Azul do Norte contendo as principais vias de acesso; (c) Localização da área de estudo no sudeste do Estado do Pará, norte do Brasil.

Ainda que o conhecimento sobre os eventos tectono-metamórficos atuantes no Terreno Canaã dos Carajás encontre-se em estágios avançados de discussão, para o Terreno Sapucaia tais questões ainda demandam dados mais consistentes. Estudos recentes sugerem que a área de Água Azul do Norte registra fortes evidências de metamorfismo progressivo e migmatização, incluindo os TTGs que hoje foram reclassificados como ortognaisses e nomeados como Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul (Nascimento *et al.* 2023, Oliveira *et al.* 2023). Tais autores determinaram a idade de cristalização do protólito dessa unidade em 2936 ± 5 Ma e a idade de metamorfismo em 2890 ± 5 Ma (U-Pb em zircão *in situ*, LA-Q-ICP-MS). Isto exigiu que fosse realizada uma reavaliação petrográfica e geológica do ortognaisses buscando examinar se houve influência destes eventos nessas rochas e, se fosse o caso, readequá-las às novas nomenclaturas e classificações (tanto para rochas metamórficas quanto para migmatitos). Aliado a isso, a obtenção de dados geocronológicos é fundamental

para o seu posicionamento cronoestratigráfico no contexto geológico da região e validação da janela de tempo em que os eventos citados ocorreram na região de Água Azul do Norte. A integração destes dados ao refinamento geoquímico também poderá auxiliar a compreensão da natureza desse magmatismo e a verificação da provável existência de crosta mais primitiva nesse terreno.

O presente trabalho foi desenvolvido em colaboração ao doutorado de Aline Costa do Nascimento, que possui como finalidade a caracterização da petrogênese e a contextualização tectônica das rochas mesoarqueanas do Terreno Sapucaia. Esta dissertação foi estruturada da seguinte forma: i) Capítulo introdutório (1) contendo a apresentação da proposta e localização da área de estudo, além de considerações sobre o contexto geológico regional da Província Carajás e a descrição dos objetivos e metodologias envolvidos no desenvolvimento da pesquisa; ii) Artigo científico (capítulo 2) apresentando dados geológicos, petrográficos, geoquímicos e geocronológicos relacionados aos tonalitos e quartzo dioritos, que por vezes ocorrem como xenólitos em leucogranitoides. Além disso, o manuscrito aborda discussões sobre as afinidades, natureza e idades obtidas, sendo intitulado: “AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCROLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL DO NORTE, TERRENO SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS, CRÁTON AMAZÔNICO”; e iii) Capítulo de conclusão e considerações finais (3) que apresenta os aspectos evolutivos para o embasamento da região de Água Azul do Norte e suas contribuições para os conhecimentos sobre esse tipo de ocorrência na Província Carajás.

1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás, localizada na porção leste-sudeste do Cráton Amazônico, encontra-se limitada a norte pelo Domínio Bacajá da Província Transamazonas (2260 – 1990 Ma), a leste pelo Cinturão de cisalhamento Araguaia (<850 – 757 Ma) e a sul e oeste por sucessões sedimentares da Bacia Parecis (fanerozoica) e por rochas vulcânicas do Grupo Iriri (Vasquez *et al.* 2008). De acordo com Dall’Agnol *et al.* (1997), a compartimentação tectônica desta unidade permitiu a individualização de dois terrenos distintos: Bloco Carajás, a norte, e Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria a sul, de forma que fosse denominada informalmente como Domínio de Transição a região compreendida entre estes dois segmentos. A princípio, o Bloco Carajás comportaria sequências vulcanossedimentares, rochas do embasamento Mesoarqueano e plútons graníticos posteriores oriundos de eventos tectonotermiais neoarqueanos. Enquanto isso, o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria

seria formado por litologias mais antigas com propriedades ígneas preservadas (Souza *et al.* 1996), e o Domínio de Transição abrangeria rochas do retrabalhamento de Rio Maria relativas a eventos neoarqueanos de inversão da Bacia Carajás (Dall’Agnol *et al.* 1997, Santos 2003).

Em revisão à geologia do Estado do Pará, Vasquez *et al.* (2008) propôs a subdivisão da Província Carajás em Domínio Rio Maria, formado por rochas de idades mesoarqueanas e texturas ígneas bastante preservadas (3,0-2,87 Ga), e Domínio Carajás de idade meso-neoarqueana (3,0-2,76 Ga). O avanço do conhecimento geológico no início da década passada já apontava que o Domínio Carajás não representaria um segmento de crosta homogêneo (Dall’Agnol *et al.* 2013, Feio *et al.* 2012), fazendo com que Oliveira *et al.* (2023) recentemente propusessem a sua divisão em três subdomínios separados por descontinuidades regionais, sendo eles: i) Terreno Sapucaia: formado por ortognaisses de afinidade TTG e arcabouço estrutural predominantemente E-W, intensamente afetados por eventos de metamorfismo e migmatização no final do Mesoarqueano, além de algumas intrusões neoarqueanas (Dall’Agnol *et al.* 2013, Gabriel & Oliveira 2013, 2014, Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016, Oliveira *et al.* 2023, Santos *et al.* 2018, Silva *et al.* 2014, Silva 2022, Sousa *et al.* 2013, Souza *et al.* 2017, Teixeira *et al.* 2013); ii) Terreno Canaã dos Carajás: formado principalmente por biotita-granitos e magmatismo indiferenciado que configuram o embasamento da Bacia Carajás (Feio *et al.* 2012, 2013, Felix *et al.* 2020, Marangoanha *et al.* 2019a, 2019b); e iii) Bacia Carajás: compreende sequências vulcanossedimentares de idade neoarqueana atreladas à intrusões máficas e granitos subalcalinos (Docegeo 1988, Machado *et al.* 1991, Tavares *et al.* 2018).

1.2.1 Domínio Rio Maria

O Domínio Rio Maria (Tabela 1, Figuras 2a e b) está localizado a sul da Província Carajás e corresponde ao terreno granito-*greenstone* mais antigo do Cráton Amazônico, onde ocorrem granitoides sem evidências de metamorfismo e de idades mesoarqueana e paleoproterozoica. Os *greenstone belts* são representados pelos grupos Andorinhas (3,05–2,94 Ga; Macambira & Lancelot 1991, Souza *et al.* 2001) e Gradaus-Tucumã (3,06–2,98 Ga; Avelar *et al.* 1999, Santos-Silva *et al.* 2021), além de seus correspondentes intrusivos intitulados Complexo Serra Azul e Complexo Guara-Pará (Pimentel & Machado 1994). Em geral compreendem rochas metamáficas, metaultramáficas, especialmente peridotitos e komatiítos com textura spinifex, e metavulcânicas intermediárias a ácidas intercaladas com metassedimentares clásticas e químicas (Araújo & Maia 1991, Macambira & Lancelot 1991, Vasquez *et al.* 2008).

Tabela 1 – Síntese dos dados geocronológicos do Domínio Rio Maria.

| Unidade Litoestratigráfica | | Idades (Ma) | Método | Material |
|-------------------------------------|----------------------------|---|------------------|-------------------|
| <i>Suítes/Grupos</i> | <i>Corpos/Formações</i> | | | |
| MESOARQUEANO | | | | |
| Suíte Granítica Xinguara | Granito Manelão | 2905±1 ¹ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Mata Surrão | 2871±7 ² 2875±11 ³ 2881±2 ³ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Granodiorito-Granito Guarantã | Granito Guarantã | 2864±8 ⁴ 2870±16 ⁴ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Granodiorito Azulona | s/datação | | |
| | Granodiorito Trairão | 2869±12 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Granodiorito Grotao | s/datação | | |
| Suíte Sanukitoide Rio Maria | Granodiorito Rio Maria | 2852±16 ⁵ 2877±6 ³ 2880±4 ³ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Quartzodiorito Parazônia | 2876±2 ⁶ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Granito Rancho de Deus | 2898±61 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Granodiorito Cumarú | 2817±4 ⁷ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Rochas intermediárias | 2878±4 ⁸ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Granodiorito-Granito Tucumã | Granito Tucumã | 2844±8 ¹ 2859±4,8 ¹ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Granodiorítica Nova Canadá | Granodiorito Bonito | 2870±4 ⁹ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granodiorito Carapanãzinho | s/datação | | |
| Suíte Tonalito-Trondhjemitica Mogno | Trondhjemitico Mogno | 2972±9 ¹⁰ 2961±16 ¹⁰ 2924±19 ¹⁰ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Tonalito Arco Verde | 2937±3 ¹⁰ 2981±8 ³ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Tonalito Mariazinha | 2925±3 ¹⁰ 2912±5 ¹⁰ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Tonalito Carapanã | 2917±9 ¹¹ 2923±9 ¹¹ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Grupo Tucumã-Gradaus | F. Igarapé da Pista | 3063-2944 ¹³ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão detrítico |
| | F. Igarapé Abelha | 2979±23/24 ¹³ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | F. Igarapé do Cuca | s/datação | | |
| Grupo Andorinhas | F. Babaçu | 3046±32 ¹⁴ | Isócrona Sm-Nd | Rocha total |
| | F. Lagoa Seca | 2943±88 ¹⁴ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Complexo Serra Azul | | 2970±7 ¹² | U-Pb ID-TIMS | Zircão |
| Complexo Guara-Pará | | s/datação | | |
| PALEOPROTEROZOICO | | | | |
| Suíte Jamon | Granito Jamon | 1870±18 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Marajoara | 1887±8 ¹⁷ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Bannach | 1857±14 ¹⁵ 1874±6,1 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Musa | 1882±4 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Manda Saia | 1864±6,5 ¹⁷ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Gradaús | 1882±9 ¹⁶ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Granito Redenção | 1871±5 ¹⁵ 1883±9,8 ¹⁵ 1902±27 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão e Titanita |
| Suíte Granítica Serra dos Carajás | Granito Seringa | 1875±6 ¹⁵ 1880±7 ¹⁵ 1889±8 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito São João | 1876±12 ¹⁵ 1880±3 ¹⁵ 1891±5 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Granítica Velho Guilherme | Granito Velho Guilherme | 1882±6 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |

Fonte: 1 – Souza (2018), 2 – Althoff *et al.* (1998), 3 – Rolando & Macambira (2003), 4 – Almeida *et al.* (2013), 5 – Avelar *et al.* (1999), 6 – Guimarães *et al.* (2010), 7 – Lafon & Scheller (1994), 8 – Dall’Agnol *et al.* (1999), 9 – Leite-Santos (2016), 10 – Almeida *et al.* (2011), Oliveira *et al.* (2022), 12 – Pimentel & Machado (1994), 13 – Santos-Silva *et al.* (2021), 14 – Souza *et al.* (2001), 15 – Teixeira *et al.* (2018), 16 – Abrantes Jr. (2010), 17 – Santos (2021).

A Suíte Tonalítica-Trondhjemitica Mogno corresponde à série TTG identificada neste domínio, sendo representada pelo Trondhjemitico Mogno (2,97–2,92 Ga; Almeida *et al.* 2011), Tonalito Arco Verde (2,98–2,94 Ga; Almeida *et al.* 2011), Tonalito Mariazinha (~2,92 Ga; Almeida *et al.* 2011) e Tonalito Carapanã (~2,92 Ga; Oliveira *et al.* 2022). De forma geral, compreendem biotita tonalitos e batólitos trondhjemiticos com bandamento composicional segundo os *trends* NW-SE e E-W (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Macambira & Lafon

1995). Dados geoquímicos sugerem que estes granitoides formam três grupos com origens distintas, sendo derivados de magmas formados em altas, intermediárias e baixas pressões considerando as razões La/Yb, Sr/Y e Nb/Ta observadas (Almeida *et al.* 2011). As idades atribuídas a estas rochas indicam a geração de dois eventos magmáticos desta natureza no Domínio Rio Maria, o primeiro responsável pela cristalização do Trondhjemitó Mogno (2,96 Ga; Almeida *et al.* 2011) e de rochas mais antigas do Tonalito Arco Verde (2,98 Ga; Rolando e Macambira 2003), e o segundo relacionado à formação dos tonalitos Mariazinha e Carapanã e de rochas mais jovens do Tonalito Arco Verde (~2,93 Ga; Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Oliveira *et al.* 2022). A Suíte Granodiorítica Nova Canadá encerra o magmatismo de assinatura sódica nesse domínio, sendo formada pelos granodioritos Bonito (~2,87 Ga; Leite-Santos 2016) e Carapanãzinho (2,84-2,85 Ga; Souza 2018).

A ocorrência de granitoides alto-Mg está restrita a Suíte Sanukitoide Rio Maria (Granodiorito Rio Maria; 2,88-2,85 Ga; Avelar *et al.* 1999, Rolando & Macambira 2003) encontrada frequentemente associada ao Quartzó diorito Parazônia (2,88 Ga; Guimarães *et al.* 2010), ao Granito Rancho de Deus (2,89 Ga; Almeida *et al.* 2013), ao Granodiorito Cumaru (~2,82 Ga; Lafon & Scheller 1994) e outras rochas intermediárias (~2,88 Ga; Dall'Agnol *et al.* 1999). Já a Suíte Granodiorito-Granito Guarantã compreende leucogranodioritos-granitos de alto Ba-Sr correspondentes aos plútons Guarantã (2,87–2,86 Ga; Almeida *et al.* 2013), Azulona (s/datação; Almeida *et al.* 2013), Trairão (~2,87; Almeida *et al.* 2013) e Grotão (s/datação; Guimarães *et al.* 2010), considerados produtos da mistura de magmas de composição TTG e leucogranítica rica em Ba e Sr (Santos & Oliveira 2015).

O Domínio Rio Maria também é marcado pela ocorrência de leucogranitos potássicos de afinidade cálcico-alcálica representados pela Suíte Granítica Xinguara, que inclui os granitos Mata Surrão (2,88–2,87 Ga; Althoff *et al.* 1998, Rolando & Macambira 2003) e Manelão (2,90 Ga; Oliveira *et al.* 2022). Já a Suíte Granodiorito-Granito Tucumã (2,86-2,84 Ga; Oliveira *et al.* 2022, Silva-Silva 2020, Souza 2018), de ocorrência atrelada ao Granito Manelão, corresponde ao magmatismo com altos conteúdos de TiO₂ e HFSE e encerra o Mesoarqueano desse domínio. Por outro lado, o Paleoproterozoico reúne uma vasta ocorrência de magmatismo intraplaca intrusivo nessas rochas, incluindo as suítes graníticas Jamon (1,90–1,86 Ga; granitos Jamon, Marajoara, Bannach, Musa, Manda Saia, Gradaús e Redenção; Abrantes Jr 2010, Santos 2021, Teixeira *et al.* 2018), a Suíte Serra dos Carajás (~1,88 Ga; granitos Seringa e São João; Teixeira *et al.* 2018) e a Suíte Velho Guilherme (~1,88 Ga; Teixeira *et al.* 2018), em geral sobrepostos pela cobertura metassedimentar dos grupos Rio Fresco e Gemaque e pela da Formação Gorotite (Docegeo 1988).

1.2.2 Domínio Carajás

1.2.2.1 Terreno Sapucaia

O Terreno Sapucaia está situado na porção centro-leste da Província Carajás, entre o Domínio Rio Maria e o Terreno Canaã dos Carajás (Tabela 2; Figuras 2a e b; Oliveira *et al.* 2023). Os *greenstone belts* nesse terreno pertencem ao Grupo Sapucaia (s/ datação; Hirata *et al.* 1982, Marangoanha & Oliveira 2014, Oliveira *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2013) e compreendem rochas supracrustais metamorfizadas em condições de fácies xisto verde e anfibolito (metamafitos, metaultramafitos e metassedimentares), orientadas preferencialmente segundo o *trend* E-W. O magmatismo sódico de afinidade TTG é representado principalmente pela Suíte Migmatítica Caracol (Oliveira *et al.* 2023), que inclui o: i) Ortognaisse Caracol (2,95-2,94 Ga, Nascimento *et al.* 2023, Silva *et al.* 2010, Leite *et al.* 2004), formado por rochas de composição tonalítica e com bandamento composicional N-S, mergulhos verticais e comumente perturbado por bandas de cisalhamento dextrais; ii) Ortognaisse Colorado (2,95 Ga, Silva *et al.* 2014, Nascimento *et al.* 2023), de composição predominantemente trondhjemitica, bandamento composicional E-W e mergulhos suaves; e iii) Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul (3,06-2,93 Ga, Gabriel 2014, Nascimento *et al.* 2023, este trabalho), formado por TTGs e ortognaisses tonalíticos e quartzo dioríticos associados (objeto de estudo), sendo marcados por bandamento com trama E-W e mergulhos moderados a altos (40 a 89°) para N e para S, pontualmente para NW e SE (Santos *et al.* 2018). São rochas intensamente migmatizadas, com dobras complexas e pitgmáticas e bandas de cisalhamento com cinemática dextral. Apresentam biotita como fase máfica principal, o que as diferencia dos ortognaisses estudados onde também ocorrem anfibólio modal de forma expressiva e pontualmente piroxênio, assim como zircão, allanita, epídoto, titanita e muscovita como fases acessórias primárias. Também apresentam médias a altas razões La/Yb e Sr/Y, indicando uma origem por fusão parcial de metabasaltos em condições de pressão intermediárias a altas (Santos *et al.* 2018).

Além dessa suíte, também são encontradas de forma mais restrita outras ocorrências de magmatismo com assinatura TTG, sendo eles o Tonalito Mariazinha (2,93-2,91 Ga, Almeida *et al.* 2011) e o Trondhjemitito Água Fria (2,86-2,84 Ga; Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004). Por outro lado, nas proximidades da região de Vila Jussara é descrita a ocorrência de tonalitos com afinidade cálcico-alcalina distintos mineralógica e geoquimicamente das associações TTG típicas (Ortognaisse São Carlos; 2,93 Ga; Silva *et al.* 2014). São rochas com bandamento preferencial NE-SW e N-S e mergulhos moderados a altos, ricas em anfibólio,

biotita e epídoto (fases máficas principais), elevados conteúdos de TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO e CaO , baixos teores de Rb, Ba e Sr e baixa razão La/Yb_N . Por fim, os leucogranodioritos alto Ba-Sr Nova Canadá (2,87-2,89 Ga; Leite-Santos 2016) e Pantanal (s/datação) fecham o magmatismo de afinidade sódica desse terreno (Teixeira *et al.* 2013).

Os granitoides com afinidade sanukitoide são encontrados na região de Água Azul do Norte (Granodioritos Água Azul e Água Limpa; 2,88 Ga; Gabriel 2012, Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010) e formam corpos alongados segundo a direção E-W, sendo intrusivos nos ortognaisses de assinatura TTG (Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul) e no embasamento *greenstone* desse terreno. O plúton Água Azul compreende granodioritos e pontualmente tonalitos e monzogranitos, enquanto que o corpo Água Limpa consiste em granodioritos com tonalitos subordinados (Gabriel & Oliveira 2014). Ambos formam fácies com diferentes proporções de biotita, anfíbólio, muscovita e epídoto em suas composições, e geoquimicamente exibem baixos conteúdos de SiO_2 , Nb e Y, teores elevados de Fe_2O_3 , MgO , LILE (K, Ba, Rb e Sr) e ETRL e alta razão $(La/Yb)_N$.

Tabela 2 – Síntese dos dados geocronológicos do Terreno Sapucaia.

| Unidade Litoestratigráfica | | Idades (Ma) | Método | Material |
|-------------------------------------|---|---|------------------|----------|
| <i>Suítes/Grupos</i> | <i>Corpos/Formações</i> | | | |
| MESOARQUEANO | | | | |
| Suíte Granítica Xinguara | Granito Xinguara | 2865±1 ¹ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Sanukitoide Água Limpa | Granodiorito Água Limpa | 2870,2±3,6 ² 2871,3±3,9 ² | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granodiorito Água Azul | 2872±4,6 ² 2869,8±4,2 ² | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Granodiorítica Nova Canadá | Granodiorito Nova Canadá | 2870,6±4 ³ 2895±2 ³ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granodiorito Pantanal | s/datação | | |
| Suíte Migmatítica Caracol | Ortognaisse Caracol | 2944±4 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | | 2936±3 ¹ 2948±5 ¹ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Ortognaisse Colorado | 2948±9 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | | 2872±4 ⁵ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Complexo Água Azul (TTG) | 2936±5 ⁴ 2935,6±4,7 ² | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| Complexo Água Azul (ortognaisses) | 3058±7,6 ⁶ 2934±7,4 ⁶ 2954±6 ⁶ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão | |
| Suíte Tonalito-Trondhjemítica Mogno | Tonalito Mariazinha | 2925±3 ⁷ 2912±5 ⁷ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Trondhjemítica Rio Verde | Trondhjemito Água Fria | 2843±10 ⁷ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | | 2864±21 ¹ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Ortognaisse São Carlos | | 2934±8,6 ⁸ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Grupo Sapucaia | | s/datação | | |
| Anfibolito Surucucu | | s/datação | | |
| NEOARQUEANO | | | | |
| Suíte Plutônica Vila Jussara | | 2725±5 ⁹ 2743±1 ⁹ 2749±3 ¹⁰ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Granítica Serra dos Carajás | Granito Velha Canadá | 2733±2 ^{3,11,12} 2747±2 ^{3,11,12} | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Magmatismo máfico-ultramáfico | Peridotito Fafá | | | |
| PALEOPROTEROZOICO | | | | |
| Suíte Granítica Serra dos Carajás | Granito Gogó da Onça | 1866±10 ¹³ 1869±4 ¹³ 1877±9 ¹³ | U-Pb SHRIMP | Zircão |

Fonte: 1 – Leite *et al.* (2004), 2 – Gabriel (2014), 3 – Leite-Santos (2016), 4 – Nascimento *et al.* (2023), 5 – Silva *et al.* (2010), 6 – este estudo, 7 – Almeida *et al.* (2011), 8 – Silva *et al.* (2014), 9 – Dall'Agnol *et al.* (2017), 10 – Oliveira *et al.* (2010), 11 – Leite-Santos *et al.* (2010), 12 – Sousa *et al.* (2010), 13 – Teixeira *et al.* (2017).

O magmatismo cálcico-alcálico do Terreno Sapucaia também inclui o Granito Xinguara (2,86 Ga; Leite *et al.* 2004), caracterizado por leucogranitos potássicos com afinidade cálcico-alcálica, composições monzo à sienograníticas e recristalização evidente, frequentemente encontrados intrusivos no Ortognaisse Caracol e no Granodiorito Rio Maria (Dall’Agnol *et al.* 2013). A Suíte Plutônica Vila Jussara (~2,75 Ga; Dall’Agnol *et al.* 2017, Silva *et al.* 2010, Oliveira *et al.* 2010) corresponde ao magmatismo subalcálico, anorogênico e Neoarqueano deste terreno. Este também hospeda o batólito leucogranodiorítico Velha Canadá (2,74-2,73 Ga; Leite-Santos 2016, Leite-Santos *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010), de afinidade cálcico-alcálica, relativo enriquecimento em elementos compatíveis, caráter ferroso e assinatura de alto K. Por fim, temos a ocorrência restrita de rochas máfica-ultramáficas correspondentes ao Peridotito Fafá (s/datação) e de magmatismo intraplaca Paleoproterozoico (Granito Gogó da Onça, 1,88 Ga, Teixeira *et al.* 2017).

1.2.2.2 Terreno Canaã dos Carajás

O Terreno dos Canaã dos Carajás, situado a norte do Terreno Sapucaia (Tabela 3; Figuras 2a e b), é caracterizado por uma sucessão de eventos meso- e neoarqueanos que estruturaram o embasamento da Bacia Carajás, se diferenciando dos terrenos granito-*greenstone* clássicos pela escassez de TTGs e *greenstone belts* e predominância de biotita-granitos fortemente deformados (Feio *et al.* 2012, 2013, Felix *et al.* 2020, Marangoanha *et al.* 2019a, 2019b). A porção centro-oeste dessa região é marcada por uma abundância de rochas do Complexo Indiferenciado Xingu, sendo ortognaises migmatizados frequentemente associados a anfíbolitos e com idades de cristalização e metamorfismo de 2,97-2,93 Ga e 2,85 Ga, respectivamente (Avelar *et al.* 1999, Delinardo 2018, Machado *et al.* 1991). Atrélado a ele foram descritos outros corpos neoarqueanos lenticularizados e deformados segundo o *trend* E-W, incluindo muscovita-biotita leucogranitos potássicos com 2,73 Ga (Suíte Indiferenciada Plaquê, Araújo & Maia 1991, Avelar *et al.* 1999) e magmatismo máfico-ultramáfico representado pela Suíte Cateté (~2,76 Ga; Lafon *et al.* 2000) e outros corpos Indiferenciados.

Já a porção centro-leste do Terreno Canaã dos Carajás, próximo ao limite com o Terreno Sapucaia, mostra uma faixa de granitos cálcico-alcálicos mesoarqueanos incluindo: biotita monzogranitos e monzo-sienogranitos bandados (Granito Boa Sorte; 2,89-2,85 Ga; Rodrigues *et al.* 2014, Silva *et al.* 2022), biotita monzogranitos deformados e orientados segundo as direções E-W e NE-SW (Granito Canaã dos Carajás; ~2,96 Ga; Feio *et al.* 2013), leucogranitos com trama NW-SE e E-W (Granito Cruzadão; ~2,86 Ga, Feio *et al.* 2013) e leu-

Tabela 3 – Síntese dos dados geocronológicos do Terreno Canaã dos Carajás.

| Unidade Litoestratigráfica | | Idades (Ma) | Método | Material |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---|------------------|----------|
| <i>Suítes/Grupos</i> | <i>Corpos/Formações</i> | | | |
| MESOARQUEANO | | | | |
| Suíte Granítica Canaã dos Carajás | Granito Boa Sorte | 2857±4 ¹ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | | 2881±10 ² 2847±4 ³ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granito Canaã dos Carajás | 2959±6 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Granito Cruzadão | 2957±8 ⁴ 2875±12 ⁴ 2879±37 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Granito Serra Dourada | 2831±6 ⁴ 2860±22 ⁵ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| Suíte Sanukitoide Ourilândia | C.Tonalítico Campina Verde | 2850±7 ⁴ 2851±18 ⁴ 2872±1 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | C. Tonalito-Granodiorito Ourilândia | 2886±14 ² | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Granodiorito Arraias | 2924,3±8,2 ² | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Trondhjemítica Rio Verde | Trondhjemito Rio Verde | 2841±9 ⁴ 2923±15 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| | Trondhjemito Ourilândia | 2926±5,2 ² | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Migmatítica Caracol | Ortognaisse Bom Jesus | s/datação | | |
| Complexo Tonalítico Bacaba | | 2990,9±5,8 ⁵ 3004,6±9 ⁵ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| Suíte Granulítica Chicrim-Cateté | Granulito Chicrim-Cateté | s/datação | | |
| | Granulito Ouro Verde | 2932±20 ⁶ 2955±8 ⁶ 3066±7 ⁶ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Complexo Indiferenciado Xingu | | 2939±7 ⁶ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Grupo Sequeirinho | | 2968±15 ⁷ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| NEOARQUEANO | | | | |
| Suíte Plaquê | | 2736±24 ⁸ | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| Suíte Granítica Planalto | | 2730±5 ⁹ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Plutônica Vila União | | 2744±5,6 ¹⁰ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| Suíte Chamoquítica Pium | Diopsídio Norito Pium | 2732±1 ¹¹ 2745±1 ¹² | Pb-Pb Evaporação | Zircão |
| | Enderbito Café | 2740±8 ¹³ 2743±13 ¹³ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| | Chamoquito Rio Seco | s/datação | | |
| | Trondhjemito Pedra Branca | 2750±5 ⁴ | U-Pb LA-ICP-MS | Zircão |
| Magmatismo máfico-ultramáfico | Suíte Intrusiva Cateté | 2766±6 ¹⁴ | U-Pb SHRIMP | Zircão |
| PALEOPROTEROZOICO | | | | |
| Suíte Granítica Serra dos Carajás | Granito Rio Branco | 1884±4 ¹⁵ | U-Pb SHRIMP | Zircão |

Fonte: 1 – Rodrigues *et al.* (2014), 2 – Silva *et al.* (2022), 3 – Leite-Santos (2016), 4 – Feio *et al.* (2013), 5 – Moreto *et al.* (2011), 6 – Silva *et al.* (2021), 7 – Tavares (2014), 8 – Avelar *et al.* (1999), 9 – Feio *et al.* (2012), 10 – Marangoanha *et al.* (2019b), 11 – Galarza *et al.* (2017), 12 – Santos *et al.* (2013), 13 – Marangoanha *et al.* (2019a), 14 – Lafon *et al.* (2000), 15 – Teixeira *et al.* (2018).

comonzogranitos E-W (Granito Serra Dourada; 2,86-2,83 Ga; Feio *et al.* 2013, Moreto *et al.* 2011), todos agrupados por Oliveira *et al.* (2023) como Suíte Granítica Canaã dos Carajás. A ocorrência de granitoides cálcico-alcálicos com afinidade sanukitoide está restrita a Suíte Ourilândia (Silva *et al.* 2022), formada pelo Complexo Tonalítico Campina Verde (2,87-2,85 Ga; Feio *et al.* 2013), Complexo Tonalito-Granodiorito Ourilândia (~2,88 Ga; Silva *et al.* 2022) e Granodiorito Arraias (~2,92; Silva *et al.* 2022). Por outro lado, rochas com assinatura TTG estão restritas às proximidades dos municípios de Canaã dos Carajás, precisamente o Ortognaisse Bom Jesus (s/datação; Feio & Dall’Agnol 2012) e o Trondhjemito Rio Verde (2,92-2,86 Ga, Feio *et al.* 2012), e de Ourilândia (Trondhjemito Ourilândia; ~2,93 Ga; Silva *et al.* 2022). A região próxima à borda sul da Bacia Carajás também hospeda o batólito tonalítico Bacaba (~3,00 Ga; Moreto *et al.* 2011) e os *greenstone belts* do Grupo Sequeirinho (~2,97 Ga; Tavares 2014). Além disso, a Suíte Chicrim-Cateté reúne os corpos granulíticos e

encerra o magmatismo sódico Mesoarqueano desse terreno, sendo formada pelos granulitos Chicrim-Cateté (s/datação, Araújo & Maia 1991) e Ouro Verde (3,07-2,93 Ga para cristalização e 2,89-2,84 Ga para metamorfismo; Delinardo 2018, Marangoanha *et al.* 2019a, Pidgeon *et al.* 2000, Silva *et al.* 2021).

O Neoarqueano nessa porção do terreno é marcado pelo magmatismo subalcalino das suítes Planalto (2,75-2,72 Ga; Feio *et al.* 2012, Galarza *et al.* 2017) e Vila União (2,75-2,73 Ga; Marangoanha *et al.* 2019b). Já o Diopsídio Norito Pium (2,74 Ga; Galarza *et al.* 2017, Santos *et al.* 2013), o Enderbito Café (~2,75 Ga; Marangoanha *et al.* 2019a, Moreto *et al.* 2011), o Charnoquito Rio Seco (s/datação; Felix *et al.* 2020) e o Trondhjemito Pedra Branca (~2,76 Ga; Feio *et al.* 2013, Oliveira *et al.* 2022) marcam a geração de magmatismo charnoquítico Neoarqueano nesse terreno. Por fim, o Paleoproterozoico registra de forma bastante pontual o magmatismo intraplaca da Suíte Granítica Serra dos Carajás, especificamente o Granito Rio Branco (1,85-1,89 Ga; Araújo & Sousa 2018, Teixeira *et al.* 2018).

1.3 OBJETIVOS

Considerando o atual estágio de conhecimento sobre os ortognaisses de Água Azul do Norte e sua relevância no contexto evolutivo do Terreno Sapucaia, o objetivo geral deste trabalho consistiu na revisão dos dados petrográficos e geoquímicos existentes e sua integração aos dados geocronológicos inéditos. Para isto, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Examinar as evidências de metamorfismo nas rochas estudadas, reclassificá-las e uniformiza-las às recentes atualizações do contexto geológico deste terreno.
- b) Caracterizar as texturas e avaliar as condições de migmatização, classificando-as conforme a literatura.
- c) Discutir as afinidades petrológicas, séries magmáticas e ambientes de formação do protólito granítico a partir da revisão dos dados geoquímicos existentes.
- d) Estabelecer as idades de cristalização e metamorfismo e, a partir disso, determinar o posicionamento estratigráfico e avaliar o significado tectônico no contexto geológico da área de estudo.
- e) Realizar comparações entre as composições geoquímicas e geocronológicas em relação outras unidades do terreno.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica compreendeu a leitura de artigos, capítulos de livro, teses e dissertações referentes à geologia da Província Carajás, especialmente relacionados à região de Água Azul do Norte e ao Terreno Sapucaia. Também foi realizado o levantamento de conteúdos sobre a caracterização e aplicação de métodos geocronológicos (principalmente sobre o sistema U-Pb) e sobre a descrição petrográfica e o modelamento geoquímico de rochas, com apoio de trabalhos que envolveram a aplicação dessas metodologias em regiões cratônicas. Além disso, foi realizada uma pesquisa a respeito dos parâmetros utilizados por alguns autores de petrologia para caracterizar e/ou diferenciar rochas arqueanas, especialmente suítes tonalíticas-trondhjemíticas (TTGs), sanukitoides e TTGs enriquecidos.

1.4.2 Petrografia

Esta etapa envolveu a caracterização petrográfica por microscopia óptica em luz transmitida das 09 amostras coletadas na área de estudo por Santos *et al.* (2018). Foi realizada uma revisão da descrição dos minerais (Deer *et al.* 1992) e das texturas magmáticas, deformacionais e de alteração anteriormente descritas (Bard 1980, Hibbard 1995, Passchier & Trouw 2005). Composições modais e diagramas Q-A-P e Q-A-P-M são compilados deste mesmo trabalho (Le Maitre *et al.* 2002, Santos *et al.* 2018).

1.4.3 Geoquímica

As 09 amostras representativas foram inicialmente trituradas, pulverizadas, homogeneizadas e quarteadas por Santos *et al.* (2018) no Laboratório de Preparação de Amostras (OPA) do Instituto de Geociências da UFPA. Após esta etapa, os autores prosseguiram com as análises químicas em rocha total realizadas pela ACME *Analytical Laboratories* Ltda (Vancouver, Canadá), sendo quantificados os conteúdos de elementos maiores e menores por ICP-ES (Espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado) e de elementos-traço e terras raras por ICP-MS (Espectrometria de massa por plasma indutivamente acoplado). Além disso, para a transformação de óxidos em cátions e de Fe₂O₃ em FeO foram utilizados os fatores de conversão gravimétrica de Stevens *et al.* (1960). A partir disso, foi realizada a caracterização geoquímica das variedades identificadas com base nos procedimentos indicados por Ragland (1989) e Rollinson (1993), sendo revisado neste trabalho o comportamento dos elementos maiores, menores e traço por meio de

diagramas de variação clássicos e demais diagramas propostos na literatura (Barker & Arth 1976, Debon & Le Fort 1983, Frost *et al.* 2001, Harker 1965, Heilimo *et al.* 2010, Laurent *et al.* 2014, Moyen *et al.* 2003, O'Connor 1965, Peccerillo & Taylor 1976). Também foram efetuadas comparações dessas rochas com os TTGs da mesma região (Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul), com o Ortognaisse São Carlos e com os demais TTGs e sanukitoides do Terreno Sapucaia.

1.4.4 Geocronologia

Inicialmente foi realizada a seleção de quatro amostras representativas das variedades litológicas identificadas, sendo elas: MED-120A (EBQzD), EDC-28B (CHTnl), MED-144 (HBTnl) e MED-95A (HBTnl). Estas foram submetidas às técnicas de separação de minerais pesados, como a britagem, moagem e peneiramento, seguidas pelas técnicas de separação por densidade, magnética e manual utilizando lupa binocular. Estes procedimentos permitiram a seleção dos cristais de zircão mais adequados às análises (preferencialmente transparentes, euédricos, com terminações preservadas, não-metamíticos e pouco fraturados), a partir dos quais foram confeccionadas pastilhas individuais com resina epóxi e posteriormente desbastadas. Em seguida foram obtidas imagens de catodoluminescência (CL) e de elétrons-retroespalhados (ERE) destas pastilhas com auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA, buscando a melhor visualização da estrutura interna e externa dos cristais.

As datações foram efetuadas no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (PARÁ-ISO) utilizando o método U-Pb em zircão *in situ* por LA-Q-ICP-MS (Espectrometria de Massa Quadrupolo com Plasma Acoplado Indutivamente), modelo Neptune da marca *Thermo Finnigan*. O processo inicial de remoção de material *in situ* é feito por irradiação de um feixe de laser (LA) em microsonda acoplada ao espectrômetro, produzindo furos de aproximadamente 25µm (*spots*). Já o ICP-MS consiste em uma técnica instrumental de análise em fase gasosa de átomos ionizados e separados em sua razão massa/carga por um sistema quadrupolo (Q; composto por quatro hastes metálicas, cilíndricas, isoladas e paralelas umas às outras), sendo nesse caso medidos os isótopos de urânio (U), chumbo (Pb) e tório (Th). Tais análises foram realizadas intercaladas com branco analítico (*background*) e com o zircão de referência **GJ-1** (680,5±1,5Ma; Jackson *et al.* 2004) visando avaliar a calibração do equipamento e a eficácia do método. A correção das razões isotópicas para o branco analítico e para o fracionamento interno de Pb/U, assim como a normalização ao zircão de referência e o cálculo das idades e dos erros a 1σ de desvio padrão foram realizados utilizando o Microsoft

Excel, sendo a razão $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ obtida a partir da seguinte fórmula: $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}) * 137,88$. Além disso, para o cálculo da razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ foi realizada a correção da contribuição de chumbo comum (não-radiogênico) segundo o modelo de evolução de Pb de Stacey & Kramers (1975). Por fim, o tratamento dos dados U-Pb foi executado empregando a ferramenta de extensão *Isoplot* 4.15, o que permitiu a obtenção das idades a partir geração de diagramas de concórdia, excluindo-se aqueles pontos com elevado chumbo comum, baixa precisão analítica e alto grau de discordância.

CAPÍTULO 2 AFINIDADES PETROLÓGICAS E GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO DE ORTOGNAISSES DO COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO ÁGUA AZUL, TERRENO SAPUCAIA, PROVÍNCIA CARAJÁS.

RESUMO

As rochas tonalíticas ± quartzo dioríticas de Água Azul do Norte são ortognaisses migmatizados de ocorrência restrita, sendo caracterizados por bandamento composicional E-W e textura metatexítica estromática frequentemente perturbada por dobras de arrasto e veios leucograníticos. Apresentam paleossoma ortognáissico, leucossoma rico em Pl e Qz (±Bt) e melanossoma enriquecido de minerais hidratados (Bt±Anf). As amostras estudadas estão agrupadas em quatro variedades composicionais: hornblenda±biotita ortognaisse tonalítico (HBTnl; MED-95A, MED-144, MEP-23B, 12A, 12B e 16), clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico (CHTnl, EDC-28B), epídoto-biotita ortognaisse quartzo diorito (EBQzD; MED-120A) e hornblenda-biotita ortognaisse quartzodiorito (HBQzD, MEP-53B). Os quartzodioritos exibiram relativa afinidade petrológica com TTGs, principalmente assinatura cálcico-alcálica de médio-K, caráter moderadamente magnésiano e empobrecimento em MgO, LILEs e elementos compatíveis mantélicos como Ni e Cr. Em contrapartida, também apresentaram empobrecimento em SiO₂ e enriquecimento em Fe₂O₃ pouco comum nessas suítes. A idade concordante de 3057,9±7,6 Ma (MSWD= 0,30) obtida a partir de cristais de zircão do EBQzD com propriedades ígneas bastante preservadas foi atribuída a cristalização do protólito dessas rochas. Por outro lado, a MED-144 (HBTnl) exibiu afinidade petrológica sanukitoide: caráter fortemente magnésiano, assinatura cálcico-alcálica de alto-K e enriquecimento em MgO, Ba, Ni e Cr. A idade de intercepto superior em 2916,4±6,2 Ma (MSWD= 0,48) reitera que essa unidade representa um magma mais jovem e intrusivo no embasamento. Já as demais amostras revelaram um comportamento misto entre TTGs e granitoides enriquecidos em Mg, isto é, afinidade com TTGs “enriquecidos” ou “transicionais”. Idades concordantes obtidas para as amostras MED-95A e EDC-28B indicaram idades de cristalização dos protólitos em 2953,7±6,0 Ma (MSWD= 0,48) e 2934,2±7,4 Ma (MSWD= 0,07), respectivamente, sendo contemporânea à colocação dos TTGs aos quais estão associados (Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul). O comportamento textural do quartzo e dos minerais máficos aliado a paragênese mineral (Pl+Qz+Bt±Hbl±Ep) e a textura migmatítica observada (metatexito estromático) revelam que o metamorfismo ocorreu em condições de fácies anfíbolito e que a migmatização é contemporânea ao pico de metamorfismo regional relatado em Carajás (2,88-2,89 Ga).

Palavras-chave: ortognaisse, TTG, sanukitoide, Terreno Sapucaia, Mesoarqueano.

ABSTRACT

The tonalitic ± quartz dioritic rocks of Água Azul do Norte are migmatized orthogneisses with a restricted occurrence, characterized by E-W compositional banding and stromal metatexite texture frequently disturbed by drag folds and leucogranitic veins. They present orthogneissic paleosome, leucosome rich in Pl and Qz (±Bt) and melanosome loaded with hydrated minerals (Bt±Amp). The samples studied are grouped into four compositional varieties: hornblende±biotite orthogneiss tonalitic (HBTnl; MED-95A, MED-144, MEP-23B, 12A, 12B e 16), clinopyroxene-hornblende orthogneiss tonalitic (CHTnl, EDC-28B), epidote-biotite orthogneiss quartzdioritic (EBQzD, MED-120A) and hornblende-biotite orthogneiss quartzdioritic (HBQzD, MEP-53B). The quartzdiorites exhibited relative petrological affinity with TTGs, mainly medium-K calc-alkaline signature, moderately magnesian character and depletion in MgO, LILEs and mantle compatible elements such as Ni and Cr. On the other hand, they also showed depletion in SiO₂ and enrichment in Fe₂O₃, which is uncommon in these suites. The concordant age of 3057.9±7.6 Ma (MSWD= 0.30) obtained from zircon crystals from the EBQzD with fairly preserved igneous properties was attributed to the crystallization of the protolith of these rocks. On the other hand, MED-144 (HBTnl) exhibited sanukitoid petrological affinity: strongly magnesian character, high-K calc-alkaline signature and enrichment in MgO, Ba, Ni and Cr. The upper intercept age of 2916.4±6.2 Ma (MSWD= 0.48) reiterates that this is a younger and intrusive magma in the basement. The other samples revealed a mixed behavior between TTGs and granitoids enriched in Mg, i.e., affinity with “enriched” or “transitional” TTGs. Concordant ages obtained for samples MED-95A and EDC-28B indicated protoliths crystallization age of 2954±6 Ma (MSWD= 0.48) and 2934±7.4 Ma (MSWD= 0.07), respectively, being contemporary to placement of the TTGs with which they are associated (Água Azul Gneissic-Migmatite Complex). The textural behavior of quartz and mafic minerals combined with mineral paragenesis (Pl+Qz+Bt±Hbl±Ep) and the observed migmatite texture (stromatic metatexite) reveal that metamorphism occurred under amphibolite facies conditions and that migmatization is contemporary with the peak of regional metamorphism reported in Carajás (2.88-2.89 Ga).

Keywords: orthogneiss, TTG, sanukitoid, Sapucaia Terrain, Mesoarchean.

2.1 INTRODUÇÃO

As suítes tonalíticas-trondhjemíticas-granodioríticas (TTG) e granitos anatóticos representam uma grande parcela do embasamento dos terrenos arqueanos expostos e o estudo de suas composições químicas são fundamentais para a compreensão da origem, evolução e diferenciação de magmas (Moyen 2020). A formação de crosta continental no final desse período (3,0–2,5 Ga) acompanha uma sequência de subducção-colisão identificada em diferentes regiões cratônicas do mundo, onde a fusão parcial da crosta oceânica basáltica possibilitou a produção de magmas com afinidade TTG. Estes líquidos podem interagir com a cunha mantélica (metassomatismo) e assimilar elementos da sua composição, o que origina plútons tardios do tipo sanukitoide (SNK; Laurent *et al.* 2014, Martin & Moyen 2002, Moyen 2020, Moyen *et al.* 2003).

Os TTG típicos (*strictu sensu*) abrangem principalmente tonalitos e trondhjemitos ricos em quartzo, plagioclásio e biotita como principal fase ferromagnésiana. Podem ocorrer metamorfizados e migmatizados ou na forma de plútons ígneos preservados (Moyen 2020). Apresentam afinidade cálcica a cálcico-alcalina e composição fracamente peraluminosa, enriquecida em SiO₂ e empobrecida em óxidos ferromagnésianos (Fe₂O₃, MgO, MnO, TiO₂), LILEs (K, Ba e Rb) e elementos de transição (Ni, Cr, V; Laurent *et al.* 2014, Moyen *et al.* 2003). Moyen (2011) e Halla *et al.* (2009) mostraram que TTGs possuem conteúdos de ETRP e Sr bastante variáveis, o que se reflete em rochas de baixa, média e alta pressão. Por outro lado, sanukitoides *strictu sensu* são geralmente monzodioritos a granodioritos com assembleia mineralógica similar à dos TTGs, exceto pelo enriquecimento em álcalis e minerais máficos. Piroxênios são relativamente comuns formando agregados máficos onde exibem feições de substituição com a hornblenda (Laurent *et al.* 2014, Moyen 2020, Moyen *et al.* 2003). De modo geral, suítes SNK são de assinatura cálcico-alcalina a alcalina, metaluminosas, ricas em elementos compatíveis (Mg, Cr e Ni) e incompatíveis (K, Ba, Sr, P e ETRL) e com padrão ETR fortemente fracionado (Halla *et al.* 2009, Heilimo *et al.* 2010, Stern *et al.* 1989). Compreendem uma série de diferenciação que varia entre membros máficos (<SiO₂, >MgO) à membros finais mais félsicos (>SiO₂, <MgO), onde suas características diagnósticas tendem a diminuir conforme o aumento da sílica (Moyen 2020). Laurent *et al.* (2014) também sugeriu o termo sanukitoide *latu sensu* para englobar outros granitoides de origem mantélica com composições ligeiramente diferentes às observadas nos SNK típicos.

Adicionalmente, podemos considerar um cenário com diferentes intensidades de contribuição de componentes crustais e mantélicos durante a fusão parcial, ou seja, é possível

inferir uma mudança composicional progressiva relacionada à diferentes graus de interação do magmatismo juvenil com o manto metassomatizado, o que alguns autores chamaram de “TTGs enriquecidos” ou “TTGs transicionais” (Champion & Smithies 2001, Jayananda *et al.* 2006, Moyen *et al.* 2003). Estes são similares aos TTGs de baixa pressão definidos por Moyen (2011), mas com significativas contribuições de LILEs, elementos ferromagnesianos e de transição.

A Província Carajás é marcada pela ocorrência expressiva de granitoides mesoarqueanos heterogêneos no que diz respeito à natureza, idade e grau de deformação (Almeida *et al.* 1981, Santos 2003). A área de Água Azul do Norte está inserida no contexto geológico dessa província, precisamente no Terreno Sapucaia onde granitoides de afinidades TTG e SNK são comuns (Gabriel & Oliveira 2014, Leite *et al.* 2004, Nascimento *et al.* 2023). Os tonalitos e quartzo dioritos fazem parte do Complexo Ortognáissico de Água Azul do Norte, porém são de ocorrência restrita nesse terreno e também podem ocorrer como xenólitos em leucrogranitos mais jovens. São caracterizados por nítido bandamento composicional, presença de biotita e hornblenda como principais minerais ferromagnesianos e relativo enriquecimento em elementos compatíveis e incompatíveis. O comportamento geoquímico peculiar observado nessas rochas torna necessário examinar se existe correspondência com aqueles corpos de granitoides transicionais descritos em outros crátons (Champion & Smithies 2001). Os ortognaisse com hornblenda de Água Azul também demonstram relativa afinidade com o Ortognaisse São Carlos (2,93 Ga, Nascimento *et al.* 2023, Silva *et al.* 2014), sugerindo que podem igualmente representar porções preservadas de uma crosta mais antiga. Em razão disso, esse estudo visa fazer uma revisão dos dados apresentados por Santos *et al.* (2018), investigar as lacunas a respeito da natureza desse magmatismo e obter dados geocronológicos inéditos que possam estimar os períodos de formação de crosta e os eventos de metamorfismo responsáveis pela configuração atual do Terreno Sapucaia.

2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás, maior núcleo arqueano preservado do Cráton Amazônico, é compartimentada tectonicamente em dois blocos distintos separados por uma descontinuidade regional E-W, sendo eles: Domínio Carajás (DC) à norte, de idade meso-neoarqueana e arcabouço geológico mais complexo, e Domínio Rio Maria (DRM) à sul, formado por rochas mesoarqueanas com aspecto ígneo mais preservado (Almeida *et al.* 1981, Dall’Agnol *et al.* 1997, Santos 2003, Souza *et al.* 1996, Vasquez *et al.* 2008). O avanço do conhecimento geológico no início da década passada já apontava que o DC não representaria um segmento

de crosta homogêneo (Dall’Agnol *et al.* 2013, Feio *et al.* 2012). A partir disso, Oliveira *et al.* (2023) recentemente propuseram a subdivisão deste domínio em (Figura 1a): (i) Terreno Canaã dos Carajás, com ocorrência expressiva de granitoides alto-K fortemente deformados e que constituem o embasamento da Bacia Carajás, além de subordinados TTGs, granulitos, charnoquitos, rochas máfica-ultramáficas e granitoides subalcalinos (Feio *et al.* 2012, 2013, Felix *et al.* 2020, Marangoanha *et al.* 2019a, Silva *et al.* 2022, 2023); (ii) Terreno Sapucaia (TS), com predominância de TTGs e ortognaisses intensamente deformados e migmatizados, frequentemente intrudidos por magmatismo Meso-Neoarqueano (Dall’Agnol *et al.* 2013, Gabriel & Oliveira 2013, 2014, Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016, Santos *et al.* 2018, Silva *et al.* 2014, Sousa *et al.* 2013, Souza *et al.* 2017, Teixeira *et al.* 2013); e (iii) Bacia Carajás, formada por sequências vulcanossedimentares neoarqueanas associadas à intrusões máficas e granitos subalcalinos (Docegeo 1988, Machado *et al.* 1991, Tavares *et al.* 2018).

O TS (Figura 1b), alvo deste estudo, é formado por *greenstone belts* retrabalhados e estirados sob a direção E-W (Grupo Sapucaia, Hirata *et al.* 1982, Oliveira *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2013) e seu correspondente intrusivo (Anfibolito Surucucu), ambos sem datação (Oliveira *et al.* 2023). São rochas supracrustais metamorfozadas em condições de fácies xisto verde e anfibolito, principalmente compostos de metamafitos, metaultramafitos e metassedimentares (Docegeo 1988, Marangoanha & Oliveira 2014, Souza *et al.* 2017). São observadas duas ocorrências de magmatismo com assinatura TTG nesse terreno: a) Mais antigos, representados pelos ortognaisses Caracol (2,95-2,94 Ga, Nascimento *et al.* 2023, Silva *et al.* 2010) e Colorado (2,95 Ga, Nascimento *et al.* 2023), pelo Complexo Gnáissico-migmatítico Água Azul e ortognaisses associados (3,06-2,93 Ga, Gabriel 2014, Nascimento *et al.* 2023, este trabalho) e pelo Tonalito Mariazinha (2,93-2,91 Ga, Almeida *et al.* 2011); b) Mais jovem (Trondhjemitó Água Fria; 2,86-2,84 Ga; Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004). Além destes, nas proximidades de Vila Jussara, Silva *et al.* (2014) descreveram a ocorrência de *stocks* de anfibólito-biotita tonalitos com afinidade cálcico-alcálica e bandamento composicional marcante que se distingue dos típicos TTGs encontrados na região (Ortognaisse São Carlos, 2,93 Ga). O magmatismo SNK está representado pelas suítes Água Limpa (2,88-2,87 Ga, Gabriel 2014, Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010), Rio Maria (2,88-2,85 Ga, Avelar *et al.* 1999, Dall’Agnol *et al.* 1999) e Ourilândia (2,88-2,92 Ga; Silva *et al.* 2023). Além disso, também são encontrados granitoides porfiríticos de alto Ba-Sr (granodioritos Nova Canadá e Pantanal, 2,89-2,87 Ga, Leite-Santos 2016, Teixeira *et al.* 2013), leucogranitos potássicos de afinidade cálcico-alcálica (Granito Xinguara, 2,89-2,85 Ga, Leite *et al.* 2004, Rodrigues *et al.* 2014), leucogranodioritos ferrosos de alto-K (Velha

Canadá, 2,75-2,73 Ga, Leite-Santos 2016, Sousa *et al.* 2010) e magmatismos intraplaca (Granito Gogó da Onça, 1,88 Ga, Teixeira *et al.* 2017), charnoquítico (Suíte Pium, 2,76-2,73 Ga, Galarza *et al.* 2017, Marangoanha *et al.* 2019a) e subalcalino (Suíte Vila Jussara, 2,75 Ga, Oliveira *et al.* 2010, Souza *et al.* 2010).

2.3 GEOLOGIA

Estudos preliminares em escala regional (1:250.000) desenvolvidos na Província Carajás indicavam que a crosta de Água Azul era formada estritamente por granitoides do Complexo Xingu (Araújo & Maia 1991). Com o avanço no conhecimento da região através de mapeamento geológico em escala de semidetalhe (1:50.000), estudos petrográficos, geoquímicos e de petrologia magnética apontaram a ocorrência de uma variedade significativa de rochas com diferentes naturezas nesse terreno: ortognaisses migmatizados de afinidade TTG, granitos cálcico-alcálicos de alto-K, granitos sódicos alto Ba-Sr e suítes alto-Mg, assim como *greenstone belts*, anfíbolitos e rochas máficas-ultramáficas indiferenciadas (Figura 1c, Gabriel & Oliveira 2013, 2014, Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016, Nascimento *et al.* 2023, Oliveira *et al.* 2010, Santos *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2014, Souza 2016).

Ocorrências de rochas de afinidade TTG com altos conteúdos de minerais máficos, tendo hornblenda como importante mineral ferromagnésiano, foram inicialmente descritos por Santos *et al.* (2018) nas proximidades do município de Água Azul do Norte na forma de corpos orientados de direção E-W e que podem aparecer como xenólitos em leucogranitoides (Figura 2a e b). São também encontrados como lajedos de espessuras métricas (Figura 2) que compõem o Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul em conjunto com ortognaisses de assinatura TTG típica (Oliveira *et al.* 2023, Nascimento *et al.* 2023). As composições modais relativamente heterogêneas entre as amostras coletadas permitiram a determinação de quatro variedades distintas: i) hornblenda ± biotita ortognaisse tonalítico (HBTnl), ii) clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico (CHTnl), iii) epídoto-biotita ortognaisse quartzodiorítico (EBQzD) e hornblenda-biotita ortognaisse quartzodiorítico (HBQzD).

Essas rochas apresentam granulação média (Figura 2e-f) e bandamento composicional moderado à intensamente evidente acompanhando a direção principal E-W apontada por Santos *et al.* (2018), sendo perturbado por dobras (Figura 2d) e injeções leucograníticas tardias de orientação N-S. Os mesmos autores observaram um padrão de distribuição caótica de foliações – com orientações E-W, NE-SW, NW-SE e N-S – e que afetaram toda a área de estudo, incluindo as rochas que ocorrem como xenólitos. Estas são do tipo espaçada, marcada pela alternância das bandas félsicas e máficas, contínua, definida pela orientação de biotitas e

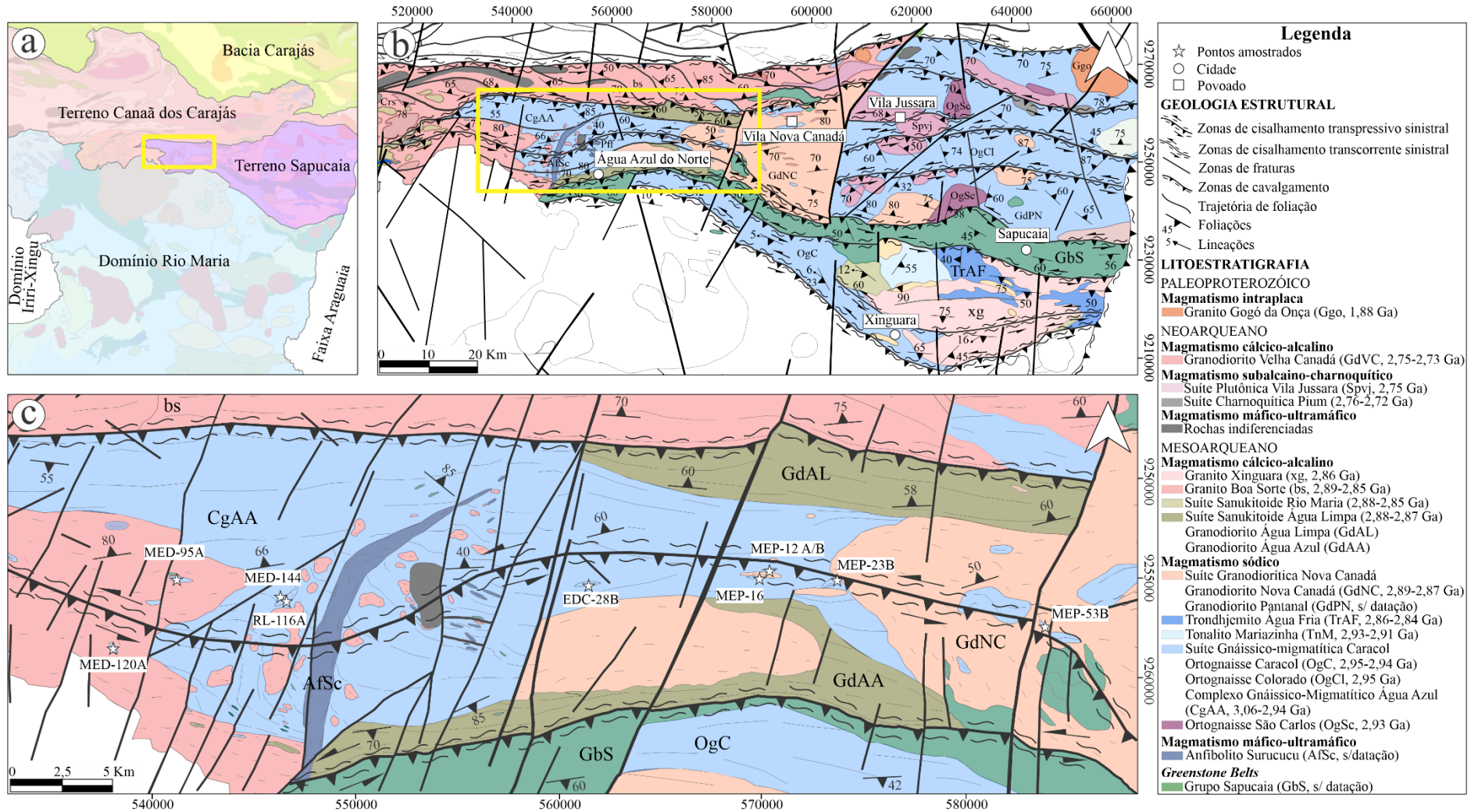


Figura 1 – Contexto geológico regional e local: (a) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás segundo Oliveira *et al.* (2023), com destaque para a área de Água Azul do Norte em amarelo; (b) Mapa geológico do Terreno Sapucaia e coluna estratigráfica; (c) Mapa geológico da área de Água Azul do Norte incluindo os pontos onde as amostras foram coletadas por Santos *et al.* (2018). Ressalta-se que as rochas estudadas formam o Complexo Gnáissico-migmatítico Água Azul (CgAA) juntamente com os ortognaisse de afinidade TTG. Modificado de Oliveira *et al.* (2023), Santos *et al.* (2018) e Silva (2022).

finos agregados quartzo-feldspáticos, e milonítica, onde porfiroclastos em cinemática sinistral são bordados por matriz de granulação mais fina (Figura 2f). Considerando as classificações de migmatitos, apresentam paleossoma ortognáissico, leucossoma rico em $Qz+Pl(\pm Bt)$ paralelo ao bandamento composicional (metatextito estromático) e melanossoma rico em minerais máficos ($Bt+Hbl$), além de pontuais porfiroclastos em textura *augen* (Figura 2c).

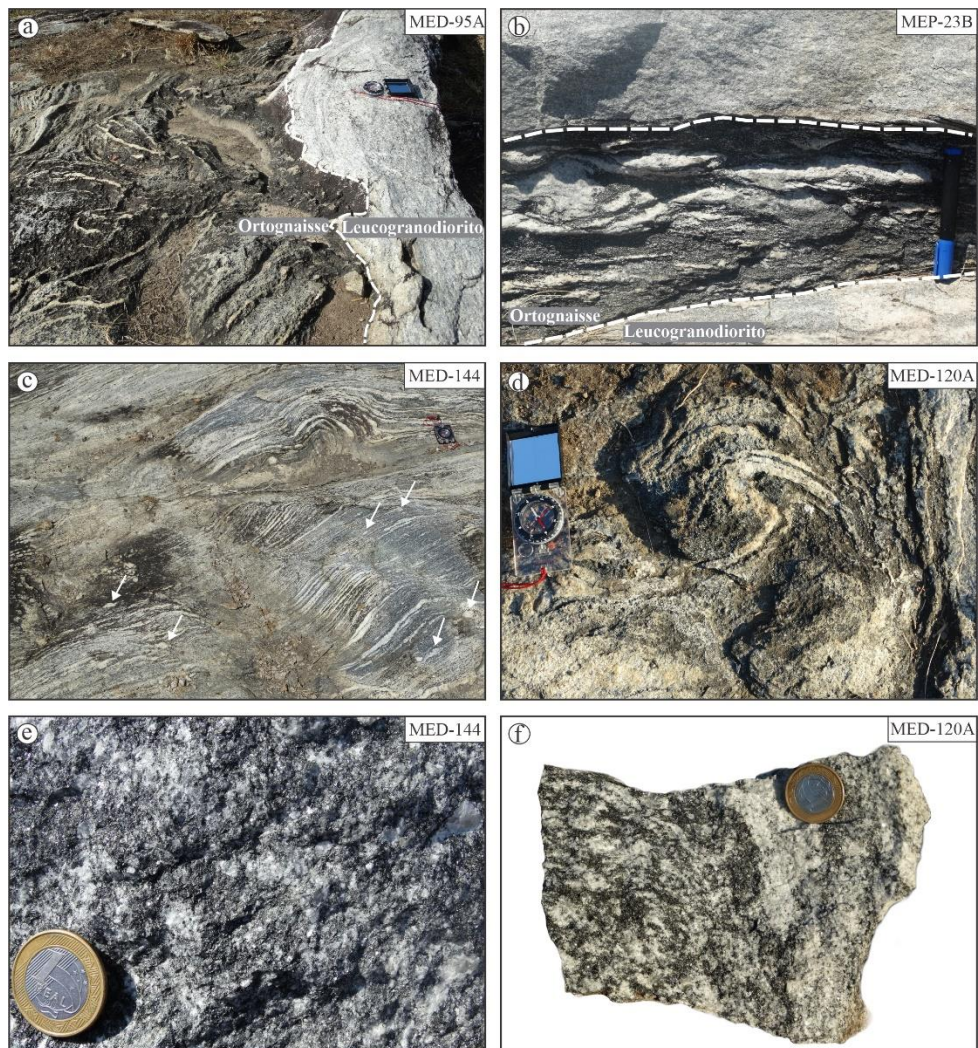


Figura 2 – Aspectos geológicos das rochas de Água Azul do Norte: (a) e (b) Contatos do ortognaisse tonalítico (HB Tnl) com o Granodiorito Nova Canadá, destacando os dois tipos de ocorrência (lajedos e corpos centimétricos, respectivamente); (c) ortognaisse migmatizado com leucossoma quartzo-feldspático estromático (microveios paralelos ao bandamento composicional), assim como textura *augen* subordinada (apontada pelas setas); (d) afloramento perturbado por banda de cisalhamento e por migmatização; (e) e (f) amostras de mão destacando a granulação média e enriquecimento de minerais máficos das rochas estudadas.

2.4 PETROGRAFIA

2.4.1 Composições modais e classificação

De forma geral, as rochas estudadas (Tabela 1) são caracterizadas pela presença de cristais de quartzo (10,9–24,8%) e plagioclásio (31,4–59,3%) em proporções variáveis,

conteúdo reduzido de feldspato potássico (<0,75%) e quantidades significativas de minerais ferromagnesianos. O epidoto é a principal fase varietal no HBQzD e no HBTnl, enquanto que no EBQzD ocorre expressivamente. Já os minerais acessórios primários são a allanita, a titanita, o zircão, a apatita e os minerais opacos (<1%); e os secundários são carbonato e sericita (transformação do plagioclásio), além de clorita gerada pela alteração da biotita e eventualmente hornblenda observada em relações de substituição com o clinopiroxênio.

As variedades apresentam diferenças mineralógicas e texturais pouco expressivas (Figura 3). O HBTnl e o HBQzD são marcados pela hornblenda (3,80–18,2%) e biotita (12,6–22,8%) em quantidades significativas. Além da presença exclusiva de clinopiroxênio (10,6%), o CHTnl exibe baixo conteúdo de plagioclásio e de biotita quando comparado às demais, assim como maior enriquecimento em hornblenda e ausência de epidoto. O EBQzD é ligeiramente mais pobre em quartzo, mais enriquecido em plagioclásio e epidoto (10,6%) e não apresenta hornblenda em sua composição. Em relação aos TTGs aos quais estão associados, os ortognaisses se diferenciaram principalmente pela ocorrência da hornblenda (ausente nessas rochas), pelo empobrecimento quartzo-feldspático e por seu elevado conteúdo de minerais máficos, sendo o índice de cor de aproximadamente 30% para o grupo tonalito – quartzo diorito e 7% para os TTGs. Já em comparação ao Ortognaisse São Carlos, as composições mineralógicas dos feldspatos são nitidamente semelhantes, com leve empobrecimento em quartzo e enriquecimento em hornblenda e biotita.

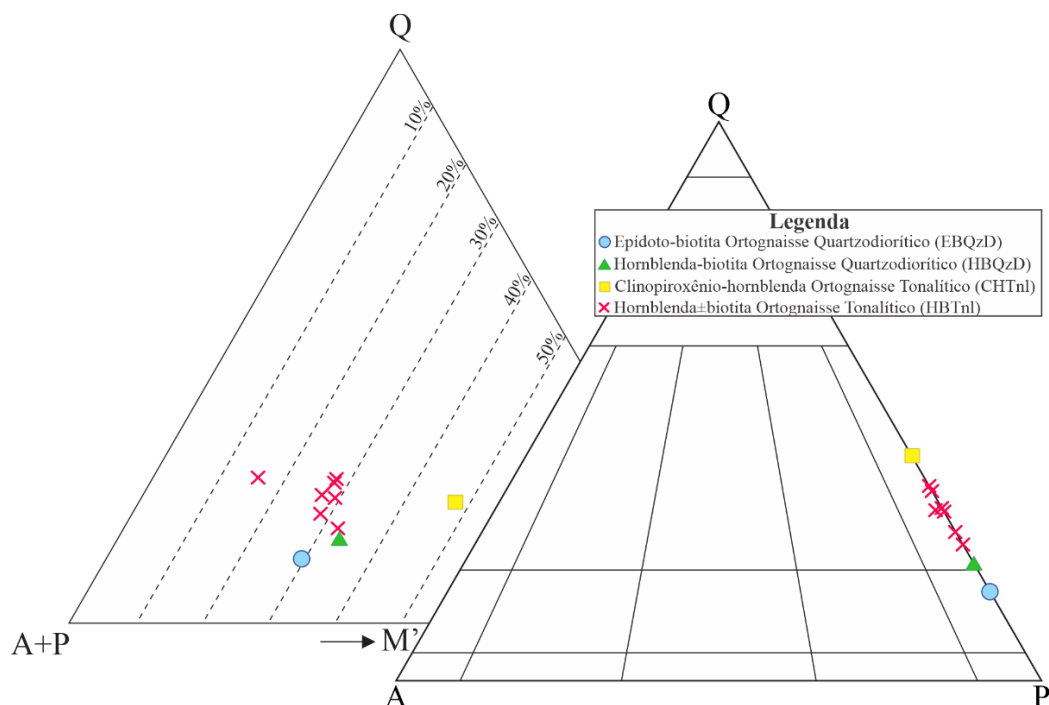


Figura 3 – Diagramas de análises modais Q-A-P e Q-(A+P)-M' (Le Maitre 2002) para os ortognaisses da área de Água Azul do Norte. Legenda: Q – quartzo; A – álcali-feldspato; P – plagioclásio; M – minerais máficos.

Tabela 1 – Composição modal das rochas tonalíticas ± quartzo dioríticas de Água Azul do Norte.

| Amostra | MED 120A | MEP 53B | EDC 28B | MED 95A | MEP 23B | MEP 12B | MEP 12A | MEP 16 | MED 144 | RL 116A |
|-------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
| Variedade | EBQzD | HBQzD | CHTnl | HBTnl | | | | | | |
| <i>Minerais (vol.%)</i> | | | | | | | | | | |
| Quartzo | 10,95 | 14,52 | 20,85 | 21,50 | 24,40 | 18,68 | 24,80 | 24,75 | 16,20 | 22,00 |
| Plagioclásio | 59,35 | 51,76 | 31,45 | 49,01 | 47,90 | 52,18 | 58,05 | 47,15 | 51,30 | 49,85 |
| Álcali-feldspato | | | | 0,06 | | | | | | 0,75 |
| Clinopiroxênio | | | 10,65 | | | | | | | |
| Hornblenda | | 18,18 | 36,60 | 7,99 | 14,10 | 11,49 | 3,80 | 14,25 | 7,25 | 6,35 |
| Biotita | 17,65 | 12,58 | 0,40 | 19,21 | 13,00 | 16,01 | 11,65 | 12,95 | 22,80 | 15,80 |
| Epidoto | 10,65 | 0,90 | | 1,86 | 0,35 | 0,77 | 0,15 | 0,60 | 2,20 | 4,65 |
| Allanita | 0,30 | | | | | | tr | 0,10 | | 0,15 |
| Titanita | 0,35 | 1,51 | | | | | | | | |
| Zircão | tr | | tr | | 0,10 | tr | 0,05 | tr | | |
| Apatita | 0,05 | 0,05 | | | 0,05 | 0,10 | tr | 0,10 | 0,05 | |
| Minerais opacos | | 0,25 | | | tr | | | | | |
| A + P | 59,35 | 51,76 | 31,45 | 49,07 | 47,90 | 52,18 | 58,05 | 47,15 | 51,30 | 50,60 |
| Índice de cor (M') | 28,95 | 33,42 | 47,65 | 29,06 | 27,55 | 28,27 | 15,65 | 27,90 | 32,25 | 26,95 |

Legenda: EBQzD – Epidoto-biotita ortognaisse quartzo diorítico; HBQzD – Hornblenda-biotita ortognaisse quartzo diorítico; CHTnl – Clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico; HBTnl – Hornblenda±biotita ortognaisse tonalítico; tr – mineral presente na amostra, mas não registrado na contagem modal. Estimativa obtida mediante contagem de aproximadamente 2.000 pontos por amostra (compilado de Santos *et al.* 2018).

2.4.2 Aspectos texturais e deformacionais

Os aspectos texturais das rochas estudadas mostraram-se relativamente homogêneos, onde a textura granular hipidiomórfica é raramente preservada (quando é o caso, os minerais máficos formam agregados com pouca ou nenhuma orientação). Em contrapartida, o microbandamento composicional é regularmente observado e os cristais de biotita e hornblenda se encontram paralelamente alinhados à aglomerados quartzo-feldspáticos (textura nematoblástica, Figura 4a-b). Também é comum a ocorrência de porfiroclastos de hornblenda e plagioclásio acompanhados por matriz granular alotriomórfica (Figura 4c-d). O plagioclásio é abundante e ocorre na forma de cristais subdioblásticos e xenoblásticos de até 0,5 mm de comprimento (Figura 4a). O maclamento é ausente ou dos tipos albita, albita-periclina e carlsbad, sendo frequente a alteração para sericita e a presença de microfraturas, zoneamento oscilatório e inclusões de biotita. Por vezes se comportam como fenocristais (2-5mm) e são bordejados por subgrãos e neogrãos marcando a foliação milonítica (Figura 4c-d). Já o álcali-feldspato ocorre excepcionalmente em duas amostras e em baixíssima quantidade, formando cristais xenoblásticos com aproximadamente 0,5mm de comprimento e maclamento xadrez. O quartzo primário é escasso e apresenta fraca extinção ondulante e contatos irregulares entre si e com os demais minerais primários. Enquanto isso, o quartzo secundário é xenoblástico, com forte extinção ondulante e forma agregados de granulação fina e muito fina (até 1mm) com

contatos suturados e interlobados, sugerindo que os mecanismos de recristalização atuantes foram a rotação de subgrão (SGR) e a migração de limites de grão de alta temperatura (GBM). Estes cristais podem ser encontrados constituindo o microbandamento composicional (Figura 4a), bordejando fenocristais de plagioclásio e hornblenda ou em formas estiradas (*ribbon*) e orientadas obliquamente à foliação milonítica (Figura 4b). Ocasionalmente apresentam contatos retos e pontos tríplices formando textura granoblástica poligonal, o que também sugere a redução de limite de grão (GBAR) como mecanismo de recristalização.

Em geral as fases máficas compreendem agregados de biotita, hornblenda, epídoto e, mais raramente, clinopiroxênio, allanita e titanita. Em condições de deformação moderada, a biotita exibe forma tabular, fracamente orientada e com frequentes inclusões de epídoto. Já onde a deformação foi mais intensa, ela apresenta lamelas mais delgadas e alongadas (*mica fish*), sendo encontradas contornando os fenocristais/porfiroclastos ou alinhadas paralelamente ao microbandamento quartzo-feldspático. A hornblenda forma prismas de granulação média (até 2mm), com faces hipidiomórficas e xenomórficas, contatos irregulares e fraturamento moderado. Em porções mais deformadas, esses prismas se encontram levemente estirados acompanhando a foliação milonítica (Figura 4b). Além disso, no caso do CHTnl, este mineral também ocorre como produto de alteração do clinopiroxênio (uralitização, Figura 4d). O epídoto constitui outra fase máfica de grande importância e ocorre em dois tipos microestruturais: Ep₁ de origem magmática (Figura 4a), geralmente idiomórfico, de granulação muito fina e em contatos retos com a biotita, a hornblenda e a titanita; e Ep₂ possivelmente metamórfico, xenoblástico e muito comum na variedade EBQzD na forma de agregados (Figura 4d). Por fim, os minerais acessórios observados – allanita, titanita, zircão, apatita e minerais opacos – são hipidiomórficos e xenomórficos, microfraturados e com relações de contato irregulares com os demais.

2.5 GEOQUÍMICA

2.5.1 Procedimentos analíticos

Os dados geoquímicos dos ortognaisses de Água Azul do Norte foram obtidos pela empresa ACME *Analytical Laboratories Ltda*, onde foram realizadas análises de elementos maiores e menores por *Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry* (ICP-ES) e de elementos-traço por *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS; Santos *et al.* 2018). As concentrações obtidas para as 09 amostras estão apresentadas na Tabela 2 e, a partir delas, foram processados os diagramas de caracterização geoquímica utilizando o *software* GCDKit 4.1. Métodos e limites de detecção utilizados estão em: www.acmelab.com.

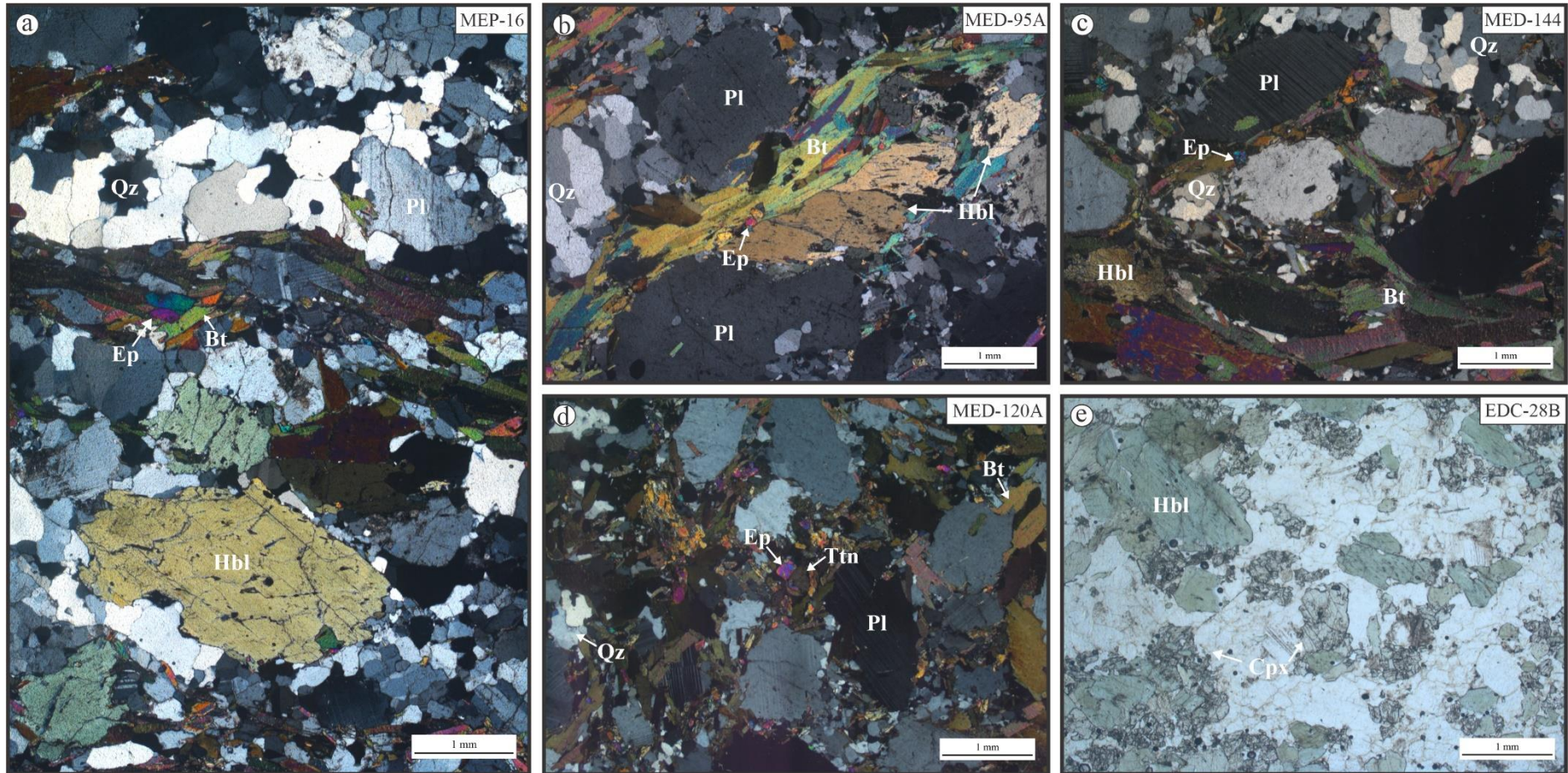


Figura 4 – Aspectos texturais e microestruturais do grupo de rochas tonalíticas – quartzo dioríticas de Água Azul do Norte: (a) Mosaico da amostra MEP-16 pertencente à variedade principal (HBTnl), com destaque para a textura representativa dessas amostras (microbandamento composicional de quartzo e plagioclásio alternado com aglomerados máficos orientados), assim como porfiroclastos de hornblenda bordejados por quartzo recristalizado; (b) foliação contínua demarcada pela orientação de hornblenda e biotita em contato com a foliação oblíqua de quartzo estirado (*ribbon*); (c) e (d) Porfiroclastos de plagioclásio imersos em matriz alotriomórfica predominantemente máfica, com a ocorrência de poucos cristais de quartzo de granulação média (MED-144) à fina (MED-120A), assim como cristais de quartzo com contatos retos e pontos tríplice (canto superior direito da MED-144) sugerindo a redução de limite de grão (GBAR); (e) Abundância de clinopiroxênio e hornblenda em textura alotriomórfica marcam a variedade mais máfica observada (CHTnl).

2.5.2 Classificação geoquímica e série magmática

Segundo a classificação normativa P-Q de Debon & Le Fort (1983, Figura 5a), as amostras analisadas tendem a alinhar-se ao *trend* cálcico-alcálico a partir de membros menos evoluídos (quartzodiorito) até mais evoluídos (tonalitos e granodioritos). Para a maioria delas, as composições tonalíticas e a afinidade geoquímica com a série cálcico-alcálica de médio-K também são observadas nos diagramas Ab-An-Or de O'Connor (1965, Figura 5b), Na₂O+K₂O-CaO vs. SiO₂ (MALI, Figura 5c) de Frost *et al.* (2001) e K₂O vs. SiO₂ (Peccerillo & Taylor 1976, Figura 5d). Já no diagrama ternário K-Na-Ca de Barker & Arth (1976, Figura 5e) tais amostras seguem o *trend* trondhjemítico. A amostra MED-144 (HBTnl) apresentou assinatura granodiorítica e afinidade cálcico-alcálica de alto-K. Quando confrontado o índice de ferro (Fe* ou FeO_t/FeO_t+MgO) vs. SiO₂ (Figura 5f, Frost *et al.* 2001), as variedades quartzodioríticas (EBQzD e HBQzD) exibiram composição moderadamente magnésiana, enquanto que as tonalíticas (HBTnl e CHTnl) são fortemente magnésianas. De forma geral é possível notar um comportamento “transicional” dos ortognaisses de composição tonalítica-quartzo diorítica, cujas amostras situam-se entre as composições daquelas de afinidade TTG do Terreno Sapucaia (Ortognaisses Caracol e Colorado, Tonalito Mariazinha e Trondhjemito Água fria; Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010) e dos sanukitoides da área (Suíte Água Limpa; Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010). Os ortognaisses de assinatura TTG que formam o Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul estão representados nos diagramas separadamente a partir de um campo tracejado (Santos *et al.* 2018), assim como as composições do Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).

2.5.3 Elementos maiores e menores

Considerando os diagramas de Harker (Figura 6) e os dados apresentados na Tabela 2, os ortognaisses exibiram uma variação entre 60,55 à 67,28% no conteúdo de SiO₂, baixo teor de Na₂O (<5,43%) e moderado de K₂O (1,24-2,23%), exceto a MED-144 onde o conteúdo de K₂O é mais expressivo. Isso gerou uma média de 0,43 na razão K₂O/Na₂O, assim como *trends* de correlação positiva entre esses óxidos conforme observado nos gráficos K₂O vs. SiO₂ da Figura 5d e K₂O/Na₂O vs. SiO₂ da Figura 6f. TiO₂ (>0,26%), Al₂O₃ (>13,95%), Fe₂O₃ (>2,93%), MgO (>2,05%), CaO (>3,32%) e #Mg (>0,44) resultaram em diagramas negativamente correlacionados em função da quantidade de SiO₂ (Figura 6a-e). Nesse contexto, o CHTnl se diferenciou das demais pelo seu conteúdo reduzido de Al₂O₃ e pelo teor ainda mais elevado de Fe₂O₃, MgO e CaO. Enquanto isso, os quartzodioritos exibiram teores relativamente mais altos de Na₂O, Al₂O₃, TiO₂, CaO e Fe₂O₃ e empobrecimento em MgO.

Tabela 2 – Composições químicas dos ortognaisses. Fe₂O_{3T} – ferro total recalculado como Fe₂O₃; LOI – *loss on ignition*; A/CNK= [Al₂O_{3mol}]/(CaO_{mol}+Na₂O_{mol}+K₂O_{mol}); Mg#= [100*(MgO_{mol})/(MgO_{mol} + FeO_{mol})] e Eu/Eu*=[(Eu_N)/((Sm_N + Gd_N)/2)].

| Amostra | MED 120A | MEP 53B | EDC 28B | MED 95A | MEP 23B | MEP 12B | MEP 12A | MEP 16 | MED 144 |
|---|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| Variedade | EBQzD | HBQzD | CHTnl | HBTnl | | | | | |
| SiO ₂ | 63,21 | 60,55 | 60,62 | 63,80 | 64,36 | 65,04 | 66,78 | 67,28 | 65,37 |
| TiO ₂ | 0,53 | 0,66 | 0,39 | 0,41 | 0,40 | 0,37 | 0,26 | 0,32 | 0,34 |
| Al ₂ O ₃ | 17,07 | 17,17 | 13,95 | 15,60 | 15,66 | 15,56 | 16,39 | 15,15 | 14,83 |
| Fe ₂ O _{3T} | 5,22 | 6,02 | 6,55 | 5,14 | 4,55 | 4,20 | 2,93 | 3,64 | 4,59 |
| MnO | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 0,09 | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,05 | 0,09 |
| MgO | 2,05 | 2,36 | 5,82 | 3,48 | 3,56 | 3,47 | 2,42 | 2,81 | 3,63 |
| CaO | 4,23 | 5,11 | 5,39 | 3,57 | 4,31 | 4,24 | 3,87 | 3,68 | 3,32 |
| Na ₂ O | 4,54 | 5,43 | 4,21 | 4,35 | 4,16 | 4,08 | 4,51 | 4,10 | 3,63 |
| K ₂ O | 1,96 | 1,24 | 1,47 | 2,23 | 1,63 | 1,71 | 1,59 | 1,83 | 2,88 |
| P ₂ O ₅ | 0,18 | 0,18 | 0,09 | 0,20 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,12 |
| LOI | 0,70 | 0,90 | 1,10 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,70 | 0,80 |
| Total | 99,78 | 99,73 | 99,77 | 99,70 | 99,63 | 99,66 | 99,71 | 99,69 | 99,64 |
| Ba (ppm) | 325 | 427 | 301 | 334 | 808 | 687 | 559 | 760 | 1160 |
| Rb | 99,6 | 49,9 | 62,5 | 119,5 | 69,1 | 63,1 | 65,0 | 73,1 | 114,5 |
| Sr | 504,3 | 556,0 | 472,3 | 467,6 | 794,2 | 795,1 | 784,2 | 737,1 | 547,4 |
| Zr | 165,1 | 217,1 | 63,3 | 116,1 | 128,6 | 119,9 | 99,8 | 102,7 | 112,6 |
| Y | 13,0 | 18,2 | 18,5 | 18,7 | 6,0 | 6,4 | 5,4 | 5,9 | 13,4 |
| Hf | 4,3 | 5,1 | 1,8 | 3,1 | 3,8 | 3,3 | 2,8 | 2,7 | 3,2 |
| Nb | 6,9 | 10,4 | 5,6 | 8,9 | 3,8 | 3,3 | 2,7 | 3,6 | 6,3 |
| Ta | 0,6 | 1,3 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,0 |
| Ni | 21,4 | 23,3 | 32,8 | 64,3 | 62,6 | 61,9 | 55,1 | 57,3 | 95,1 |
| Cr | 37,0 | 36,9 | 317,8 | 207,1 | 222,2 | 214,8 | 140,2 | 177,9 | 319,5 |
| Ga | 25,1 | 23,6 | 19,2 | 23,4 | 21,1 | 18,2 | 19,5 | 18,4 | 20,1 |
| Sc | 16,0 | 18,0 | 21,0 | 17,0 | 10,0 | 9,0 | 9,0 | 8,0 | 18,0 |
| Th | 7,5 | 6,0 | 1,7 | 6,0 | 1,4 | 1,9 | 0,5 | 3,6 | 4,2 |
| U | 0,4 | 3,1 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| V | 66,0 | 91,0 | 124,0 | 83,0 | 76,0 | 72,0 | 47,0 | 59,0 | 66,0 |
| La (ppm) | 30,50 | 25,30 | 18,30 | 30,50 | 16,50 | 15,80 | 8,70 | 21,90 | 26,80 |
| Ce | 56,00 | 51,90 | 42,00 | 66,40 | 31,40 | 28,20 | 14,90 | 41,00 | 44,40 |
| Pr | 6,33 | 6,45 | 6,21 | 7,51 | 3,80 | 3,54 | 1,56 | 4,18 | 5,60 |
| Nd | 21,60 | 26,80 | 25,40 | 28,80 | 14,80 | 13,10 | 6,30 | 14,10 | 21,00 |
| Sm | 4,56 | 5,06 | 5,53 | 6,02 | 2,68 | 2,41 | 1,38 | 2,51 | 3,89 |
| Eu | 0,86 | 1,25 | 0,72 | 0,67 | 0,82 | 0,71 | 0,72 | 0,71 | 0,80 |
| Gd | 3,76 | 4,88 | 4,58 | 4,97 | 2,17 | 2,00 | 1,37 | 1,88 | 3,43 |
| Tb | 0,51 | 0,67 | 0,66 | 0,71 | 0,27 | 0,26 | 0,20 | 0,24 | 0,52 |
| Dy | 2,71 | 3,54 | 3,66 | 3,90 | 1,38 | 1,35 | 1,21 | 1,30 | 2,65 |
| Ho | 0,49 | 0,70 | 0,64 | 0,66 | 0,24 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,55 |
| Er | 1,34 | 1,85 | 1,96 | 1,76 | 0,71 | 0,69 | 0,58 | 0,52 | 1,46 |
| Tm | 0,18 | 0,23 | 0,29 | 0,23 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,20 |
| Yb | 1,14 | 1,68 | 1,78 | 1,43 | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,52 | 1,22 |
| Lu | 0,17 | 0,24 | 0,26 | 0,18 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,17 |
| A/CNK | 0,99 | 0,88 | 0,76 | 0,97 | 0,95 | 0,96 | 1,01 | 0,98 | 0,98 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 0,43 | 0,23 | 0,35 | 0,51 | 0,39 | 0,42 | 0,35 | 0,45 | 0,79 |
| Fe ₂ O _{3T} +MgO+MnO+TiO ₂ | 7,88 | 9,14 | 12,90 | 9,12 | 8,56 | 8,10 | 5,65 | 6,82 | 8,65 |
| # Mg | 0,44 | 0,44 | 0,64 | 0,57 | 0,61 | 0,62 | 0,62 | 0,60 | 0,61 |
| Sr/Y | 38,79 | 30,55 | 25,53 | 25,01 | 132,37 | 124,23 | 145,22 | 124,93 | 40,85 |
| Rb/Sr | 0,20 | 0,09 | 0,13 | 0,26 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,21 |
| Nb/Ta | 11,50 | 8,00 | 9,33 | 12,71 | 7,60 | 5,50 | 4,50 | 5,14 | 6,30 |
| Gd/Yb | 3,30 | 2,90 | 2,57 | 3,48 | 3,34 | 3,33 | 2,49 | 3,62 | 2,81 |
| (La/Yb) _N | 18,06 | 10,16 | 6,94 | 14,40 | 17,13 | 17,77 | 10,68 | 28,43 | 14,83 |
| ΣLREE | 118,99 | 115,51 | 97,44 | 139,23 | 69,18 | 63,05 | 32,84 | 83,69 | 101,69 |
| ΣHREE | 10,30 | 13,79 | 13,83 | 13,84 | 5,59 | 5,32 | 4,29 | 4,80 | 10,20 |
| Eu/Eu* | 0,62 | 0,76 | 0,43 | 0,36 | 1,01 | 0,96 | 1,58 | 0,96 | 0,66 |

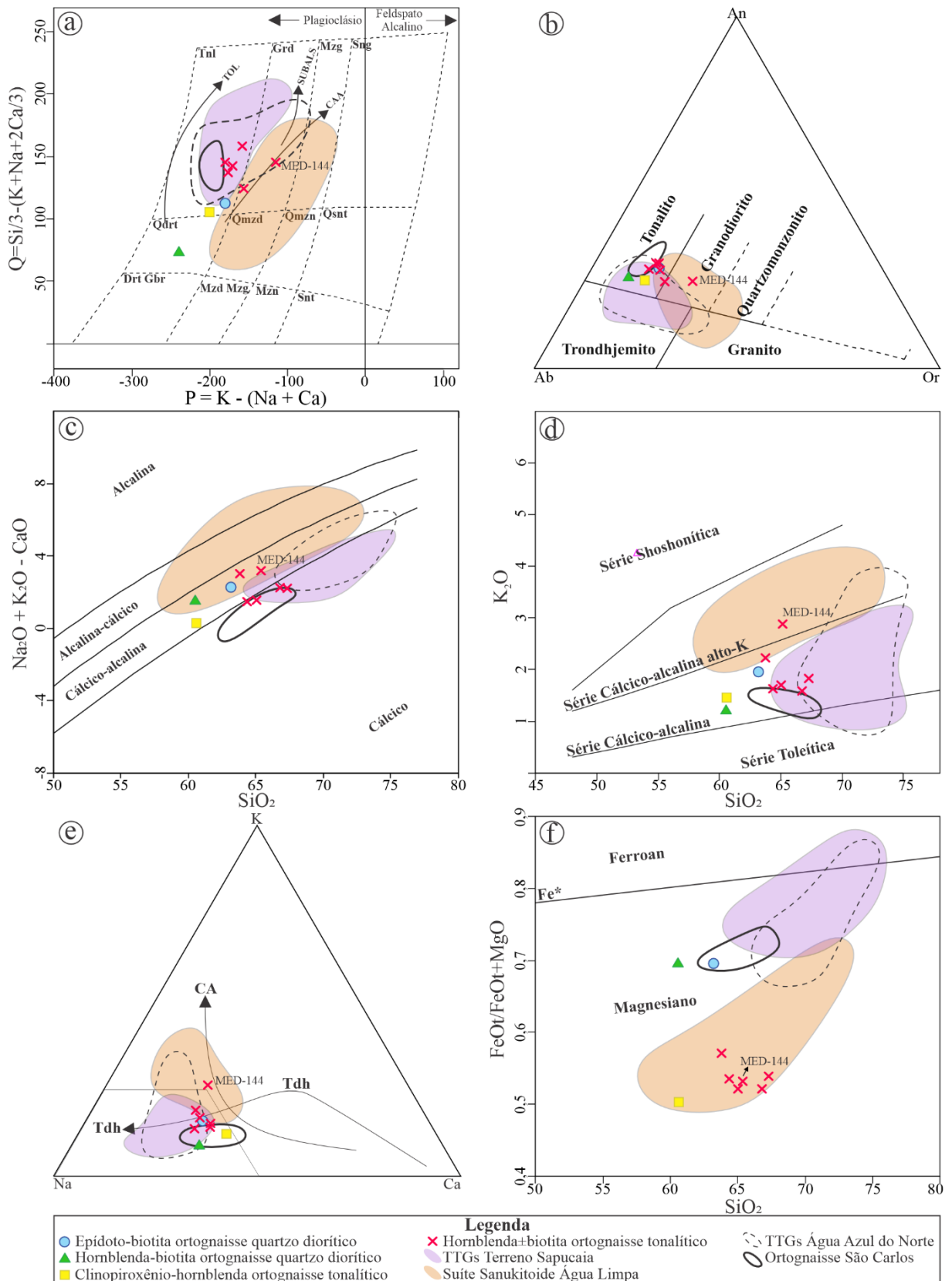


Figura 5 – Classificação e série magmática dos ortogneisses: (a) Diagrama P-Q (Debon & Le Fort 1983); (b) Diagrama normativo Ab-An-Or (O'Connor 1965); (c) Diagrama $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ (MALI) vs. SiO_2 (Frost *et al.* 2001); (d) Diagrama K_2O vs. SiO_2 (Peccerillo & Taylor 1976); (e) Diagrama K-Na-Ca (Barker & Arth 1976); (f) Índice de ferro (Fe^*) vs. SiO_2 (Frost *et al.* 2001). Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suíte Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).

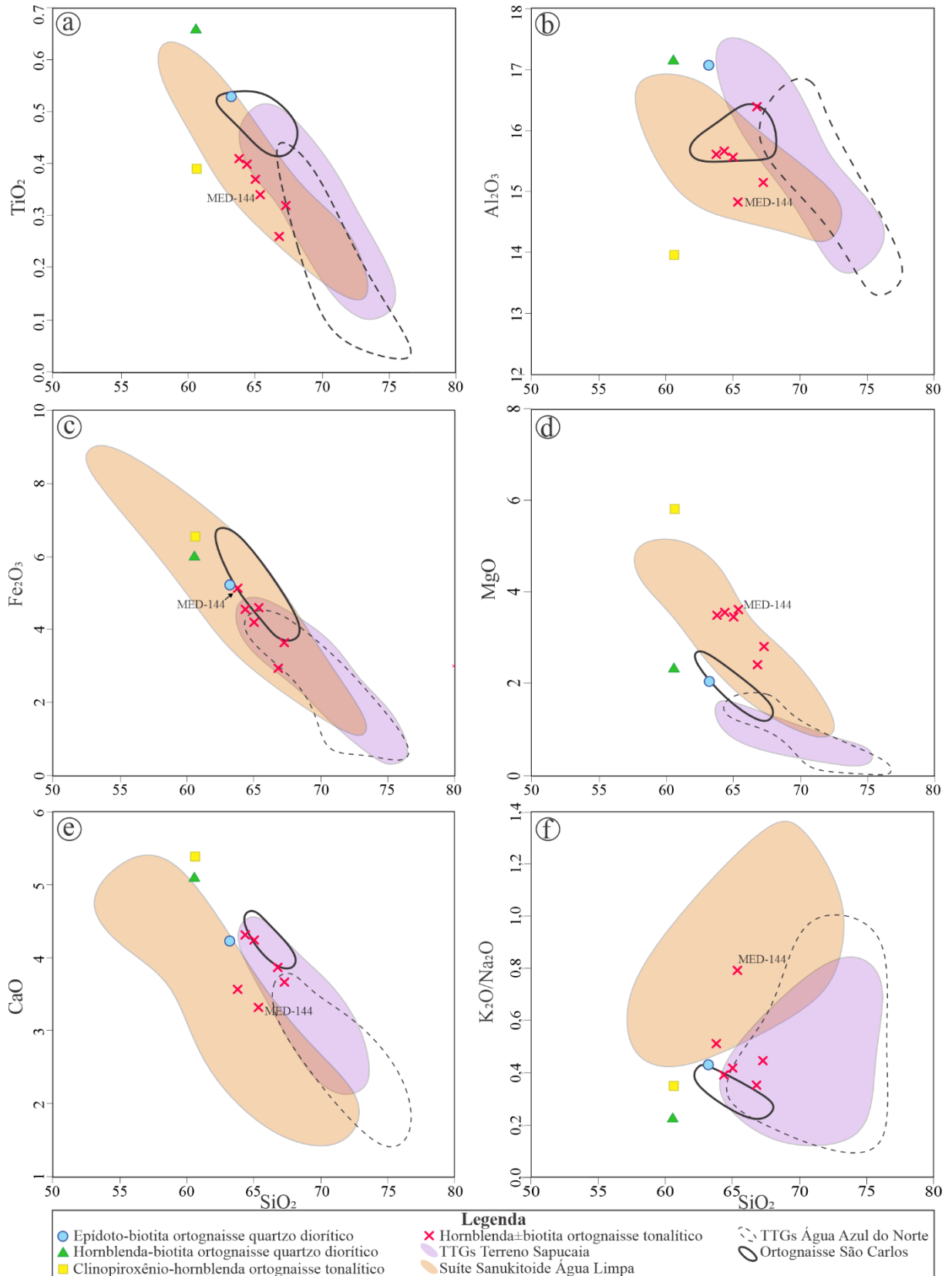


Figura 6 – Diagramas de Harker para elementos maiores e menores: (a) TiO_2 ; (b) Al_2O_3 ; (c) Fe_2O_3 ; (d) MgO ; (e) CaO ; (f) $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suite Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).

2.5.4 Elementos-traço

As variedades tonalíticas exibem altas concentrações de elementos compatíveis mantélicos como o Ni e o Cr (Tabela 2), especialmente na amostra MED-144 onde seus conteúdos são ainda mais expressivos (Ni= 91,1 ppm; Cr= 319,5 ppm). Já os quartzodioritos se mostraram empobrecidos nestes elementos (Ni= 21 ppm para o EBQzD e 23 ppm para o HBQzD; Cr= 37 ppm para ambos). Os conteúdos de *Large-Ion Lithophile Elements* – LILE (Ba= 301–808 ppm; Rb= 50–119 ppm; Sr= 472–795 ppm) são moderados, salvo a MED-144 com Ba relativamente mais alto (1160 ppm). O Rb e o Sr não mostram uma analogia clara em relação a SiO₂, o que se refletiu em resultados não colineares quando apresentados em gráfico (Figura 7a), enquanto que o Ba gerou uma correlação positiva (Figura 7b). Em relação ao comportamento dos *High Field Strength Elements* – HFSE, são observados dois grupos distintos (Figura 7c e d): i) O primeiro (que inclui os quartzo dioritos, o CHTnl e as amostras MED-95A e 144) é mais enriquecido em Y e Nb e empobrecido em Sr, o que gerou baixas razões Sr/Y (25 – 41) para essas amostras; ii) O segundo (amostras MEP-12A, 12B, 16 e 23B) é mais empobrecido em Y e Nb e enriquecido em Sr, resultando em razões Sr/Y mais elevadas (124 – 145).

2.5.5 Elementos terras raras e padrão multielementar

A partir das concentrações de elementos terras raras (ETR) foram construídas as curvas de abundância normalizada para os valores condríticos de Boynton (1984). De forma geral, o modelo gerado mostrou um pequeno enriquecimento em elementos terras raras leves (ETRL) em comparação aos pesados (ETRP) e padrão subhorizontalizado ($2,49 \leq \text{Gd/Yb} \leq 3,62$). A separação identificada no comportamento do Sr e dos HFSE (Nb e Y) também pode ser observada nos ETRs. O grupo com baixa razão Sr/Y exibiu baixo fracionamento de ETRP ($\Sigma=10,2-13,8$), moderada anomalia negativa de Eu ($\text{Eu/Eu}^*= 0,36-0,76$) e enriquecimento em La (18,3–30,5 ppm) e Yb (1,14–1,78 ppm), gerando baixas razões La/Yb_N (6,94–18,0). Já o grupo com Sr/Y mais elevado mostrou moderado fracionamento de ETRP ($\Sigma= 4,3-5,6$), discreta anomalia de Eu ($\text{Eu/Eu}^* >0,96$) e empobrecimento em La (8,70–21,90 ppm) e Yb (0,52–0,65 ppm), posicionando as amostras na parte inferior do diagrama (Figura 7e), porém também geram razões La/Yb_N baixas e proporcionalmente similares às do grupo anterior (10,68–28,43). Considerando o diagrama multielementar normalizado pelo manto primitivo (McDonough & Sun 1995), as rochas estudadas exibiram um padrão de LILE (Rb, Ba e Sr) levemente mais enriquecido em relação aos TTGs e ao Ortognaisse São Carlos e mais empobrecido em comparação aos sanukitoides deste terreno. As anomalias negativas de Nb, P

e Ti foram moderadas e se assemelharam em grande proporção aos sanukitoides, destoando do comportamento acentuado observado nos TTGs (Figura 7f; Almeida *et al.* 2011, Gabriel *et al.* 2010, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010).

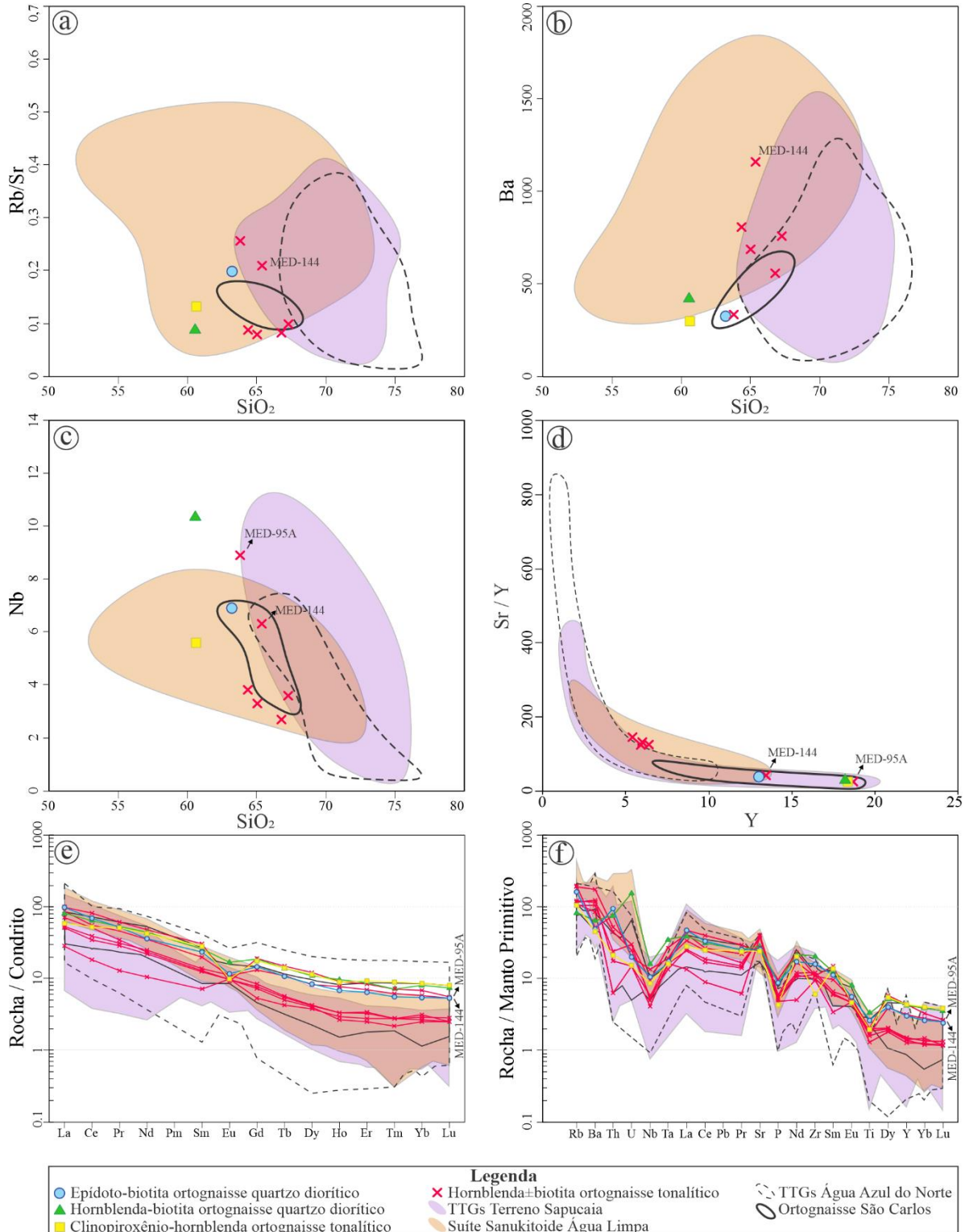


Figura 7 – Diagramas de Harker para elementos-traço, Diagrama ETR normalizado para o condrito (Boynton 1984) e Multielementos normalizado para o manto primitivo (McDonough & Sun 1995): (a) Rb/Sr, (b) Ba e c) Nb vs. SiO₂; (d) Sr/Y vs. Y; (e) ETR; (f) Multielementos. Campos de comparação: TTGs Água Azul do Norte (Santos *et al.* 2018); TTGs Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Silva *et al.* 2010); Suite Sanukitoide Água Limpa (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010); Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014).

2.6 GEOCROLOGIA

A seleção dos cristais de zircão dos tonalitos e quartzodioritos se deu com base na aplicação de diferentes técnicas de separação de minerais pesados. Com apoio do Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA, foram obtidas imagens de catodoluminescência e elétrons-retroespalhados que auxiliaram na determinação de dados geocronológicos de quatro amostras: i) **MED-120A**, que ocorre como xenólito em leucogranodioritos e destaca-se pela ausência de hornblenda e conteúdo de epídoto acentuado (EBQzD); ii) **EDC-28B**, referente à variedade mais enriquecida em minerais máficos (CHTnl); e iii) **MED-144** e **MED-95A**, coletadas em afloramentos bastante característicos da unidade (HBTnl). Estas imagens auxiliaram na seleção de zonas adequadas para análise pontual à medida que permitiram a observação da morfologia e estrutura interna dos cristais. A partir disso, foram obtidas composições U-Pb por LA-Q-ICP-MS no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (PARÁ-ISO) e os resultados foram utilizados na confecção de diagramas de concórdia e definição das idades, excluindo-se aqueles pontos com elevado conteúdo de chumbo comum ($f_{206} > 1$) e baixo grau de concordância.

2.6.1 Epídoto-biotita ortognaisse quartzo diorítico

Os cristais analisados apresentam 150 a 300 μm de comprimento, coloração rosada e razão comprimento/largura (proporção de alongamento) variando entre 1,5 a 4. Exibem formas prismáticas pouco alongadas, com faces subédricas e euédricas, frequentes inclusões de minerais opacos e poucas variedades geminadas. O zoneamento oscilatório é bastante evidente e as terminações piramidais são moderadamente preservadas. Além disso, o fraturamento exhibe padrão aleatório ou concêntrico, este último relacionado à zircões com significativas diferenças entre os teores de urânio no núcleo e borda, como no cristal 16 (Figura 8c). Dos pontos analisados (Tabela 3 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-120A.), 26 formam a *População A* de idade com intercepto superior de **3047,1 \pm 4,9 Ma** (MSWD= 0,69; Figura 8a) e idade média ponderada de **3045,8 \pm 9,8 Ma** (MSWD= 0,30), além de idade concórdia de **3057,9 \pm 7,6 Ma** (Pontos= 3, 6, 22 e 27; MSWD= 0,022; Figura 8b). A borda do cristal 16 (*spot* 16.2) e o cristal 14 (núcleo e borda) divergiram dessa configuração e formam a *População B* com idade de intercepto superior de **2975 \pm 16 Ma** (MSWD= 0,00056; Figura 8a). Por outro lado, os *spots* 12.2, 20.1 e 20.2 (*População D*) geraram a idade de intercepto superior de **2843 \pm 39** (MSWD= 0,15; Figura 8a).

2.6.2 Clinopiroxênio-hornblenda ortognaisse tonalítico

Diferente da variedade anterior, o CHTnl mostrou zircões de coloração castanha, maior comprimento (200-350 μm) e proporção de alongamento entre 2,5 à 6. São cristais prismáticos com faces subédricas, bastante alongados e com fraturamento intenso e paralelo ao eixo principal, além de bordas irregulares e muitas vezes corroídas, textura uniforme (zoneamento oscilatório ausente) e poucas inclusões de minerais opacos (Figura 9c). Para essa amostra, os pontos analisados geraram duas populações de zircão com idades distintas (B e E, Tabela 4). A *população B* forneceu idade com intercepto superior de **2935,9 \pm 9,8 Ma** (MSWD= 0,022; Figura 9a) e idade média ponderada de **2935 \pm 14 Ma** (MSWD= 0,0098; Figura 9a) a partir dos *spots* 3, 6.1, 6.2, 8.1, 15, 17, 19, 27, 28 e 29 (n=10), dentre os quais cinco análises concordantes geraram idade de **2934,2 \pm 7,4 Ma** (Pontos= 6.1, 6.2, 15, 27 e 28; MSWD= 0,07; Figura 9b). Enquanto isso, a *população E* formada pelos *spots* 8.2, 14 e 21 produziu idade com intercepto superior de **2815 \pm 48 Ma** (MSWD= 0,014; Figura 9a).

2.6.3 Hornblenda \pm Biotita ortognaisse tonalítico

Desta variedade, foram datadas as amostras MED-144 e MED-95A. Na primeira foram encontrados diversos cristais de hábito arredondado, com faces anédricas e subédricas, comprimento reduzido (100-250 μm) e razão comprimento/largura máxima de 1,5. Também ocorrem alguns zircões prismáticos alongados predominantemente subédricos, com 250 a 400 μm de comprimento e proporção de alongamento entre 3,5 a 5 (Figura 10b), sendo ambos de coloração castanho claro e rosa, com poucas inclusões e fraturamento moderado. Núcleos preservados e de coloração mais clara em catodoluminescência formam a *população B* com idade com intercepto superior de **2978,4 \pm 7,5 Ma** (Pontos= 8.1, 26, 28.1, 31 e 32; MSWD= 0,88; Figura 10a) e idade média ponderada de **2977 \pm 37 Ma** (MSWD= 2,7). Uma segunda população foi determinada a partir de zircões caoticamente zoneados (ou até homogêneos), com bordas de crescimento finas à imperceptíveis e idade com intercepto superior de **2916,4 \pm 6,2 Ma** (*População C*= 3, 6.1, 7, 9, 10, 15, 18.1, 22, 27, 30; MSWD= 0,48; Figura 10a) e idade média ponderada de **2917 \pm 12 Ma** (MSWD= 0,71). Além destes, um único cristal concordante (*spot* 13) forneceu idade $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de **2885 \pm 18 Ma** (Figura 10a, Tabela 5).

A amostra MED-95A mostrou comportamento semelhante, com ocorrência tanto de pequenos zircões sub-arredondados quanto prismáticos alongados, ambos de coloração castanho claro e com intenso fraturamento; além de comprimento variando entre 150 e 400 μm e razão comprimento/largura de 1,3 à 3,5 (Figura 11c). Sete cristais formam a *população B* de idade com intercepto superior de **2956,3 \pm 4,1 Ma** (*Spots*= 7, 12.1, 14.1, 23, 24, 26 e 30;

MSWD= 0,18; Figura 11a, Tabela 6 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-95A.) e idade média ponderada de **2959±15 Ma** (MSWD= 0,15), dos quais seis fornecem idade concórdia de **2953,7±6,0 Ma** (MSWD= 0,48; Figura 11b). Assim como na amostra MED-144, esses cristais mostram núcleos uniformes envolvidos por uma borda homogênea ou com zoneamento fracamente preservado. Os demais zircões exibiram zoneamento desordenado à imperceptível (cristal inteiramente homogêneo) e formaram a *população C*, com idade de intercepto superior de **2914,4±8,2 Ma** (*Spots*= 10, 18 e 19; MSWD= 0,098; Figura 11a), e a *população D*, com idade de intercepto superior de **2892,3±4,4 Ma** (*Spots*= 5, 6, 9, 11, 14.2, 16.1, 16.2 e 33; MSWD= 0,39; Figura 11a) e idade média ponderada de **2893±14 Ma** (MSWD= 0,110).

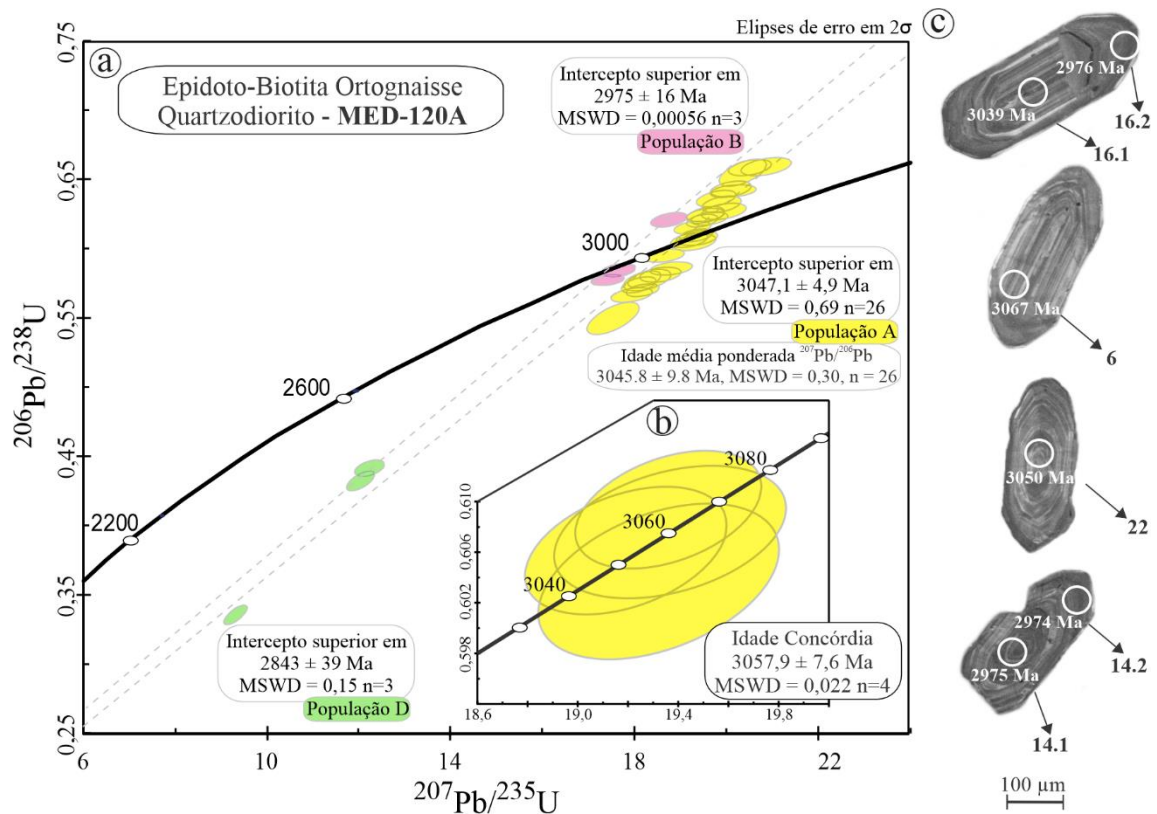


Figura 8 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortogneisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idade média ponderada obtidas para a amostra MED-120A, com destaque para as populações A (em amarelo) e B (em rosa); (b) Idade concórdia de 3057,9 ± 7,6 Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.

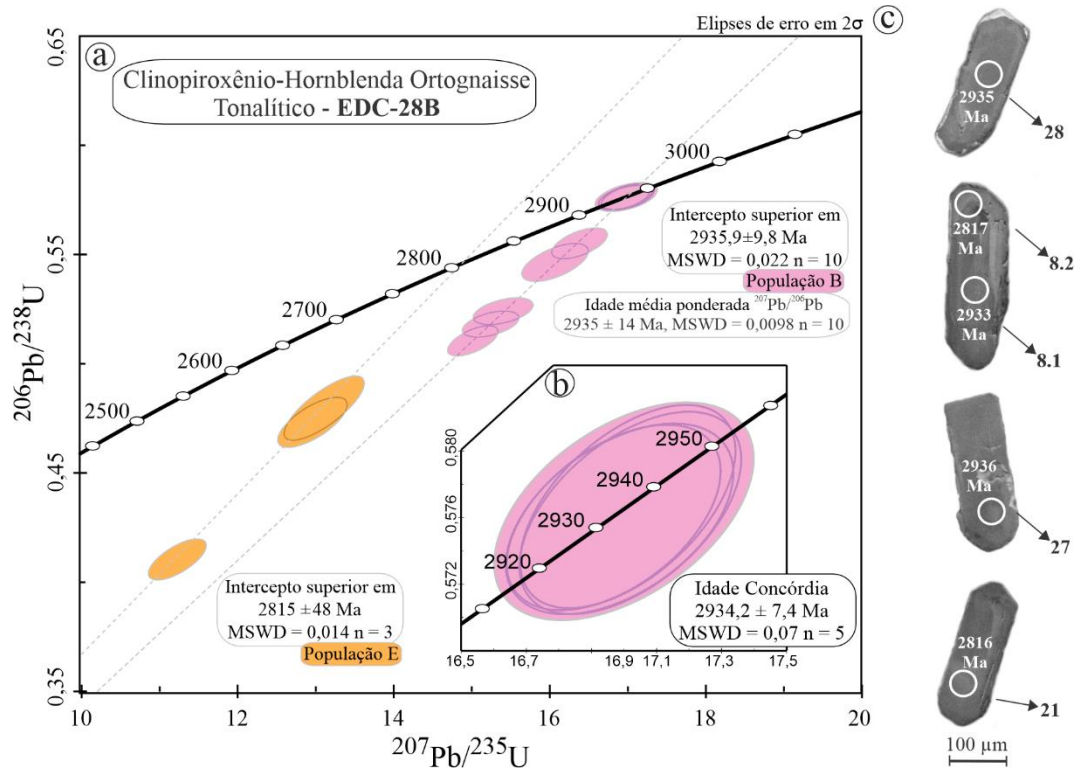


Figura 9 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idade média ponderada obtidas para a amostra EDC-28B (populações B em rosa e E em laranja); (b) Idade concórdia de $2934,2 \pm 7,4$ Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais com os *spots* identificados e suas respectivas idades.

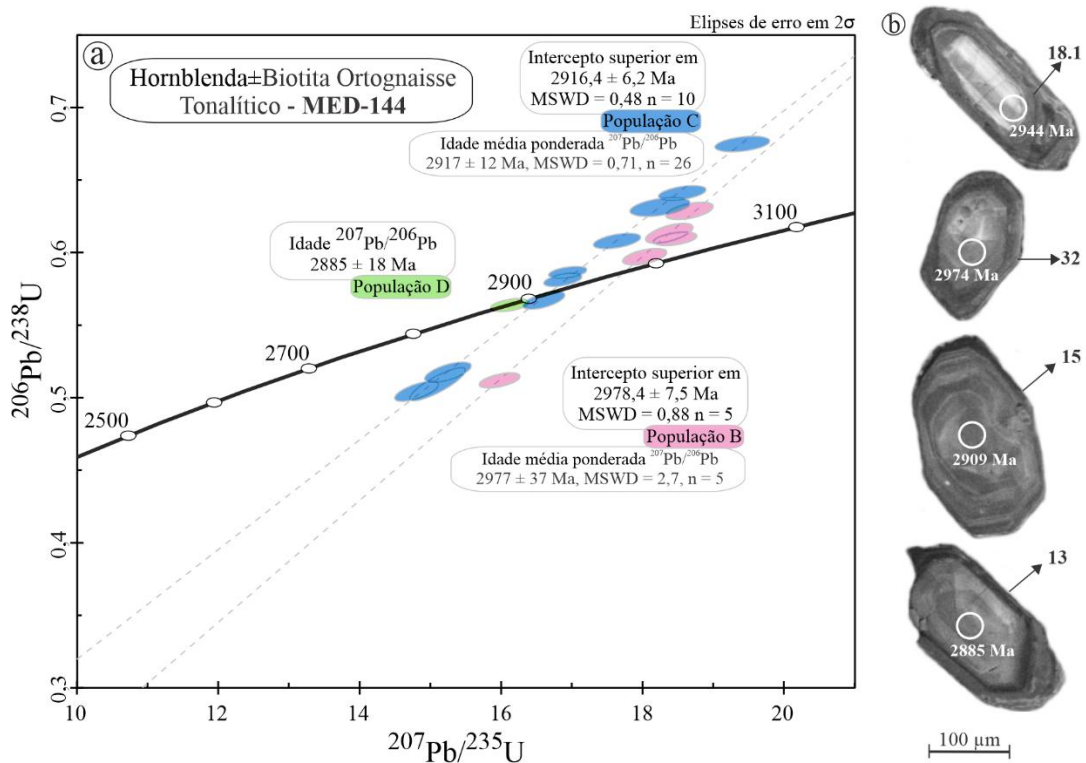


Figura 10 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortognaisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idades médias ponderadas obtidas para a amostra MED-144, com destaque para as populações B (em rosa), C (em azul) e D (em verde); (b) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.

Tabela 3 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-120A.

| Spots | ²⁰⁶ Pb ^a | | | | | Razões isotópicas ^c | | | | | | | Idades | | | | | Concordância ^f | |
|-------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|------------------|---|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------------------------------------|---------------------------|-----|
| | U | Pb | Th | Th/U ^b | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | Rho ^d | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^e | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | % |
| | (%) | (ppm) | (ppm) | (ppm) | | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | | 1σ (%) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | | |
| 3* | 0,31 | 37 | 11 | 28 | 0,39 | 19,3675 | 0,97 | 0,6076 | 0,35 | 0,36 | 0,2312 | 0,91 | 3060 | 30 | 3060 | 11 | 3060 | 28 | 100 |
| 6* | 0,21 | 48 | 20 | 40 | 0,51 | 19,3220 | 1,01 | 0,6037 | 0,42 | 0,41 | 0,2321 | 0,93 | 3058 | 31 | 3045 | 13 | 3067 | 28 | 100 |
| 22* | 0,27 | 49 | 19 | 54 | 0,36 | 19,3610 | 0,78 | 0,6094 | 0,31 | 0,40 | 0,2304 | 0,72 | 3060 | 24 | 3067 | 10 | 3055 | 22 | 100 |
| 27* | 0,21 | 48 | 22 | 54 | 0,40 | 19,1917 | 0,86 | 0,6061 | 0,34 | 0,40 | 0,2296 | 0,79 | 3052 | 26 | 3054 | 10 | 3050 | 24 | 100 |
| 1 | 0,96 | 39 | 6 | 21 | 0,28 | 20,8891 | 1,06 | 0,6583 | 0,43 | 0,40 | 0,2301 | 0,97 | 3133 | 33 | 3261 | 14 | 3053 | 30 | 104 |
| 2 | 0,23 | 58 | 28 | 44 | 0,64 | 20,1590 | 1,00 | 0,6406 | 0,31 | 0,31 | 0,2282 | 0,95 | 3099 | 31 | 3191 | 10 | 3040 | 29 | 103 |
| 4 | 0,36 | 53 | 23 | 42 | 0,55 | 18,6300 | 1,01 | 0,5944 | 0,34 | 0,34 | 0,2273 | 0,95 | 3023 | 30 | 3007 | 10 | 3033 | 29 | 99 |
| 5 | 0,29 | 44 | 17 | 35 | 0,48 | 19,9630 | 1,02 | 0,6262 | 0,42 | 0,41 | 0,2312 | 0,93 | 3090 | 32 | 3135 | 13 | 3060 | 28 | 101 |
| 7 | 0,35 | 47 | 17 | 39 | 0,45 | 18,5767 | 0,99 | 0,5807 | 0,35 | 0,35 | 0,2320 | 0,93 | 3020 | 30 | 2952 | 10 | 3066 | 28 | 98 |
| 8 | 0,29 | 50 | 43 | 65 | 0,66 | 18,2921 | 1,11 | 0,5763 | 0,55 | 0,49 | 0,2302 | 0,96 | 3005 | 33 | 2934 | 16 | 3053 | 29 | 98 |
| 9 | 0,35 | 43 | 23 | 47 | 0,50 | 17,5471 | 1,31 | 0,5486 | 0,86 | 0,66 | 0,2320 | 0,98 | 2965 | 39 | 2819 | 24 | 3066 | 30 | 95 |
| 10 | 0,29 | 54 | 20 | 55 | 0,36 | 17,9317 | 1,03 | 0,5661 | 0,40 | 0,39 | 0,2297 | 0,95 | 2986 | 31 | 2892 | 12 | 3050 | 29 | 97 |
| 11 | 0,34 | 48 | 15 | 40 | 0,38 | 18,8011 | 1,00 | 0,5854 | 0,35 | 0,35 | 0,2329 | 0,94 | 3032 | 30 | 2971 | 10 | 3072 | 29 | 98 |
| 12.1 | 0,29 | 53 | 28 | 61 | 0,45 | 18,1821 | 0,80 | 0,5690 | 0,33 | 0,41 | 0,2318 | 0,73 | 2999 | 24 | 2904 | 9 | 3064 | 22 | 97 |
| 16.1 | 0,26 | 39 | 14 | 44 | 0,33 | 19,4764 | 0,76 | 0,6194 | 0,29 | 0,38 | 0,2281 | 0,70 | 3066 | 23 | 3107 | 9 | 3039 | 21 | 101 |
| 18.1 | 0,33 | 44 | 20 | 53 | 0,38 | 18,1013 | 0,87 | 0,5734 | 0,43 | 0,50 | 0,2289 | 0,75 | 2995 | 26 | 2922 | 13 | 3045 | 23 | 98 |
| 18.2 | 0,31 | 47 | 11 | 68 | 0,17 | 18,2326 | 0,82 | 0,5775 | 0,40 | 0,48 | 0,2290 | 0,72 | 3002 | 25 | 2939 | 12 | 3045 | 22 | 98 |
| 23.1 | 0,29 | 56 | 39 | 63 | 0,62 | 19,8049 | 0,90 | 0,6354 | 0,40 | 0,45 | 0,2261 | 0,81 | 3082 | 28 | 3171 | 13 | 3024 | 24 | 103 |
| 23.2 | 0,50 | 38 | 6 | 35 | 0,18 | 20,3741 | 1,01 | 0,6536 | 0,60 | 0,60 | 0,2261 | 0,81 | 3109 | 31 | 3242 | 20 | 3025 | 24 | 104 |
| 25 | 0,43 | 40 | 14 | 40 | 0,35 | 19,5466 | 0,87 | 0,6233 | 0,31 | 0,35 | 0,2274 | 0,82 | 3069 | 27 | 3123 | 10 | 3034 | 25 | 102 |
| 26 | 0,31 | 57 | 32 | 60 | 0,54 | 19,2785 | 0,88 | 0,6142 | 0,33 | 0,37 | 0,2277 | 0,81 | 3056 | 27 | 3087 | 10 | 3036 | 25 | 101 |
| 28 | 0,48 | 39 | 6 | 79 | 0,08 | 19,5569 | 0,90 | 0,6237 | 0,37 | 0,41 | 0,2274 | 0,82 | 3070 | 28 | 3125 | 12 | 3034 | 25 | 102 |
| 29 | 0,35 | 43 | 20 | 44 | 0,46 | 19,6499 | 0,85 | 0,6205 | 0,31 | 0,37 | 0,2297 | 0,79 | 3074 | 26 | 3112 | 10 | 3050 | 24 | 101 |
| 31 | 0,34 | 54 | 24 | 55 | 0,43 | 19,8880 | 0,89 | 0,6314 | 0,36 | 0,40 | 0,2285 | 0,82 | 3086 | 28 | 3155 | 11 | 3041 | 25 | 102 |
| 32 | 0,37 | 51 | 23 | 53 | 0,43 | 20,0896 | 0,91 | 0,6421 | 0,38 | 0,42 | 0,2269 | 0,83 | 3096 | 28 | 3197 | 12 | 3030 | 25 | 103 |
| 33 | 0,23 | 60 | 27 | 67 | 0,41 | 20,5149 | 0,92 | 0,6578 | 0,36 | 0,39 | 0,2262 | 0,84 | 3116 | 29 | 3259 | 12 | 3025 | 25 | 105 |
| 14.1 | 0,26 | 67 | 39 | 88 | 0,45 | 17,6455 | 0,88 | 0,5839 | 0,30 | 0,34 | 0,2192 | 0,83 | 2971 | 26 | 2964 | 9 | 2975 | 25 | 100 |
| 14.2 | 0,19 | 62 | 28 | 77 | 0,37 | 17,4244 | 0,85 | 0,5768 | 0,30 | 0,35 | 0,2191 | 0,80 | 2958 | 25 | 2936 | 9 | 2974 | 24 | 99 |
| 16.2 | 0,17 | 61 | 3 | 81 | 0,04 | 18,7635 | 0,89 | 0,6205 | 0,36 | 0,41 | 0,2193 | 0,81 | 3030 | 27 | 3112 | 11 | 2976 | 24 | 103 |
| 12.2 | 0,29 | 76 | 49 | 111 | 0,44 | 12,2472 | 1,08 | 0,4411 | 0,50 | 0,46 | 0,2014 | 0,96 | 2624 | 28 | 2356 | 12 | 2837 | 27 | 90 |
| 20.1 | 0,60 | 48 | 47 | 101 | 0,47 | 9,3247 | 1,17 | 0,3355 | 0,84 | 0,72 | 0,2016 | 0,81 | 2370 | 28 | 1865 | 16 | 2839 | 23 | 79 |
| 20.2 | 0,43 | 63 | 5 | 70 | 0,07 | 12,0437 | 1,08 | 0,4317 | 0,70 | 0,65 | 0,2023 | 0,82 | 2608 | 28 | 2314 | 16 | 2845 | 23 | 89 |

^a Fração de ²⁰⁶Pb não-radiogênico no spot de zircão analisado, onde $f_{206} = [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_c / [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_s$ (c=comum; s=amostra)

^b Razões Th/U e concentrações de Pb, Th e U (em ppm) calculadas em relação ao zircão de referência GJ-1

^c Corrigidas para o branco analítico (*background*), para o fracionamento interno de Pb/U e normalizadas ao zircão de referência GJ-1 (ID-TIMS-valores/valores medidos); $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}) * 137,88$

^d Rho é a correlação de erro definido como o quociente dos erros propagados das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$

^e Corrigida para o fracionamento de massa (mass-bias), por normalização ao zircão de referência GJ-1 e para Pb comum usando o modelo de evolução de Pb de Stacey & Kramers (1975)

^f Grau de concordância = $(\text{idade } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} / \text{idade } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) * 100$, de acordo com Horstwood *et al.* (2016).

* Zircão concordante; *Itálico* = zircão excluído do cálculo da idade.

Tabela 4 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra EDC-28B.

| Spots | ²⁰⁶ Pb _c ^a | | | | | Razões isotópicas ^c | | | | | | | Idades | | | | Concordância ^f % | | |
|-------|---|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|---|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------------------------------------|--------------------------------|----------|-----|
| | U | Pb | Th | Th/U ^b | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | Rho ^d | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^e | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | | |
| | (ppm) | (ppm) | (ppm) | (ppm) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | | 1σ (%) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | | 1σ (Abs) | |
| 6.1* | 0,25 | 96 | 32 | 117 | 0,27 | 17,0201 | 0,82 | 0,5763 | 0,43 | 0,53 | 0,2142 | 0,70 | 2936 | 24 | 2934 | 13 | 2938 | 20 | 100 |
| 6.2* | 0,38 | 60 | 15 | 68 | 0,23 | 16,9687 | 0,79 | 0,5760 | 0,40 | 0,50 | 0,2137 | 0,69 | 2933 | 23 | 2933 | 12 | 2933 | 20 | 100 |
| 15* | 0,07 | 121 | 28 | 133 | 0,21 | 16,9864 | 0,84 | 0,5759 | 0,41 | 0,48 | 0,2139 | 0,74 | 2934 | 25 | 2932 | 12 | 2935 | 22 | 100 |
| 27* | 0,31 | 96 | 21 | 107 | 0,20 | 17,0128 | 0,79 | 0,5767 | 0,43 | 0,54 | 0,2140 | 0,67 | 2936 | 23 | 2935 | 13 | 2936 | 20 | 100 |
| 28* | 0,14 | 45 | 13 | 61 | 0,21 | 17,0000 | 0,96 | 0,5764 | 0,46 | 0,48 | 0,2139 | 0,84 | 2935 | 28 | 2934 | 14 | 2935 | 25 | 100 |
| 3 | 0,50 | 53 | 20 | 56 | 0,36 | 15,0293 | 0,89 | 0,5106 | 0,56 | 0,62 | 0,2135 | 0,70 | 2817 | 25 | 2659 | 15 | 2932 | 20 | 94 |
| 8.1 | 0,14 | 64 | 21 | 83 | 0,25 | 16,0881 | 1,08 | 0,5463 | 0,64 | 0,60 | 0,2136 | 0,87 | 2882 | 31 | 2810 | 18 | 2933 | 26 | 97 |
| 17 | 0,12 | 169 | 35 | 339 | 0,10 | 16,4009 | 0,89 | 0,5551 | 0,52 | 0,58 | 0,2143 | 0,73 | 2900 | 26 | 2846 | 15 | 2938 | 21 | 98 |
| 19 | 0,26 | 70 | 24 | 84 | 0,29 | 15,2624 | 0,98 | 0,5181 | 0,47 | 0,48 | 0,2136 | 0,86 | 2832 | 28 | 2691 | 13 | 2933 | 25 | 95 |
| 29 | 0,26 | 62 | 67 | 88 | 0,77 | 15,4230 | 1,02 | 0,5241 | 0,48 | 0,47 | 0,2134 | 0,91 | 2842 | 29 | 2716 | 13 | 2932 | 27 | 96 |
| 8.2 | 0,50 | 83 | 23 | 124 | 0,18 | 12,9747 | 1,41 | 0,4732 | 0,99 | 0,70 | 0,1988 | 1,01 | 2678 | 38 | 2498 | 25 | 2817 | 28 | 93 |
| 14 | 0,71 | 107 | 52 | 186 | 0,28 | 13,1290 | 1,60 | 0,4797 | 1,26 | 0,78 | 0,1985 | 1,00 | 2689 | 43 | 2526 | 32 | 2814 | 28 | 94 |
| 21 | 0,37 | 88 | 58 | 150 | 0,39 | 11,2453 | 1,35 | 0,4104 | 0,93 | 0,69 | 0,1987 | 0,98 | 2544 | 34 | 2217 | 21 | 2816 | 27 | 87 |
| 1 | 0,14 | 166 | 62 | 211 | 0,29 | 14,2945 | 0,73 | 0,6004 | 0,26 | 0,35 | 0,1727 | 0,68 | 2769 | 20 | 3032 | 8 | 2584 | 18 | 109 |
| 2 | 0,13 | 149 | 16 | 222 | 0,07 | 11,9305 | 0,92 | 0,5154 | 0,50 | 0,55 | 0,1679 | 0,77 | 2599 | 24 | 2680 | 14 | 2537 | 19 | 103 |
| 4 | 0,61 | 114 | 135 | 202 | 0,67 | 8,0018 | 1,53 | 0,3492 | 1,20 | 0,78 | 0,1662 | 0,96 | 2231 | 34 | 1931 | 23 | 2519 | 24 | 87 |
| 5 | 0,66 | 78 | 64 | 179 | 0,36 | 3,6994 | 3,74 | 0,1404 | 3,61 | 0,97 | 0,1912 | 0,96 | 1571 | 59 | 847 | 31 | 2752 | 26 | 54 |
| 10 | 0,39 | 97 | 27 | 163 | 0,17 | 7,9631 | 1,32 | 0,3546 | 0,85 | 0,64 | 0,1629 | 1,01 | 2227 | 29 | 1957 | 17 | 2486 | 25 | 88 |
| 11 | 0,30 | 87 | 91 | 117 | 0,78 | 8,5299 | 1,36 | 0,3770 | 0,89 | 0,65 | 0,1641 | 1,03 | 2289 | 31 | 2062 | 18 | 2498 | 26 | 90 |
| 12 | 0,58 | 112 | 65 | 139 | 0,47 | 8,4245 | 1,13 | 0,3250 | 0,61 | 0,54 | 0,1880 | 0,95 | 2278 | 26 | 1814 | 11 | 2725 | 26 | 80 |
| 13 | 0,16 | 151 | 139 | 150 | 0,93 | 14,6237 | 1,02 | 0,5706 | 0,63 | 0,61 | 0,1859 | 0,81 | 2791 | 29 | 2910 | 18 | 2706 | 22 | 104 |
| 16 | 0,38 | 119 | 18 | 111 | 0,16 | 12,7007 | 1,22 | 0,4792 | 0,62 | 0,51 | 0,1922 | 1,05 | 2658 | 32 | 2524 | 16 | 2761 | 29 | 95 |
| 18 | 0,26 | 181 | 78 | 286 | 0,27 | 7,3962 | 1,78 | 0,3195 | 1,61 | 0,90 | 0,1679 | 0,77 | 2161 | 38 | 1787 | 29 | 2537 | 19 | 83 |
| 20 | 0,33 | 117 | 35 | 235 | 0,15 | 8,5146 | 1,39 | 0,3685 | 0,63 | 0,45 | 0,1676 | 1,24 | 2287 | 32 | 2022 | 13 | 2534 | 31 | 88 |
| 22 | 0,26 | 98 | 34 | 133 | 0,26 | 12,2527 | 1,36 | 0,4520 | 0,75 | 0,55 | 0,1966 | 1,14 | 2624 | 36 | 2404 | 18 | 2798 | 32 | 92 |
| 24.1 | 0,09 | 91 | 23 | 108 | 0,22 | 12,5375 | 0,90 | 0,5023 | 0,49 | 0,54 | 0,1810 | 0,76 | 2646 | 24 | 2624 | 13 | 2662 | 20 | 99 |
| 24.2 | 0,63 | 155 | 63 | 159 | 0,40 | 12,2450 | 1,15 | 0,4809 | 0,76 | 0,66 | 0,1847 | 0,86 | 2623 | 30 | 2531 | 19 | 2695 | 23 | 96 |
| 26 | 0,08 | 98 | 11 | 213 | 0,05 | 10,0690 | 1,29 | 0,4521 | 0,91 | 0,70 | 0,1615 | 0,92 | 2441 | 32 | 2404 | 22 | 2472 | 23 | 98 |
| 30 | 0,09 | 123 | 26 | 175 | 0,15 | 12,4376 | 0,96 | 0,5136 | 0,58 | 0,60 | 0,1756 | 0,77 | 2638 | 25 | 2672 | 15 | 2612 | 20 | 101 |
| 31 | 0,17 | 133 | 204 | 178 | 1,15 | 7,4177 | 2,21 | 0,4015 | 1,72 | 0,78 | 0,1340 | 1,39 | 2163 | 48 | 2176 | 37 | 2151 | 30 | 101 |
| 32 | 0,27 | 153 | 76 | 257 | 0,30 | 3,8031 | 2,11 | 0,3240 | 1,37 | 0,65 | 0,0851 | 1,60 | 1593 | 34 | 1809 | 25 | 1318 | 21 | 114 |
| 33 | 0,40 | 119 | 111 | 199 | 0,56 | 6,3970 | 2,25 | 0,3581 | 0,62 | 0,28 | 0,1296 | 2,16 | 2032 | 46 | 1973 | 12 | 2092 | 45 | 97 |
| 34 | 0,19 | 68 | 36 | 230 | 0,16 | 4,3580 | 2,07 | 0,2069 | 1,07 | 0,52 | 0,1528 | 1,77 | 1704 | 35 | 1212 | 13 | 2377 | 42 | 71 |

^a Fração de ²⁰⁶Pb não-radiogênico no spot de zircão analisado, onde $f_{206} = [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_c / [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_s$ (c=comum; s=amostra)

^b Razões Th/U e concentrações de Pb, Th e U (em ppm) calculadas em relação ao zircão de referência GJ-1

^c Corrigidas para o branco analítico (*backgrund*), para o fracionamento interno de Pb/U e normalizadas ao zircão de referência GJ-1 (ID-TIMS-valores/valores medidos); $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}) * 137,88$

^d Rho é a correlação de erro definido como o quociente dos erros propagados das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$

^e Corrigida para o fracionamento de massa (mass-bias), por normalização ao zircão de referência GJ-1 e para Pb comum usando o modelo de evolução de Pb de Stacey & Kramers (1975)

^f Grau de concordância = $(\text{idade } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} / \text{idade } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) * 100$, de acordo com Horstwood *et al.* (2016)

* Zircão concordante; *Itálico* = zircão excluído do cálculo da idade

Tabela 5 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-144.

| Spots | ²⁰⁶ Pb _c ^a | | | | | Razões isotópicas ^c | | | | | | | Idades | | | | Concordância ^f | | |
|-------|---|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|---|--------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------------------------------------|---------------------------|----|-----|
| | U | Pb | Th | Th/U ^b | | | | | | | | | | | | % | | | |
| | (ppm) | (ppm) | (ppm) | (ppm) | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ (%) | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ (%) | Rho ^d | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^e | 1σ (%) | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ (Abs) | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ (Abs) | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ (Abs) | % | |
| 8.1 | 0,30 | 49 | 30 | 51 | 0,59 | 18,3780 | 0,74 | 0,6132 | 0,46 | 0,61 | 0,2174 | 0,59 | 3010 | 22 | 3083 | 14 | 2961 | 17 | 102 |
| 26 | 0,23 | 63 | 35 | 45 | 0,79 | 18,4623 | 0,68 | 0,6095 | 0,30 | 0,45 | 0,2197 | 0,61 | 3014 | 21 | 3068 | 9 | 2978 | 18 | 102 |
| 28.1 | 0,71 | 50 | 22 | 38 | 0,59 | 15,9788 | 0,73 | 0,5119 | 0,40 | 0,55 | 0,2264 | 0,61 | 2876 | 21 | 2665 | 11 | 3027 | 19 | 93 |
| 31 | 0,23 | 67 | 48 | 45 | 1,07 | 18,6644 | 0,73 | 0,6288 | 0,38 | 0,52 | 0,2153 | 0,63 | 3025 | 22 | 3145 | 12 | 2946 | 18 | 104 |
| 32 | 0,25 | 48 | 28 | 32 | 0,88 | 18,0339 | 0,70 | 0,5972 | 0,38 | 0,54 | 0,2190 | 0,59 | 2992 | 21 | 3018 | 11 | 2974 | 18 | 101 |
| 3 | 0,26 | 47 | 25 | 48 | 0,54 | 14,8068 | 0,86 | 0,5045 | 0,57 | 0,67 | 0,2129 | 0,64 | 2803 | 24 | 2633 | 15 | 2928 | 19 | 94 |
| 6.1 | 0,33 | 45 | 33 | 48 | 0,68 | 16,6035 | 0,74 | 0,5670 | 0,45 | 0,61 | 0,2124 | 0,59 | 2912 | 22 | 2896 | 13 | 2924 | 17 | 99 |
| 7 | 0,18 | 87 | 77 | 87 | 0,88 | 18,5635 | 0,74 | 0,6411 | 0,33 | 0,44 | 0,2100 | 0,67 | 3019 | 22 | 3193 | 11 | 2906 | 19 | 106 |
| 9 | 0,12 | 70 | 73 | 78 | 0,93 | 18,2485 | 0,97 | 0,6316 | 0,43 | 0,44 | 0,2096 | 0,87 | 3003 | 29 | 3156 | 13 | 2902 | 25 | 105 |
| 10 | 0,36 | 39 | 24 | 44 | 0,55 | 15,2500 | 0,89 | 0,5176 | 0,55 | 0,62 | 0,2137 | 0,70 | 2831 | 25 | 2689 | 15 | 2934 | 20 | 95 |
| 15 | 0,25 | 47 | 38 | 51 | 0,75 | 16,8725 | 0,67 | 0,5813 | 0,33 | 0,49 | 0,2105 | 0,58 | 2928 | 20 | 2954 | 10 | 2909 | 17 | 101 |
| 18.1 | 0,62 | 34 | 16 | 28 | 0,59 | 15,1025 | 1,09 | 0,5093 | 0,92 | 0,84 | 0,2151 | 0,59 | 2822 | 31 | 2654 | 24 | 2944 | 17 | 94 |
| 22 | 0,31 | 36 | 21 | 39 | 0,54 | 16,9425 | 0,67 | 0,5864 | 0,29 | 0,44 | 0,2095 | 0,60 | 2932 | 20 | 2975 | 9 | 2902 | 17 | 101 |
| 27 | 0,18 | 75 | 46 | 60 | 0,77 | 17,6421 | 0,78 | 0,6081 | 0,37 | 0,47 | 0,2104 | 0,69 | 2970 | 23 | 3062 | 11 | 2909 | 20 | 103 |
| 30 | 0,35 | 97 | 54 | 60 | 0,92 | 19,4133 | 0,82 | 0,6748 | 0,33 | 0,40 | 0,2087 | 0,75 | 3063 | 25 | 3324 | 11 | 2895 | 22 | 109 |
| 13* | 0,31 | 59 | 56 | 60 | 0,94 | 16,1219 | 0,70 | 0,5638 | 0,32 | 0,46 | 0,2074 | 0,62 | 2884 | 20 | 2882 | 9 | 2885 | 18 | 100 |
| 1.1 | 0,79 | 773 | 403 | 2616 | 0,16 | 2,5167 | 1,22 | 0,1679 | 0,67 | 0,55 | 0,1087 | 1,02 | 1277 | 16 | 1000 | 7 | 1778 | 18 | 78 |
| 1.2 | 1,84 | 567 | 136 | 1004 | 0,14 | 2,3519 | 1,38 | 0,1709 | 0,70 | 0,51 | 0,0998 | 1,19 | 1228 | 17 | 1017 | 7 | 1620 | 19 | 83 |
| 4 | 1,48 | 112 | 66 | 123 | 0,54 | 6,3319 | 1,76 | 0,2430 | 1,50 | 0,85 | 0,1890 | 0,93 | 2023 | 36 | 1402 | 21 | 2734 | 25 | 69 |
| 5 | 1,86 | 569 | 47 | 1004 | 0,05 | 2,5494 | 1,62 | 0,1859 | 0,90 | 0,55 | 0,0994 | 1,35 | 1286 | 21 | 1099 | 10 | 1614 | 22 | 85 |
| 11 | 0,31 | 87 | 93 | 122 | 0,77 | 11,4756 | 1,04 | 0,4385 | 0,56 | 0,54 | 0,1898 | 0,87 | 2563 | 27 | 2344 | 13 | 2741 | 24 | 91 |
| 12 | 0,28 | 63 | 160 | 153 | 1,05 | 5,9022 | 0,96 | 0,2527 | 0,53 | 0,56 | 0,1694 | 0,80 | 1962 | 19 | 1452 | 8 | 2552 | 20 | 74 |
| 14 | 0,46 | 127 | 60 | 440 | 0,14 | 2,4365 | 1,22 | 0,1717 | 0,47 | 0,38 | 0,1029 | 1,13 | 1253 | 15 | 1022 | 5 | 1677 | 19 | 82 |
| 16.1 | 1,04 | 94 | 30 | 89 | 0,34 | 12,0795 | 0,74 | 0,4580 | 0,29 | 0,39 | 0,1913 | 0,68 | 2611 | 19 | 2431 | 7 | 2753 | 19 | 93 |
| 16.2 | 4,10 | 281 | 25 | 280 | 0,09 | 3,4435 | 1,17 | 0,1936 | 0,55 | 0,47 | 0,1290 | 1,03 | 1514 | 18 | 1141 | 6 | 2084 | 22 | 75 |
| 18.2 | 0,66 | 127 | 18 | 238 | 0,08 | 5,8624 | 0,92 | 0,2881 | 0,46 | 0,51 | 0,1476 | 0,79 | 1956 | 18 | 1632 | 8 | 2318 | 18 | 83 |
| 20.1 | 0,12 | 305 | 106 | 1116 | 0,10 | 3,3522 | 1,92 | 0,1964 | 1,36 | 0,71 | 0,1238 | 1,36 | 1493 | 29 | 1156 | 16 | 2011 | 27 | 77 |
| 20.2 | 1,48 | 268 | 25 | 539 | 0,05 | 2,5071 | 1,60 | 0,1749 | 0,75 | 0,47 | 0,1040 | 1,41 | 1274 | 20 | 1039 | 8 | 1696 | 24 | 82 |
| 24.1 | 0,48 | 99 | 206 | 167 | 1,25 | 6,6060 | 1,41 | 0,2626 | 0,88 | 0,63 | 0,1825 | 1,10 | 2060 | 29 | 1503 | 13 | 2676 | 29 | 73 |
| 24.2 | 0,53 | 127 | 159 | 130 | 1,23 | 5,8028 | 1,74 | 0,2257 | 1,34 | 0,77 | 0,1865 | 1,10 | 1947 | 34 | 1312 | 18 | 2711 | 30 | 67 |
| 28.2 | 1,12 | 201 | 125 | 200 | 0,63 | 5,9842 | 1,06 | 0,2656 | 0,58 | 0,55 | 0,1634 | 0,89 | 1974 | 21 | 1518 | 9 | 2491 | 22 | 77 |

^a Fração de ²⁰⁶Pb não-radiogênico no spot de zircão analisado, onde $f_{206} = [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_c / [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_s$ (c=comum; s=amostra)

^b Razões Th/U e concentrações de Pb, Th e U (em ppm) calculadas em relação ao zircão de referência GJ-1

^c Corrigidas para o branco analítico (*background*), para o fracionamento interno de Pb/U e normalizadas ao zircão de referência GJ-1 (ID-TIMS-valores/valores medidos); $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}) * 137,88$

^d Rho é a correlação de erro definido como o quociente dos erros propagados das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$

^e Corrigida para o fracionamento de massa (mass-bias), por normalização ao zircão de referência GJ-1 e para Pb comum usando o modelo de evolução de Pb de Stacey & Kramers (1975)

^f Grau de concordância = $(\text{idade } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} / \text{idade } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) * 100$, de acordo com Horstwood *et al.* (2016)

* Zircão concordante; *Itálico* = zircão excluído do cálculo da idade

Tabela 6 – Dados isotópicos U-Pb para cristais de zircão da amostra MED-95A.

| Spots | ²⁰⁶ Pb _c ^a | | | | | Razões isotópicas ^c | | | | | | | Idades | | | | | Concordância ^f | |
|-------|---|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|---|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------------------------------------|------|---------------------------|-----|
| | U | Pb | Th | Th/U ^b | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | Rho ^d | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^e | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | % | |
| | (ppm) | (ppm) | (ppm) | (ppm) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (%) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | 1σ (Abs) | | | | |
| 7* | 0,19 | 25 | 12 | 30 | 0,41 | 17,3947 | 0,69 | 0,5794 | 0,39 | 0,57 | 0,2177 | 0,56 | 2956,9 | 20,3 | 2946,4 | 11,5 | 2964 | 17 | 100 |
| 12.1* | 0,32 | 14 | 6 | 13 | 0,51 | 17,3109 | 0,77 | 0,5805 | 0,34 | 0,44 | 0,2163 | 0,69 | 2952,2 | 22,8 | 2950,8 | 10,0 | 2953 | 21 | 100 |
| 23* | 0,08 | 38 | 29 | 43 | 0,70 | 17,3130 | 0,71 | 0,5805 | 0,31 | 0,44 | 0,2163 | 0,64 | 2952,3 | 20,9 | 2950,8 | 9,2 | 2953 | 19 | 100 |
| 24* | 0,10 | 53 | 29 | 56 | 0,53 | 17,4079 | 0,90 | 0,5819 | 0,36 | 0,40 | 0,2170 | 0,82 | 2957,6 | 26,5 | 2956,4 | 10,7 | 2958 | 24 | 100 |
| 26* | 0,10 | 53 | 29 | 56 | 0,53 | 17,4079 | 0,90 | 0,5819 | 0,36 | 0,40 | 0,2170 | 0,82 | 2957,6 | 26,5 | 2956,4 | 10,7 | 2958 | 24 | 100 |
| 30* | 0,16 | 32 | 19 | 44 | 0,43 | 17,3218 | 0,70 | 0,5808 | 0,33 | 0,46 | 0,2163 | 0,62 | 2952,8 | 20,8 | 2952,1 | 9,6 | 2953 | 18 | 100 |
| 14.1 | 0,37 | 29 | 17 | 33 | 0,52 | 16,4797 | 0,84 | 0,5454 | 0,47 | 0,56 | 0,2192 | 0,69 | 2905,0 | 24,3 | 2805,9 | 13,1 | 2974 | 21 | 97 |
| 10 | 0,51 | 32 | 13 | 28 | 0,44 | 18,5892 | 0,84 | 0,6374 | 0,58 | 0,69 | 0,2115 | 0,60 | 3020,7 | 25,3 | 3178,8 | 18,5 | 2917 | 18 | 105 |
| 18 | 0,71 | 28 | 14 | 22 | 0,65 | 19,2658 | 0,90 | 0,6581 | 0,52 | 0,58 | 0,2123 | 0,73 | 3055,2 | 27,4 | 3259,9 | 16,8 | 2923 | 21 | 107 |
| 19 | 0,24 | 41 | 11 | 58 | 0,20 | 15,8305 | 0,75 | 0,5444 | 0,27 | 0,36 | 0,2109 | 0,70 | 2866,6 | 21,6 | 2801,9 | 7,7 | 2912 | 20 | 98 |
| 5 | 0,13 | 30 | 18 | 35 | 0,53 | 17,2070 | 0,76 | 0,5960 | 0,40 | 0,53 | 0,2094 | 0,65 | 2946,4 | 22,5 | 3013,5 | 12,1 | 2901 | 19 | 102 |
| 6 | 0,11 | 32 | 17 | 39 | 0,44 | 18,1180 | 0,76 | 0,6291 | 0,40 | 0,53 | 0,2089 | 0,65 | 2996,0 | 22,9 | 3145,9 | 12,7 | 2897 | 19 | 105 |
| 9 | 0,17 | 40 | 22 | 47 | 0,47 | 16,6592 | 0,71 | 0,5831 | 0,37 | 0,52 | 0,2072 | 0,60 | 2915,4 | 20,6 | 2961,4 | 10,9 | 2884 | 17 | 102 |
| 11 | 0,19 | 31 | 20 | 39 | 0,52 | 15,9512 | 0,69 | 0,5556 | 0,27 | 0,39 | 0,2082 | 0,63 | 2873,9 | 19,7 | 2848,4 | 7,7 | 2892 | 18 | 99 |
| 14.2 | 0,19 | 64 | 43 | 85 | 0,51 | 16,2018 | 0,89 | 0,5872 | 0,40 | 0,45 | 0,2072 | 0,79 | 2888,8 | 25,6 | 2896,4 | 11,6 | 2883 | 23 | 100 |
| 16.1 | 0,32 | 26 | 15 | 27 | 0,54 | 17,6281 | 0,83 | 0,6117 | 0,46 | 0,55 | 0,2090 | 0,69 | 2969,7 | 24,5 | 3076,9 | 14,0 | 2898 | 20 | 104 |
| 16.2 | 0,11 | 51 | 19 | 57 | 0,34 | 18,2621 | 0,92 | 0,6257 | 0,32 | 0,34 | 0,2084 | 0,87 | 3003,6 | 27,8 | 3172,0 | 10,1 | 2893 | 25 | 106 |
| 33 | 0,09 | 38 | 14 | 50 | 0,29 | 15,0998 | 0,77 | 0,5245 | 0,33 | 0,42 | 0,2088 | 0,70 | 2821,6 | 21,8 | 2718,1 | 8,9 | 2896 | 20 | 96 |
| 1 | 0,19 | 65 | 24 | 286 | 0,08 | 7,5480 | 0,95 | 0,2937 | 0,65 | 0,69 | 0,1864 | 0,69 | 2178,7 | 20,6 | 1660,1 | 10,9 | 2710 | 19 | 76 |
| 2 | 0,31 | 41 | 75 | 74 | 1,03 | 8,7234 | 0,81 | 0,3297 | 0,46 | 0,57 | 0,1919 | 0,67 | 2309,5 | 18,6 | 1837,0 | 8,4 | 2758 | 18 | 80 |
| 3 | 0,26 | 184 | 161 | 345 | 0,47 | 8,3836 | 1,27 | 0,4448 | 0,56 | 0,44 | 0,1367 | 1,13 | 2273,4 | 28,8 | 2372,0 | 13,3 | 2186 | 25 | 104 |
| 4 | 1,11 | 58 | 30 | 68 | 0,45 | 10,9619 | 0,80 | 0,3799 | 0,43 | 0,54 | 0,2093 | 0,67 | 2519,9 | 20,1 | 2075,9 | 8,9 | 2900 | 19 | 82 |
| 8 | 0,05 | 112 | 20 | 138 | 0,14 | 16,2369 | 0,83 | 0,6860 | 0,31 | 0,37 | 0,1717 | 0,77 | 2890,9 | 23,9 | 3367,2 | 10,3 | 2574 | 20 | 116 |
| 12.2 | 0,24 | 85 | 34 | 214 | 0,16 | 7,8442 | 0,99 | 0,3336 | 0,40 | 0,40 | 0,1705 | 0,90 | 2213,3 | 21,8 | 1856,0 | 7,3 | 2563 | 23 | 84 |
| 20 | 6,57 | 278 | 16 | 45 | 0,36 | 20,0684 | 0,87 | 0,6869 | 0,47 | 0,54 | 0,2119 | 0,74 | 3094,7 | 27,0 | 3370,9 | 15,8 | 2920 | 22 | 109 |
| 21 | 0,28 | 33 | 22 | 46 | 0,47 | 11,0832 | 1,32 | 0,3819 | 1,05 | 0,79 | 0,2105 | 0,80 | 2530,1 | 33,3 | 2085,3 | 21,8 | 2909 | 23 | 82 |
| 22 | 0,10 | 73 | 17 | 111 | 0,16 | 13,9203 | 1,00 | 0,5542 | 0,33 | 0,33 | 0,1822 | 0,95 | 2744,3 | 27,5 | 2842,4 | 9,3 | 2673 | 25 | 104 |
| 25 | 2,49 | 97 | 14 | 34 | 0,40 | 18,3940 | 0,72 | 0,6123 | 0,32 | 0,45 | 0,2179 | 0,64 | 3010,6 | 21,6 | 3079,3 | 9,9 | 2965 | 19 | 102 |
| 27 | 0,05 | 75 | 44 | 82 | 0,54 | 17,5771 | 0,90 | 0,6993 | 0,29 | 0,32 | 0,1823 | 0,85 | 2966,9 | 26,7 | 3418,0 | 9,8 | 2674 | 23 | 115 |
| 28 | 0,14 | 80 | 27 | 366 | 0,07 | 2,6585 | 1,44 | 0,1690 | 0,75 | 0,52 | 0,1141 | 1,23 | 1317,0 | 19,0 | 1006,5 | 7,5 | 1866 | 23 | 76 |
| 29 | 0,20 | 111 | 16 | 135 | 0,12 | 14,6986 | 0,92 | 0,5941 | 0,47 | 0,51 | 0,1794 | 0,79 | 2795,9 | 25,7 | 3005,9 | 14,1 | 2648 | 21 | 108 |
| 31 | 0,29 | 49 | 21 | 60 | 0,35 | 14,0243 | 0,78 | 0,4813 | 0,32 | 0,40 | 0,2113 | 0,72 | 2751,3 | 21,5 | 2532,9 | 8,0 | 2916 | 21 | 92 |
| 32 | 0,18 | 85 | 42 | 147 | 0,29 | 10,3929 | 1,00 | 0,4475 | 0,58 | 0,58 | 0,1684 | 0,81 | 2470,4 | 24,7 | 2384,2 | 13,8 | 2542 | 21 | 97 |

^a Fração de ²⁰⁶Pb não-radiogênico no spot de zircão analisado, onde $f_{206} = \frac{[^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_c}{[^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_s}$ (c=comum; s=amostra)

^b Razões Th/U e concentrações de Pb, Th e U (em ppm) calculadas em relação ao zircão de referência GJ-1

^c Corrigidas para o branco analítico (*background*), para o fracionamento interno de Pb/U e normalizadas ao zircão de referência GJ-1 (ID-TIMS-valores/valores medidos); $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}) * 137,88$

^d Rho é a correlação de erro definido como o quociente dos erros propagados das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$

^e Corrigida para o fracionamento de massa (mass-bias), por normalização ao zircão de referência GJ-1 e para Pb comum usando o modelo de evolução de Pb de Stacey & Kramers (1975)

^f Grau de concordância = $(\text{idade } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} / \text{idade } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) * 100$, de acordo com Horstwood *et al.* (2016)

* Zircão concordante; *Itálico* = zircão excluído do cálculo da idade

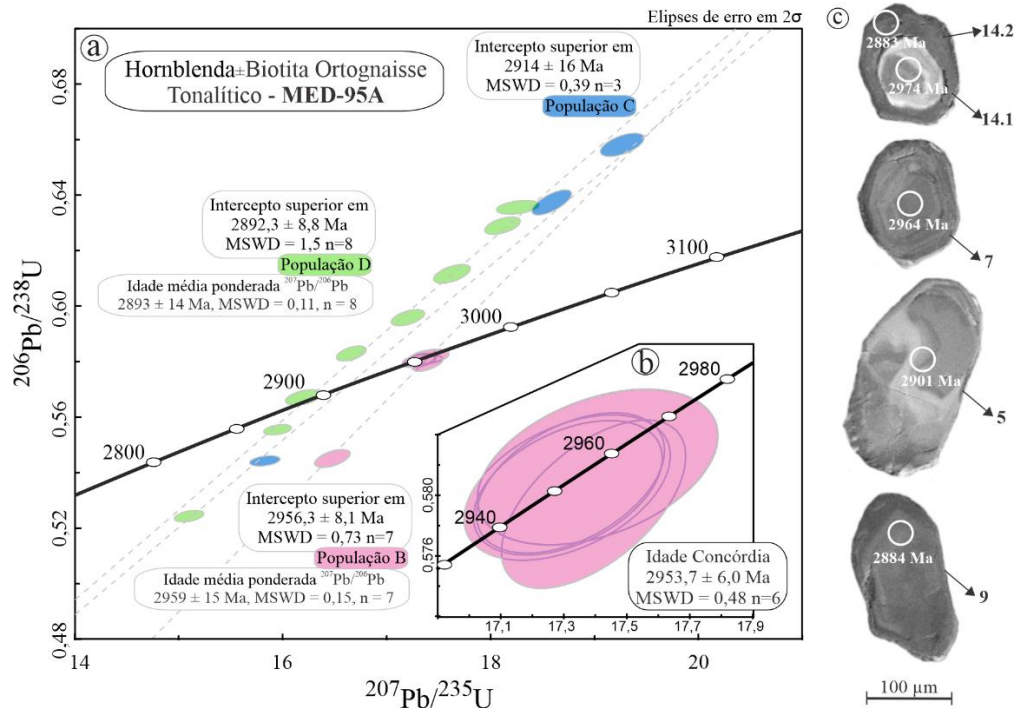


Figura 11 – Geocronologia U-Pb LA-Q-ICP-MS em cristais de zircão dos ortogneisses de Água Azul do Norte: (a) Idades de intercepto superior e idades médias ponderadas obtidas para a amostra MED-95A, com destaque para as populações B (em rosa), C (em azul) e D (em verde); (b) Idade concórdia de $2953,7 \pm 6,0$ Ma; (c) Imagens de catodoluminescência dos cristais de zircão com os *spots* identificados e suas respectivas idades obtidas.

2.7 DISCUSSÕES

2.7.1 Natureza geoquímica e afinidades petrológicas

Os ortogneisses estudados são caracterizados por apresentarem composições tonalíticas e subordinadamente quartzo dioríticas, presença de biotita (>11%) e hornblenda (>3%) como fases ferromagnesianas principais (HB_{Tnl} e HB_{QzD}), intensidade de deformação moderada a forte e bandamento composicional evidente, onde a textura magmática é raramente preservada. Ortogneisses com a presença expressiva de epídoto e clinopiroxênio são mais restritos (EB_{QzD} e CH_{Tnl}). De forma geral, essas rochas apresentaram composição magnésiana (#Mg= 0,44-0,64), assinatura cálcico-alcalina, conteúdos significativos de elementos compatíveis (e.g. Fe, Mg, Ni, Cr) e moderados de incompatíveis (e.g. K, Rb e Ba), o que mostra um comportamento transicional entre a composição de granitoides enriquecidos em Mg e as típicas associações tonalíticas-trondhjemiticas. Rochas com essas características foram observados de forma restrita no Cráton Dharwar (Moyen *et al.* 2003, Jayananda *et al.* 2006), na Província Wyoming (Frost *et al.* 2006) e nos crátons Pilbara e Yilgarn, sendo chamados de “TTGs transicionais” por Champion & Smithies (2001, 2003) e com idade de cristalização de 3,3 Ga. Na Província

Carajás também se observam ocorrências análogas na localidade de Vila Jussara, próximo à cidade de Canaã dos Carajás (Ortognaisse São Carlos; 2934 ± 9 Ma, Pb-Pb em zircão por evaporação, Silva *et al.* 2014).

Considerando os diagramas de classificação e série magmática, os ortognaises apresentaram relativa afinidade geoquímica com os típicos TTGs do Terreno Sapucaia. Todavia, foram notadas algumas peculiaridades nas rochas estudadas: padrão deformacional mais intenso, presença frequente de hornblenda, maior proporção de minerais máficos ($M' \sim 30\%$), empobrecimento em SiO_2 ($<67,3\%$) e enriquecimento em CaO, elementos ferromagnesianos ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}$) $> 5,65\%$) e elementos-traço compatíveis como o Ni, Cr e V, assim como anomalias negativas de Nb, P e Ti mais discretas e menor fracionamento de ETRP, resultando em razões $(\text{La}/\text{Yb})_N$ inferiores às observadas em TTGs (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Santos *et al.* 2018, Silva *et al.* 2010). Já a Suíte Sanukitoide Água Limpa apresenta mineralogia muito similar, porém ligeiramente enriquecida em álcali-feldspato e empobrecida em plagioclásio, além de assinatura cálcico-alcalina de alto-K e composição fortemente granodiorítica (Gabriel *et al.* 2010, Sousa *et al.* 2010). Em relação ao nosso objeto de estudo, esses granitoides mostraram, ainda, conteúdos levemente maiores de Fe_2O_3 , MgO, LILEs (K, Ba, Rb, Sr) e ETRL, o que resultou em um fracionamento acentuado e altas razões $(\text{La}/\text{Yb})_N$. Por outro lado, os padrões de multielementos foram bastante similares, especialmente as discretas anomalias de Nb, P e Ti (Figura 5-7, Gabriel *et al.* 2010).

O Ortognaisse São Carlos (Silva *et al.* 2014) é igualmente marcado pela ocorrência expressiva de anfibólio (1,1–11,4%) e biotita (4–16,2%), composição essencialmente magnesianas e assinatura cálcico-alcalina de médio-K, bem como teores moderados de SiO_2 e Al_2O_3 , altos conteúdos de Fe_2O_3 e CaO e padrão de ETR subhorizontalizado. Enquanto isso, os teores de MgO, Ba, Rb, Sr, Ni e #Mg destas rochas são mais baixos quando comparados aos dos ortognaises, o que reflete um caráter mais evoluído do Ortognaisse São Carlos.

As Figura 12a e 12b mostram os diagramas TiO_2 vs. K/Na e Zr vs. Ni contendo campos de classificação de granitos arqueanos construídos a partir da compilação de dados de diferentes regiões cratônicas (Moyen *et al.* 2003). Na Figura 12a nota-se que tanto as variedades tonalíticas quanto as quartzo dioríticas apresentam maior afinidade com os granitoides tipo TTG, ou, ainda, também sugerem um comportamento transicional se aproximando do campo dos “TTGs enriquecidos”, excetuando-se a amostra MED-144 de afinidade SNK. Em relação ao comportamento do Zr, é possível notar que os valores não são discriminantes, visto que os intervalos para os dois grupos são reduzidos e correspondentes.

No entanto, examinando os teores de Ni, percebemos que os quartzo dioritos plotam no campo referente ao “TTG+TTG enriquecido” e os ortognaisses com hornblenda demonstram assinatura sanukitoide (Figura 12b).

A Tabela 7 confronta os principais parâmetros petrográficos e geoquímicos utilizados na literatura para diferenciar TTGs e SNKs arqueanos (Halla *et al.* 2009, Heillimo *et al.* 2010, Laurent *et al.* 2014, Moyén 2011, 2022, Moyén *et al.* 2003, Stern *et al.* 1989). Parâmetros como SiO₂, A/CNK, Sr/Y, La/Yb_N e Eu/Eu* não fornecem diagnósticos precisos. Além disso, alguns intervalos de valores se mostraram superpostos para os dois tipos de rochas dificultando a separação, sendo eles: #Mg (45–60), Ba (500–1000 ppm), Sr (400–1200 ppm), Ba+Sr (1200 –1400 ppm), Ni (20–30 ppm) e Cr (20–50 ppm). Apesar disto e considerando tais parâmetros, buscou-se analisar as afinidades petrológicas das amostras estudadas. Os dados sumarizados na Tabela 8 evidenciam que os quartzodioritos mostraram forte assinatura TTG e suas quantidades de Ni (21 e 23ppm) e Cr (37ppm) são acentuadamente mais baixas que as demais análises (Ni > 55ppm, Cr > 140ppm). Por outro lado, a MED-144 mostrou assinatura exclusivamente SNK, reproduzindo o cenário apresentado em alguns diagramas de classificação.

Entende-se que a formação de suítes TTG no Mesoarqueano esteve relacionada à fusão parcial de crosta máfica (basalto hidratado) em zona de subducção, em elevado gradiente geotérmico e em diferentes condições de profundidade (Almeida *et al.* 2010, Halla *et al.* 2009, Laurent *et al.* 2014, Moyén 2011, Moyén *et al.* 2003). Nesse cenário, magmas e fluidos gerados podem ascender através da cunha do manto, metassomatizá-la e assimilar elementos da sua composição, o que resulta na produção de TTGs “contaminados” e sanukitoides (Champion & Sheraton 1977, Heillimo *et al.* 2010, Moyén *et al.* 2003). Martin & Moyén (2002) destacaram o aumento progressivo nos teores de MgO, Ni, Cr e Sr em TTGs paleo a neoarqueanos como prova da interação desses magmas com o manto peridotítico. Diante disto, admite-se que os ortognaisses que apresentam assinatura de TTGs transicionais ou enriquecidos podem ter se originado a partir de uma mudança progressiva entre essas séries, ou seja, entre magmas “puros” (TTGs) e híbridos (sanukitoides), enfatizando uma ligação genética entre os dois tipos de granitoides. Essa ambiguidade composicional pode ser observada em grande parte das amostras no diagrama ternário de Laurent *et al.* (2014, Figura 12c), com exceção das amostras MEP-53B e MED-144. Da mesma forma, na Figura 12d tais rochas incidiram no limite entre os campos das rochas com fontes máficas de baixo-K e de alto-K, o que reforça a ideia da contribuição de componentes crustais (*slab*) e mantélicos na composição de seu magma gerador.

Tabela 7 – Aspectos petrográficos e geoquímicos adotados para caracterizar rochas de afinidade TTG e SNK a partir de diferentes autores.

| Parâmetros / Autores | Afinidade TTG | | | | Afinidade SNK | | | |
|--|--|--|--|--------------------|--|---|--|--|
| | Moyen <i>et al.</i> (2003), Moyen (2011, 2020) | Laurent <i>et al.</i> (2014) | Halla <i>et al.</i> (2009) Baixo-ETRP Alto-ETRP | | Moyen <i>et al.</i> (2003) Moyen (2011, 2020) | Laurent <i>et al.</i> (2014) (<i>Latu sensu</i>) | Stern <i>et al.</i> (1989) | Heilimo <i>et al.</i> (2010) |
| <i>Aspectos petrográficos</i> | | | | | | | | |
| Tipos de rochas | Tonalito, trondhjemito | Tonalito, trondhjemito, granodiorito | | | Monzodiorito, granodiorito | Monzodiorito, granodiorito | Monzo-granodiorito, traquiandesito | Tonalito, diorito, granodiorito |
| Minerais ferromagnesianos | Bt, Hbl | Bt (\pm Hbl) | | | Bt, Hbl (\pm Cpx) | Bt, Hbl (\pm Cpx, Opx) | Bt, Hbl, Cpx (\pm Opx) | Bt, Hbl (\pm Cpx, Opx) |
| Minerais acessórios | Mt, Ilm, Ap, Zr, All, Ttn, Ep | Mt, Ap, Zr, All, Ep | | | Mt, Ilm, Ap, Zr, All, Ttn | Mt, Ilm, Ap, Zr, All, Ttn | Mt, Ilm, Ap, Ttn, Ep | Ap, Zr, All, Ttn, Op, Ep |
| Outras características | frequentemente metamorfizados | Deformação variável | | | Agregados máficos | Px reliquiar em Hbl | | <i>Enclaves</i> abundantes |
| <i>Elementos maiores</i> | | | | | | | | |
| SiO ₂ | > 64%, comumente 70% | 65–75% | 68–76% | 60–74% | 50–75% | 45–70% | 55–60% | 55–70% |
| A/CNK | 0,9–1,3 | 1–1,1 | 1,6 ^a | 1,5 ^a | 0,8–1,2 | 0,7–1,0 | | |
| K ₂ O/Na ₂ O | < 0,5 | < 0,5 | 0,41 ^a | 0,46 ^a | 0,5–0,7 | > 0,5 | | |
| Fe ₂ O ₃ +MgO+MnO+TiO ₂ | < 5% | < 5% | 3,6% ^a | 7,17% ^a | > 5% | 5–25 | | |
| #Mg | 0,35–0,60 | | 0,41% ^a | 0,46% ^a | 0,45–0,75 | | > 60% | 0,45–0,65 |
| <i>Elementos-traço e ETR</i> | | | | | | | | |
| Ba | 100–1000 | 532 ^a | 663 ^a | 485 ^a | 500–2000 | > 1000 | 600–1800 | |
| Sr | 200–1200 | 638 ^a | 427 ^a | 314 ^a | 400–1000 | > 400 | 600–1800 | |
| Ba + Sr | | | até 1200 | até 1200 | | | | > 1400 |
| Ni | 5–30 | 5 ^a | < 29 | 26,6 ^a | 20–60 | 15–200 | > 100 | até 207 |
| Cr | 5–50 | 13 ^a | < 30 | 43,6 ^a | 20–150 | 20–500 | > 100 | até 407 |
| (La/Yb) _N ou (Ce/Yb) _N | 10–40 | 31,5 ^a | 55,2 ^a | 10,5 ^a | 10–50 | 10–75, comumente 25 | 7–46 | |
| Eu/Eu* | 0,76–0,71 ^b | 1,10 ^a | | | 1–1,31 ^b | 0,5–1,0 | ausente | negativa discreta |
| <i>Observações</i> | Consideram grupos de baixa (\downarrow Sr/Y), média e alta pressão (\uparrow Sr/Y) | Consideram membros de baixa (\uparrow ETRP \uparrow Y \downarrow Sr) e alta pressão (\downarrow ETRP \downarrow Y \uparrow Sr) | | | \uparrow ETRL \downarrow ETRP; fortemente fracionado | | \uparrow ETRL \downarrow ETRP; fortemente fracionado | \uparrow ETRL \downarrow ETRP; fortemente fracionado |

^aValor apresentado na forma de média das amostras.

^bValor apresentado na forma de amostra representativa.

Tabela 8 – Afinidades petrológicas das amostras estudadas em comparação aos parâmetros adotados por autores de petrologia para diferenciar TTGs e SNKs.

| Afinidades petrológicas | | | TTG | | Transicional TTG-SNK | | | | | | SNK |
|--|-----------------------------|--|----------|---------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | TTG | SNK | EBQzD | HBQzD | CHTnl | HBTnl | HBTnl | HBTnl | HBTnl | HBTnl | HBTnl |
| | | | MED-120A | MEP-53B | EDC-28B | MED-95A | MEP-23B | MEP-12B | MEP-12A | MEP-16 | MED-144 |
| Parâmetros | | | | | | | | | | | |
| <i>Elementos maiores</i> | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 65–75% ^{a,b} | 50–75 ^a | 63,21 | 60,55 | 60,62 | 63,80 | 64,36 | 65,04 | 66,78 | 67,28 | 65,37 |
| A/CNK | 0,9–1,3 ^{a,b} | 0,8–1,2 ^a | 0,99 | 0,88 | 0,76 | 0,97 | 0,95 | 0,96 | 1,01 | 0,98 | 0,98 |
| K ₂ O/Na ₂ O | < 0,5 ^{a,b} | > 0,5 ^{a,b} | 0,43 | 0,23 | 0,35 | 0,51 | 0,39 | 0,42 | 0,35 | 0,45 | 0,79 |
| Fe ₂ O ₃ +MgO+MnO+TiO ₂ | < 5% ^{a,b} | > 5% ^{a,b} | 7,88 | 9,14 | 12,90 | 9,12 | 8,56 | 8,10 | 5,65 | 6,82 | 8,65 |
| #Mg | 0,35–0,60 ^a | >0,45 ^{a,c} >0,6 ^d | 0,44 | 0,44 | 0,64 | 0,57 | 0,61 | 0,62 | 0,62 | 0,60 | 0,61 |
| <i>Elementos traço e ETR</i> | | | | | | | | | | | |
| Ba | 100–1000 ^a | 500–2000 ^{a,d} | 325 | 427 | 301 | 334 | 808 | 687 | 559 | 760 | 1160 |
| Sr | 200–1200 ^a | >400 ^a >600 ^d | 504 | 556 | 472 | 468 | 794 | 795 | 784 | 773 | 547 |
| Ba+Sr | até 1200 ^e | > 1400 ^e | 829 | 983 | 773 | 801 | 1600 | 1482 | 1343 | 1497 | 1707 |
| Ni | 5–30 ^a | >20 ^{a,b} >100 ^d | 21 | 23 | 33 | 64 | 63 | 62 | 55 | 57 | 95 |
| Cr | 5–50 ^a | >20 ^{a,b} >100 ^d | 37 | 37 | 318 | 207 | 222 | 215 | 140 | 178 | 320 |
| Sr/Y | | | 38,8 | 30,6 | 25,5 | 25 | 132 | 124 | 145 | 125 | 41 |
| (La/Yb) _N ou (Ce/Yb) _N | 1–40 ^a | 1–50 ^a | 18,1 | 10,2 | 6,9 | 14,4 | 17,1 | 17,8 | 10,7 | 28,4 | 14,8 |
| Eu/Eu* | discreta | discreta | 0,62 | 0,76 | 0,43 | 0,36 | 1,01 | 0,96 | 1,58 | 0,96 | 0,66 |
| Observações | Baixa, média e alta pressão | Média e alta pressão | Baixa–P | Baixa–P | Baixa–P | Baixa–P | Média–P | Média–P | Média–P | Média–P | Baixa–P |

^aMoyen *et al.* (2003), Moyen (2011, 2020).

^bLaurent *et al.* (2014).

^cHeilimo *et al.* (2014).

^dStern *et al.* (1989).

^eHalla *et al.* (2009).

Por outro lado, o comportamento do Sr, do Y e dos ETRs registraram a presença de dois grupos distintos. As amostras EDC-28B, MED-120A, MEP-53B, MED-95A e MED-144 exibiram baixo fracionamento de ETRP ($\Sigma = 10,2$ a $13,8$), moderada anomalia negativa de Eu ($0,36-0,76$) e baixa razão Sr/Y (25 a 41). Elas incidem no campo de baixa razão La/Yb, o que sugere que foram gerados em condições de baixa pressão (<1 Gpa) e fora da zona de estabilidade da granada (Almeida *et al.* 2011, Moyen 2011, Watkins *et al.* 2007). Já as amostras MEP-12A, 12B, 16 e 23B apresentaram moderado fracionamento de ETRP ($\Sigma = 4,3$ a $5,6$), discreta anomalia negativa de Eu ($> 0,96$), altas razões Sr/Y (124 a 145) e plotaram no campo de média razão La/Yb, indicando pressões intermediárias ($1-1,5$ Gpa) ainda dentro do campo de estabilidade da granada (Figura 12e). No diagrama triangular (Ba+Sr)/100 vs. Er vs. 1/Er de Heilimo *et al.* (2010, Figura 12f), o primeiro grupo incide no campo dos TTGs com alto-ETRP (fonte não controlada pela granada), exceto a amostra MED-144 que plota no campo dos sanukitoides (manto enriquecido como fonte). O segundo grupo incidiu no limite entre os sanukitoides e TTGs com baixo-ETRP, sugerindo que a origem envolveu a fusão parcial de fontes mantélicas e crustais (*slab*) em profundidades relativamente baixas.

2.7.2 Considerações sobre os aspectos deformacionais e condições de migmatização

O comportamento do quartzo atestou a influência de mecanismos de recristalização dinâmica de temperaturas intermediárias à altas – rotação de subgrão (SGR) $> 400^{\circ}\text{C}$ e migração de limite de grão (GBM) $> 500^{\circ}\text{C}$, respectivamente; Passchier & Trouw (2005), Vernon (2004) –, sendo condizentes com os regimes 2 e 3 de Hirth & Tullis (1992). Também foram observados de forma pontual cristais poligonais característicos de recristalização estática pós-deformacional (GBAR, Passchier & Trouw 2005). Já em relação aos feldspatos não foram visualizadas texturas manto-núcleo em torno dos porfiroclastos. Apesar disso, a presença de aglomerados félsicos de granulação fina e muito fina pode sugerir que o plagioclásio também foi submetido aos processos de intensa recristalização.

A análise microestrutural de minerais máficos é mais complexa, no entanto a ocorrência de biotita lenticular (*mica fish*) e hornblenda levemente alongada segundo o plano de foliação podem auxiliar a determinação das condições de temperatura que afetaram os ortognaisses estudados, visto que a alteração desses cristais também marca a transição de regime rúptil para deformação cristal-plástica (biotita $> 250^{\circ}\text{C}$, hornblenda $> 650-700^{\circ}\text{C}$, Passchier & Trouw 2005). Aliados a paragênese mineral (Pl+Qz+Bt±Hbl±Ep) e ao bandamento composicional, estes fatores apontam para um protólito de composição granítica metamorfizado em condições de fácies anfíbolito (Best 2003).

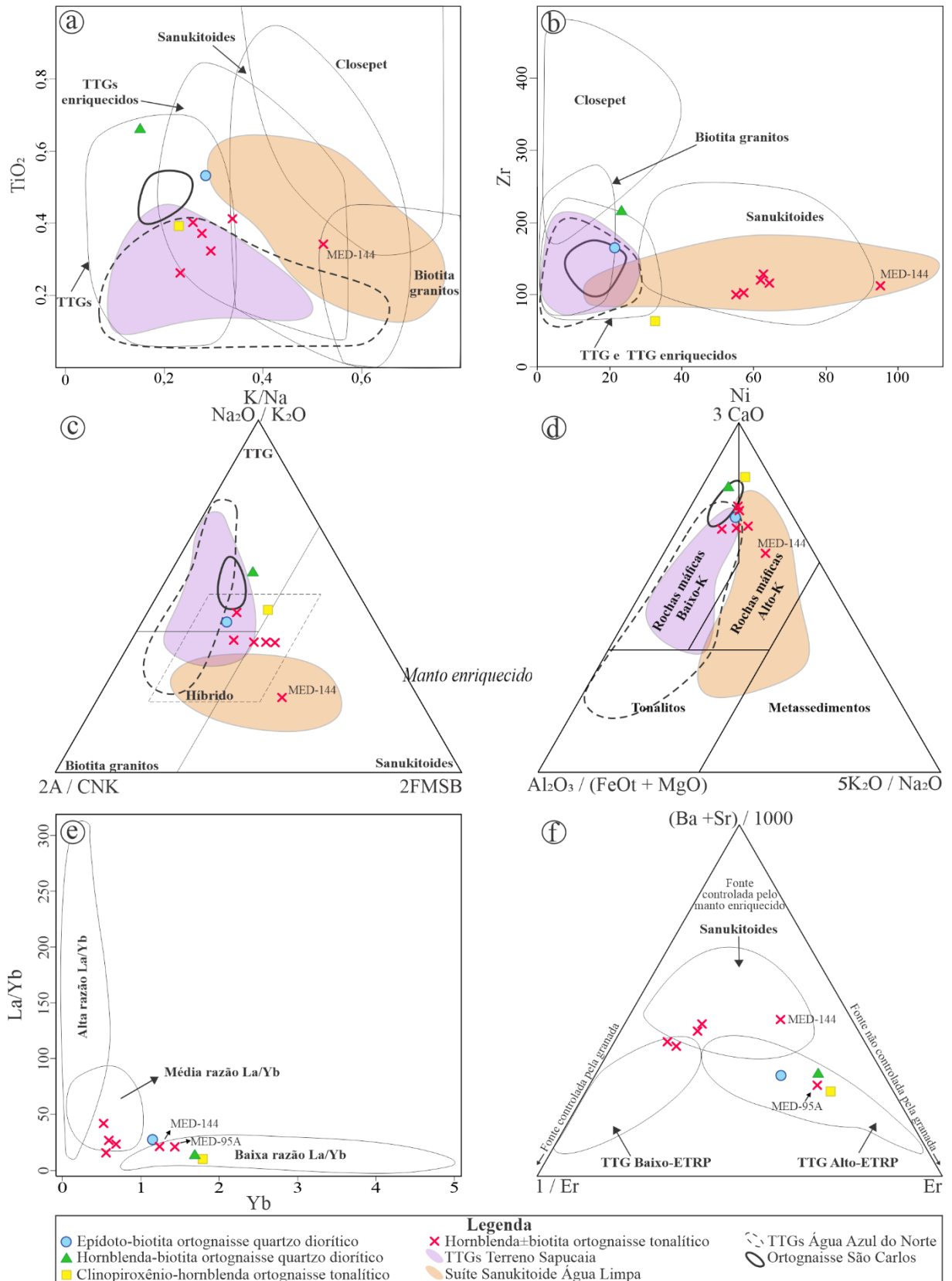


Figura 12 – Aspectos petrogenéticos dos ortogneisses de Água Azul do Norte: (a) Diagramas TiO_2 vs. K/Na e (b) Zr vs. Ni (Moyen *et al.* 2003); (c) Diagrama de classificação Na_2O/K_2O vs. $2^*A/CNK$ ($Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$) vs. $2^*(FeO_t+MgO)*(Sr+Ba)\%$ (Laurent *et al.* 2014); (d) Diagrama ternário de fontes $Al_2O_3/(FeO_t+MgO)$ vs. $3CaO$ vs. $5(K_2O/Na_2O)$ de Laurent *et al.* (2014); (e) Diagrama La/Yb vs. Yb (Almeida *et al.* 2011); (f) Diagrama triangular $(Ba+Sr)/1000$ vs. Er vs. $1/Er$ (Heilimo *et al.* 2010).

Migmatitos compreendem rochas que foram submetidas à fusão parcial ou que marcam o fim do metamorfismo progressivo e início da anatexia. Essas rochas podem ser texturalmente divididas em: a) Leucossoma: porção de tonalidade mais clara e composição predominantemente quartzo-feldspática; e b) Melanossoma: finos agregados máficos de biotita ± anfibólio, coloração mais escura e encontrados bordejando o leucossoma. Geneticamente, o *paleossoma* corresponde ao protólito metamórfico não alterado ou com pouca modificação (estruturas gnáissicas preservadas), enquanto que o leucossoma e o melanossoma representam o *neossoma*, que pode incluir minerais residuais da fonte e material cristalizado (Figura 13a, Mehnert 1968, Nédélec & Bouchez 2015).

Considerando a fração de *melt* produzido, a classificação de primeira ordem de Sawyer (2008) divide os migmatitos em metatexitos, quando apresentam um arcabouço heterogêneo gerado em condições de moderado grau de fusão parcial (pouco neossoma), e em diatexitos quando exibem estrutura mais homogênea, alta taxa de fusão e produção de leucossoma (Nédélec & Bouchez 2015, Sawyer 1988, 2008). Uma classificação de segunda ordem também leva em conta as texturas observadas e o estágio de deformação da rocha durante a fusão parcial, ou seja, se a deformação seria pré ou sin-anatética, sendo elas: estromática/bandada (Figura 13b), *schlieren*, *schollen*, em rede, dilatacional e nebulítica (Sawyer 2008). No caso dos ortognaisses, a morfologia observada foi a metatexítica estromática, a qual corresponde ao intervalo de baixa quantidade de *melt* e anatexia fortemente contemporânea à deformação (Figura 13c-e). Além disso, diatexitos tendem a apresentar coloração rosa marcada pelo enriquecimento em k-feldspato, cristais idioblásticos/euédricos e texturas ígneas (Sawyer 1998), o que não é o caso das rochas estudadas. A paragênese do neossoma é formada principalmente por quartzo e plagioclásio com raras ocorrências de minerais ferromagnesianos associados (Bt±Hbl?), enquanto o resíduo se mostra quase exaurido destes minerais (composição predominantemente máfica).

A natureza da mineralogia presente na fase fundida pode ajudar a determinar o pico de metamorfismo/anatexia que afetaram uma determinada rocha. Na presença de fluidos, protólitos crustais comuns como granitos e ortognaisses iniciam a fusão em temperaturas entre 650 a 700°C, enquanto que em condições subsaturadas ou anidras (porções mais profundas da crosta) são necessárias temperaturas superiores à 800 °C (Best 2003, Nédélec & Bouchez 2015). Segundo Brown (2013), leucossomas ausentes de minerais anidros (como a granada) e portadores de minerais hidratados (micas e hornblenda) sugerem a participação de fluidos no processo de fusão parcial (~700°C, Figura 13e). Caso as temperaturas atingissem a fácies granulito, observaríamos o desaparecimento da biotita (estabilidade até 850-900°C,

Nédélec & Bouchez 2015) e do bandamento composicional característico dos gnaisses.

A migração e entrada desses líquidos no sistema pode ocorrer em algumas condições específicas, como por exemplo a partir de estruturas tectônicas de grande escala relacionadas a eventos de colisão continental (zonas de cisalhamento) ou como produto de exsolução durante a ascensão de magmas (Brown 2013, Nédélec & Bouchez 2015). Esse cenário é condizente com as propostas de colisão continental e metamorfismo regional apontados na Província Carajás, sendo caracterizados pela colocação de grandes volumes de magmas derivados do manto e da crosta (Marangoanha *et al.* 2020, Silva *et al.* 2022).

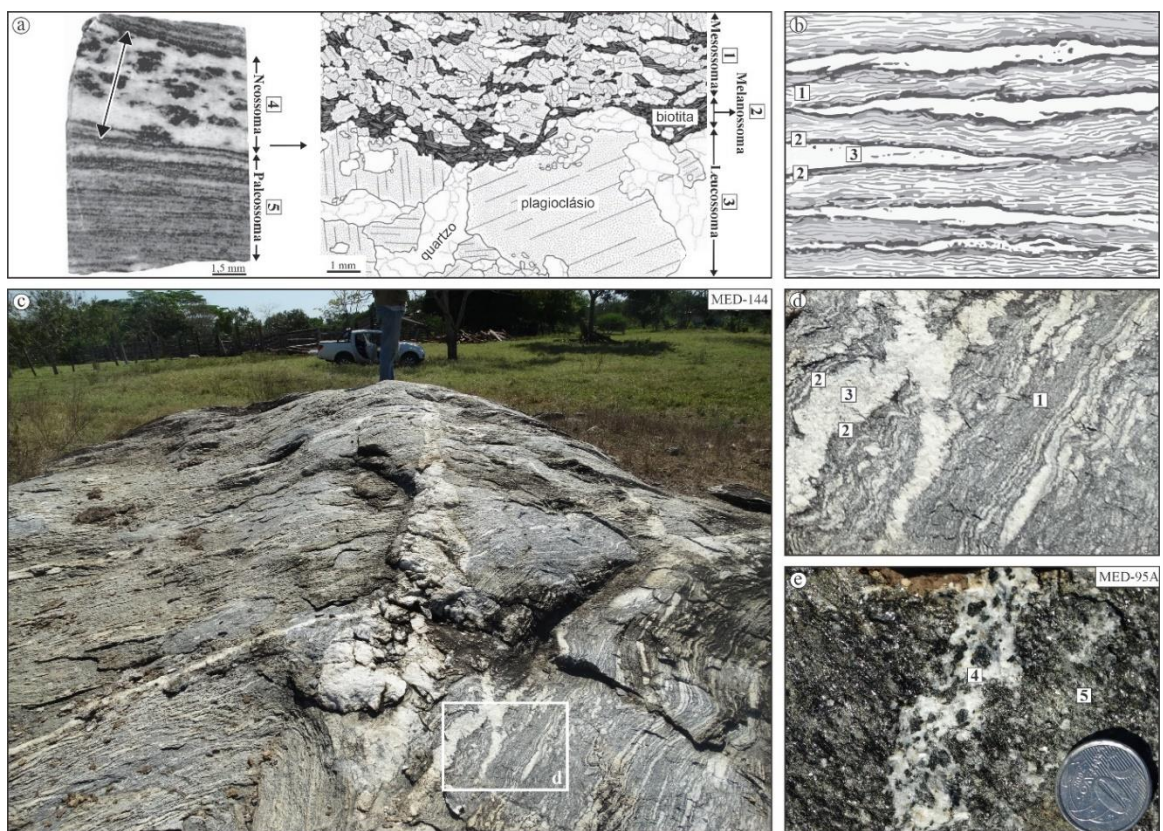


Figura 13 – Aspectos de mesoescala dos migmatitos: (a) Modelo de classificação petrográfica e genética (Mehner 1968, Nédélec & Bouchez 2015); (b) Representação da textura estromática relacionada à classificação de segunda ordem de Sawyer (2008); (c) e (d) Metatexito estromático (MED-144) marcado por leucossomas concordantes (paralelos ao bandamento composicional) e discordantes formados a partir de redes de fluxo; (e) neossoma contendo mineralogia característica de fusão com influência de fluidos (Bt-Hbl).

A segregação do *melt* acompanha a migmatização progressiva (metatexito → diatexito) e pode ser um processo em múltiplos estágios e com diferentes aportes residuais. Uma vez que a rocha esteja sendo acometida por deformação, esses líquidos podem se acumular formando leucossomas subparalelos e orientados perpendicularmente ao eixo de compressão máxima (textura estromática discutida anteriormente, Brown 2013, Sawyer 2008). Conforme o aumento do volume, esses líquidos podem migrar para as bandas de cisalhamento e gerar *redes de fluxo* identificadas pela continuidade petrográfica entre

leucossomas concordantes e discordantes (Figura 13c). Existem duas possibilidades para a disposição desses líquidos: acúmulo dentro da fonte, seja em camadas ou agregados irregulares; ou extração e ascensão para porções mais rasas gerando raízes de plútons graníticos. Além disso, para que ocorra a migração é necessária uma concentração mínima de aproximadamente 7 a 10% de magma (Brown 2013). Nossos ortognaisses exibiram moderada intensidade de segregação, já que podemos definir com relativa clareza o neossoma e paleossoma. No entanto, entende-se que a extração não foi tão eficiente na medida em que o magma produzido se encontra retido na fonte.

2.7.3 Interpretação dos dados geocronológicos

Os dados geocronológicos adquiridos pelo método U-Pb (LA-Q-ICP-MS) em zircão *in situ* apontam a presença de cinco populações de zircão para as rochas estudadas:

- i) População A: observada na amostra MED-120A (EBQzD), com idade concordante de $3057,9 \pm 7,6$ Ma (n=4) e idade média ponderada de $3045,8 \pm 9,8$ Ma (n=26).
- ii) População B: na amostra EDC-28B (CHTnl) com idade concordante de $2934,2 \pm 7,4$ Ma (n=5) e idade média ponderada de 2935 ± 14 Ma (n=10); na amostra MED-95a (HBTnl) com idade concordante de $2953,7 \pm 6,0$ Ma e idade média ponderada de 2959 ± 15 Ma (n=7);
- iii) População C: na amostra MED-144 (HBTnl); com idade média ponderada de 2917 ± 12 Ma (n=10).
- iv) População D: na amostra MED-95A (HBTnl), com idade média ponderada de 2893 ± 14 Ma (n=8); no cristal concordante da amostra MED-144 (HBTnl), com idade 2885 ± 18 Ma (n=1).
- v) População E: na amostra EDC-28B (CHTnl), com idade de intercepto superior de 2815 ± 48 Ma (n=3).

A presença de muitos cristais de zircão com feições ígneas preservadas na *população A* (como o formato euédrico, terminações piramidais e zoneamento de crescimento preservados) marcam a idade de cristalização do protólito dessas rochas em $\sim 3,06$ Ga. Esses aspectos também são observados na catodoluminescência do HBQzD (s/ datação), com a qual exibiu forte afinidade geoquímica (Tabela 8, Figura 12), sugerindo que a idade de 3,06 Ga também pode ser inferida para esta variedade. As demais amostras analisadas exibiram cristais de zircão com morfologias mais complexas, podendo ocorrer formas euédricas alongadas à anédricas sub-arredondadas, com padrão de fraturamento caótico e zoneamento de crescimento ausente, discreto ou desordenado (ex: cristal 5 da MED-95A, Figura 11c),

sendo feições típicas de cristais afetados por metamorfismo regional e/ou migmatização (Corfu *et al.* 2003). Alguns desses cristais apresentaram núcleos preservados mais claros (em catodoluminescência) e geraram idades entre 2,95–2,93 Ga (*população B*), representando as idades de cristalização dos protólitos das amostras EDC-28B (CHTnl) e MED-95A (HBTnl).

Dados recentes publicados por Nascimento *et al.* (2023) estimaram as seguintes idades de cristalização para os protólitos dos ortognaisses de afinidade TTG do Terreno Sapucaia: 2936±5 Ma para o Complexo Água Azul, 2944±4 Ma para o Ortognaisse Caracol e 2948±9 Ma para o Ortognaisse Colorado. Em geral, tais idades são concordantes com as idades observadas na *população B*, indicando que o protólito desses ortognaisses é contemporâneo à colocação de magmas TTG no Terreno Sapucaia, assim como ao Ortognaisse São Carlos (2,93 Ga, Silva *et al.* 2014). Por outro lado, os resultados observados para os quartzo dioritos sugerem que estas variedades representam fragmentos de uma crosta mais antiga e, portanto, podem ser consideradas como xenólitos (conforme observações de campo – ver Figura 2).

A amostra MED-144 exibiu um comportamento singular, onde núcleos de 5 cristais forneceram idade de intercepto superior em 2978,4±7,5 Ma (*população B*) e outros 10 *spots* em 2916,4±6,2 Ma (*população C*). Assumindo a cristalização em 2,98 Ga, podemos considerar que o seu protólito seria ligeiramente mais antigo que o magmatismo TTG deste terreno (~30Ma). No entanto, não podemos descartar a hipótese de se tratar de um magma intrusivo no embasamento, com idade de cristalização de 2,92 Ga e xenocristais assimilados de 2,98 Ga. Na área de Ourilândia do Norte, localizada à oeste da área de estudo, foram descritos sanukitoides com a idade de cristalização de 2,92 Ga (Granodiorito Arraias, Silva *et al.* 2022), o que favorece a proposta de sanukitoides gerados em períodos mais antigos do que 2,87 Ga como se costuma observar. Neste cenário, estaríamos diante do primeiro gnaiss migmatizado de assinatura SNK descrito na Província Carajás.

Já a idade 2,89 Ga (*população D*), reconhecida tanto em cristais individuais quanto em sobrecrecimentos de núcleos (ex: spot 14.2, MED-95A), pode indicar o período em que ocorreram os eventos de metamorfismo e migmatização que afetaram tais granitoides. Por fim, a *população E* (2,81 Ga, n=3) provavelmente representa cristais com perda de Pb, uma vez que a deformação em altas temperaturas tem potencial de interferir no sistema geocronológico, projetar um rejuvenescimento da idade e afetar a precisão dos resultados.

2.8 CONCLUSÕES

Os tonalitos e quartzo dioritos de Água Azul do Norte registram fortes evidências de

metamorfismo progressivo de fácies anfíbolito e de migmatização. São metatexitos com morfologia estromática, constituídos por paleossomas ortognáissicos de composições tonalítica e quartzodiorítica e por leucossomas quartzo-feldspáticos (\pm minerais máficos) envolvidos por uma fina camada de melanossoma. Este tipo de estrutura e mineralogia indicam fusão parcial na presença de fluidos, produção reduzida de *melt* e deformação sinanatótica. Estima-se que esses eventos ocorreram em 2,89 Ga (*população D*), sendo compatíveis com o pico de metamorfismo regional e colisão continental de curta duração apontados na região de Carajás.

Neste cenário, as análises geoquímicas obtidas refletem a composição dos protólitos destas rochas. As amostras MED-120A (EBQzD) e MEP-53B (HBQzD) exibem altos conteúdos de TiO_2 e Al_2O_3 , empobrecimento em MgO, Ba, Ni e Cr, e natureza petrológica similar à de TTGs, além de cristais de zircão euédricos e com zoneamento preservado. Apesar das diferenças mineralógicas, esses aspectos sugerem uma cogeneticidade entre seus magmas. A idade concordante estabelecida como cristalização do protólito (3,06 Ga) mostra claramente que se tratam de xenólitos, sendo aproximadamente 120 Ma mais antigos que a crosta TTG dominante. Isto implicaria que a área de Água Azul do Norte também registra um cenário de subducção-colisão mesoarqueana, conforme é indicado para as regiões adjacentes na Província Carajás.

A MED-144 (HBTnl) mostrou afinidade cálcico-alcálica de alto-K, composição granodiorítica, maiores teores de K_2O , Ba, Ni, Cr e menores de Na_2O e CaO. Tais parâmetros indicam forte afinidade SNK, excetuando pelos seus baixos fracionamento de ETRP e razão $(\text{La}/\text{Yb})_N$. Para esta amostra foram identificadas duas populações de cristais de zircão, uma de 2,98 Ga ($n=5$) e a outra em 2,92 Ga ($n=10$). A sua afinidade com magmas sanukitoides da Província Carajás corrobora para a hipótese de que a idade mais antiga represente xenocristais herdados do embasamento TTG, e que aquela mais jovem corresponda a idade de cristalização do protólito deste ortognáisse.

As demais amostras analisadas exibiram assinatura híbrida entre TTG (cálcico e cálcico-alcálica, baixa razão $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, composição tonalítica e razões La_N/Yb_N indicativas de baixa pressão) e magmas SNK (caráter fortemente magnesiano e altos conteúdos de Ni, Cr e #Mg). Estes dados refletem a contribuição tanto de fontes crustais (*slab*) quanto mantélicas enriquecidas na origem destas rochas (Heilimo *et al.* 2010, Laurent *et al.* 2014, Martin & Moyen 2002, Moyen *et al.* 2003), podendo ser correlacionadas com aqueles “TTGs enriquecidos” do Cráton Dharwar e ao Ortognáisse São Carlos. As idades obtidas entre 2,95–2,93 Ga indicam que a colocação destes magmas foi simultânea à ascensão dos TTGs.

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 leucogranodioritegranite suites: evidence from the Rio Maria. *Lithos*, **120**:235-257.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**:201-221.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A, Estado do Pará, escala 1:250.000*. Brasília-DF, CPRM – Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás, 135p.
- 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**(4):453–460.
- Barker F. & Arth J.G. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemitic-basalt suites. *Geology*, **4**(10):596-600.
- Best M.G. 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. Freeman, New York, 758 p.
- Boynton W.V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, p. 63-114.
- Brown M. 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America*, **125**:1079-1113.
- Champion D.C. & Sheraton J.W. 1997. Geochemistry and Nd isotope systematics of Archean granites of the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. *Precambrian Research*, **83**:109-132.
- Champion D.C. & Smithies R.H. 2001. Archean granites of the Yilgarn and Pilbara cratons, Western Australia. *Geoscience Australia*, **134**:134-136.
- Companhia Vale do Rio Doce - DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia. Província Mineral de Carajás. Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. Belém. *Anexo dos Anais*. p. 11-59.
- Corfu F., Hancher J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in*

Mineralogy and Geochemistry, **53**(1):469-500.

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 P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – implicações para a evolução arqueana da Província Carajás – Pará. *In: SBG, 13° Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1997. Archean granitoids as magmas sources for the anorogenic Paleoproterozoic Jamon and Musa granites (Eastern Amazonian Cráton): new constraints based on geochemical and Sm-Nd isotope data. *In: 1° The South American Symposium on Isotope Geology. Extended abstracts*, Campos do Jordão, CPGEO-IG-USP. p. 96-97.

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

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

Delinarado M.A.S. 2018. *Evolução tectono-metamórfica do embasamento mesoarqueano do Domínio Carajás, Província Carajás*. PhD Theses, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 164 p.

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

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

Felix W.Q., Oliveira D.C., Silva L.R., Silva F.F. 2020. Charnockites from Carajás Province, SE Amazonian Craton (Brazil): petrogenetic constraints and intensive crystallization parameters. *Journal of South American Earth Science*, **101**:102598.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, **42**(11):2033-2048.

Frost C.D., Frost B.R., Kirkwood R., Chamberlain K.R. 2006. The tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) to granodiorite-granite (GG) transition in the late Archean plutonic rocks of the central Wyoming Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **43**(10):1419-1444.

Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2013. Petrologia magnética dos granodioritos Água Azul e Água Limpa, porção sul do Domínio Carajás – Pará. *Geologia USP: Série Científica*, **13**(4):89-110.

Gabriel E.O. 2012. *Geologia, Geoquímica e Petrologia Magnética dos granitoides arqueanos da porção nordeste de Água Azul do Norte (PA) – Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 107 p.

Gabriel E.O. 2014. *Petrogênese e Evolução Estrutural dos granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte – PA, Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 77 p.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Galarza Toro 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: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

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.

Galarza M.A., Oliveira D.C., Rodrigues E.A., Santos A.N., Martins A.C., Marangoanha B. 2017. Neoproterozoic granitoids (2.73–2.74 Ga) intrusive and associated with the Pium Diopside-Norite, Canaã dos Carajás, Carajás Province (PA). *In: Lima A.M & Gorayeb P. (eds.). Contribuições à geologia da Amazônia, SBG-Núcleo Norte, v. 10, p. 225-246.*

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, 46° Congresso Brasileiro de Geologia, Santos-SP. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

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

Heilimo E., Halla J., Hölttä P. 2010. Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos*, **115**(1-4):27-39.

Hirata W.K., Rigon J.C., Kadkaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 1° Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Hirth G. & Tullis J. 1992. Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, **14**(2):145-159.

Horstwood M.S.A., Košler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton C., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B. 2016. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-Th-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **40**(3):311-332.

Jayananda M., Chardon D., Peucat J.J., Capdevila R. 2006. 2.61 Ga potassic granites and crustal reworking in the western Dharwar craton, southern India: tectonic, geochronologic and geochemical constrains. *Precambrian Research*, **150**(1-2):1-26.

Laurent O., Martin H., Moyen J.F., Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, **205**: 208-235.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Woodley A.R. 2002. A classification of igneous rocks and glossary of terms. In: Le Maitre R.W. (ed.). *Recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks*. 2^a ed. Cambridge, 236 p.

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**(3):635-659.

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

Leite-Santos P.J. 2016. *Petrologia e geocronologia das associações leucograníticas arqueanas da região de Água Azul do Norte (PA): implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 83 p.

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.

Marangoanha B. 2018. *Petrologia e Evolução Crustal da Porção Central do Domínio Canaã dos Carajás, Província Carajás*. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, xxx, 193 p.

Marangoanha B. & Oliveira D.C. 2014. Diabásios e anfíbolitos da área de Nova Canadá:

natureza e implicações tectônicas para a Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **9**(3):565-596.

Marangoanha B., Oliveira D.C., Dall'Agnol R. 2019a. The Archean granulite-enderbite complex of the northern Carajás province, Amazonian craton (Brazil): origin and implications for crustal growth and cratonization. *Lithos*, **350–351**:105275.

Marangoanha B., Oliveira D.C., Oliveira V.E.S., Galarza M.A., Lamarão C.N. 2019b. Neoproterozoic A-type Granitoids from Carajás Province (Brazil): new insights from geochemistry, geochronology and microstructural analysis. *Precambrian Research*, **324**:86-108.

Martin H. & Moyen J.F. 2002. Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the Earth. *Geology*, **30**:319-322.

Mehnert K.R. 1968. *Migmatites and the origin of granitic rocks*. Developments in Petrology. Amsterdam, Elsevier. 393 p.

McDonough W.F. & Sun S.S. 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**(3-4):223-253.

Moyen J.F. 2011. The composite Archean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archean crustal growth. *Lithos*, **123**:21-36.

Moyen J.F., 2020. Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin, *In*: Dey S. & Moyen J.F. (eds). *Archean Granitoids of India: Windows into Early Earth Tectonics*. Geological Society, London, 489 p. (Special Publications).

Moyen J.F., Martin H., Jayananda M., Auvray B. 2003. Late Archean granites: a typology based on the Dharwar Craton (Índia). *Precambrian Research*, **127**(1-3):103-123.

Nascimento A.C., Oliveira D.C., Gabriel E.O., Silva L.R., Dall'Agnol R., Leite-Santos P.J., Santos J.O.S., Machado J.R.M., Galarza M.A., Guimarães F.V. 2023. Suíte gnáissico-migmatítica Caracol: novos dados isotópicos (U-Pb-Hf-Nd-Sr) e implicações para o significado tectono-metamórfico do embasamento Mesoarqueano do Terreno Sapucaia, Província Carajás. *In*: SBG, 17º Simpósio de Geologia da Amazônia, Santarém, *Anais[...]*, p. 200-204.

Nédélec A. & Bouchez J.L. 2015. *Granites: petrology, structure, geological setting, and metallogeny*. New York, Oxford University Press, 352 p.

O'Connor J.T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Papers*, **525**(B):79-84.

Oliveira D.C., Santos P.J.L., Gabriel E.O., Rodrigues D.S., Faresin A.C., Silva M.L.T., Sousa S.D., Santos R.V., Silva A.C., Souza M.C., Santos R.D., Macambira M.J.B. 2010. Aspectos

geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás – Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Resumos[...]*, 1 CD-ROM.

Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B. 2022. Geologia Regional do Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico: Proposta litoestratigráfica e implicações para a compartimentação tectônica. *In: II Congresso Amazônico de Mineração, Metalurgia e Materiais – COAMA. Marabá (PA), Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B., Gabriel E.O., Leite-Santos P.J., Machado J.R.M., Felix W.Q., Silva-Silva L.C., Santos R.F.S. 2023. Revisão litoestratigráfica com implicações para compartimentação tectônica da Província Mineral de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. *In: SBG, 17º Simpósio de Geologia da Amazônia. Santarém (PA), Anais[...]*, p. 434-441.

Passchier C.W. & Trow R.A.J. (eds.). 2005. *Microtectonics*. Germany, Springer. 366p.

Peccerillo A. & Taylor S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamoru area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **58**:63-81.

Rodrigues D.S., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará - Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **9**(3):597-633.

Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. *In: Bizzi L. A. et al. (ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil*, p. 169-226.

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

Santos M.S., Oliveira D.C., Gabriel E.O. 2018. Granitoides TTG de Água Azul do Norte (PA): implicações tectônicas para a Província Carajás. *Geologia USP, Série científica*, **18**:119-148.

Santos P.J.L. & Oliveira D.C. 2012. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. *In: SBG, 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos-SP. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Sawyer E.W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites. *Journal of Petrology*, **39**(6):1147-1157.

Sawyer E.W. 2008. *Atlas of Migmatites*. 1st ed. Canada, Canadian Science Publishing. 371 p.

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**(1):13-46.

Silva A.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2010. Individualização e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu, região de Vila Jussara, Município de Água Azul do Norte-PA, Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Silva, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G. 1974. Geologia. *In: DNPM. Projeto Radam. Folha SB. 22 Araguaia e parte da folha SC. 22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. RJ, il. p. I/3- I/143.*

Silva L.R. 2022. *Petrogênese e história tectônica dos granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) – Província Carajás*. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. xv, 302p.

Silva L.R., Oliveira D.C., Galarza M.A. 2019. Granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA): geocronologia e implicações tectônicas para a Província Carajás. *In: SBG, 16° Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Silva M.A.D, Monteiro L.V.S., Santos T.J.S., Moreto C.P.N., Sousa S.D., Faustinoni J.M., Melo G.H.C., Xavier R.P., Toledo B.A.M. 2021. Mesoarchean migmatites of the Carajás province: from intra-arc melting to collision. *Lithos*, **388-389**:106078.

Sousa M.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., Galarza Toro M.A. 2010. Geologia, Petrografia e Geocronologia do granito de alto K da região de Velha Canadá, município de Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Sousa S.D., Monteiro L.V.S., Oliveira D.C., Delinardo M.A.S., Moreto C.P.N., Juliani C. 2013. O greenstone belt Sapucaia na região de Água Azul do Norte, Província Mineral de Carajás: Contexto geológico e caracterização petrográfica. *In: SBG, 47° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

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

Souza D.B. 2016. *Geologia, geoquímica e mineralogia dos corpos anfíbolíticos de Água Azul do Norte: condições de metamorfismo e implicações tectônicas para o Domínio Sapucaia - Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, xi, 61p.

Souza D.B., Oliveira D.C., Monteiro L.V.S., Gabriel E.O., Marangoanha B. 2017. Colocação, metamorfismo e natureza dos anfibolitos de Água Azul do Norte, Província Carajás. *Geologia USP, Série científica*, **17**:98-123.

Souza Z.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archean evolution of the Rio Maria granite – greenstone terranes and the Carajás Block. *In: SBG, Symposium Archean Terranes of the South American Platform, Brasília. Extended Abstracts*. p. 31-32.

Souza M.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., Galarza M.A. 2010. Geologia, Petrografia e Geocronologia do granito de alto K da região de Velha Canadá, município de Água Azul do 83 Norte – Província Mineral de Carajás. *In: 45º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Stacey J.S. & Kramers J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, **26**(2):207-221.

Stern R.A., Hanson G.N., Shirey S.B. 1989. Petrogenesis of mantle-derived, LILE- enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in Southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **26**:1688–1712.

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

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

Tavares F.M., Trouw R.A.J., Silva C.M.G., Justo A.P., Oliveira J.K.M. 2018. The multistage tectonic evolution of the northeastern carajás province, Amazonian Craton, Brazil: revealing complex structural patterns. *J. South Am. Earth Sci.* **88**:238–252.

Teixeira M.F.B., Dall'Agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área a norte de Sapucaia, Província Carajás, Pará: implicações petrogenéticas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **8**(3):291-323.

Teixeira M.F.B., Dall'Agnol R., Santos J.O.S., Sousa L.A.M., Lafon J.M. 2017. Geochemistry, geochronology and Nd isotopes of the Gogó da Onça Granite: A new Paleoproterozoic A-type granite of Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **80**:47–65.

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. Unidades litoestratigráficas. *In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). Geologia e recursos*

minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM. 3, p. 113-215.

Vernon R.H. 2004. *A practical guide to rock microstructures*. Cambridge, Cambridge University Press, 594 p.

Watkins J.M., Clemens J.D., Treloar P.J. 2007. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalitos at 0.6-1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **154**:91-110.

CAPÍTULO 3 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de Água Azul do Norte hospeda rochas de grande importância para a interpretação da história geológica do Terreno Sapucaia e do Domínio Carajás. Até o momento, dados geocronológicos U-Pb (evaporação de Pb, SHRIMP e LA-ICP-MS) e dados isotópicos de Hf em zircão e Nd e Sr em rocha total obtidos a partir de amostras do embasamento TTG já indicavam registros de fusão parcial de crosta oceânica entre 2,95-2,92 Ga nesse terreno (Almeida *et al.* 2011, Feio *et al.* 2013, Leite *et al.* 2004, Nascimento *et al.* 2023, Oliveira *et al.* 2022, 2023, Silva *et al.* 2010, Silva *et al.* 2022).

Análises geoquímicas em rocha total mostraram que os ortognaisses estudados não possuem comportamento homogêneo. As amostras MED-120A (EBQzD) e MEP-53B (HBQzD) diferem das demais por serem moderadamente magnesianas, de assinatura cálcico-alcalina de médio-K, pobres em K₂O, MgO, Ba, Ni e Cr e relativamente enriquecidas em Na₂O, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃ e Zr. Apesar do empobrecimento em SiO₂ e de certa incompatibilidade geoquímica com os TTGs do Terreno Sapucaia (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Santos *et al.* 2018, Silva *et al.* 2010), estes parâmetros revelaram uma forte afinidade com a composição dos TTGs de diferentes terrenos Arqueanos (Halla *et al.* 2009, Laurent *et al.* 2014, Moyen 2011, 2022, Moyen *et al.* 2003). A presença de cristais de zircão com feições ígneas preservadas nessas amostras estabelece a idade de cristalização dos protólitos em 3,06 Ga, sugerindo que os registros de fusão parcial de crosta máfica nessa região possa ser mais antigo do que se imaginava. Além disso, a idade obtida para a MED-120A (inferida para a MEP-53B) indica que estas amostras são xenólitos aproximadamente 120 Ma mais antigos que a crosta dominante (Complexo Gnáissico-Migmatítico Água Azul; 2,94 Ga; Nascimento *et al.* 2023).

As demais análises revelaram um aumento progressivo nos conteúdos de Mg, Ba, Ni e Cr e geraram diagramas com comportamento intermediário entre TTGs e granitoides enriquecidos em Mg. Alguns autores designam rochas com essas propriedades como “TTGs enriquecidos”, sendo geradas a partir da interação de magmas e fluidos de fusão parcial com o manto metassomatizado, o que demonstra certa ligação genética entre magmas puros e híbridos na origem do protólito desses ortognaisses (Champion & Sheraton 1977, Heilimo *et al.* 2010, Martin & Moyen 2002, Moyen *et al.* 2003). As idades de cristalização obtidas para as amostras EDC-28B (2,93 Ga) e MED-95A (2,95 Ga) revelam contemporaneidade à colocação dos TTGs e são condizentes com os registros de fusão parcial no Domínio Carajás (Almeida *et al.* 2011, Feio *et al.* 2013, Leite *et al.* 2004, Nascimento *et al.* 2023, Oliveira *et*

al. 2022, Silva *et al.* 2010, Silva *et al.* 2022).

Por outro lado, a MED-144 apresenta parâmetros que mostram grande afinidade sanukitoide, especialmente assinatura granodiorítica, alta razão K/Na e enriquecimento em Ba, Ni e Cr (Halla *et al.* 2009, Heillimo *et al.* 2010, Laurent *et al.* 2014, Moyen 2011, 2022, Moyen *et al.* 2003, Stern *et al.* 1989). Os dados U-Pb permitiram delimitar duas populações de zircão, sendo a primeira com intercepto superior em 2,98 Ga a partir de 5 núcleos e a segunda em 2,92 Ga a partir de 10 cristais. Nesse caso, considerando a ausência de cristais concordantes, a hipótese mais compreensível é que a mais jovem corresponderia a idade de cristalização e a mais antiga seria referente a zircões herdados da fonte. Silva *et al.* (2022) também relatou na região de Ourilândia do Norte a ocorrência de sanukitoides desse mesmo período (Granodiorito Arraias), favorecendo tal interpretação.

O comportamento textural do quartzo e dos minerais máficos (*mica fish* e hornblenda levemente estirada segundo o plano de foliação) apontaram mecanismos de recristalização dinâmica de temperaturas intermediárias à altas. Além disso, a morfologia (textura metatexítica estromática) e a mineralogia observadas nesses migmatitos (leucossomas portadores de minerais hidratados e paleossoma ortognáissico com paragênese mineral incluindo quartzo + plagioclásio + biotita ± hornblenda ± epídoto) sugerem que houve baixa quantidade de *melt* produzido e participação de fluidos no processo de fusão parcial. Estes fatores apontam para um protólito de composição granítica e metamorfismo em condições de fácies anfíbolito (~500-650°C) contemporâneo à migmatização (Brown 2013, Sawyer 2008). Com base nisso, a amostra MED-95A também gerou uma segunda população de zircão com intercepto superior em 2,89 Ga, sendo correspondente ao modelo de colisão continental de curta duração definida pelo pico de metamorfismo regional registrado nos granulitos (Granulito Ouro verde; 2,89-2,85 Ga; Marangoanha *et al.* 2019a, Pidgeon *et al.* 2000, Silva *et al.* 2021) e outras rochas do Domínio Carajás (Oliveira *et al.* 2022, Silva *et al.* 2022).

REFERÊNCIAS

- Abrantes Júnior F.R. 2010. Caracterização petrográfica e geocronológica da borda sudeste do Granito Gradaús, centro-sul do Pará, Província Mineral de Carajás. *In*: 21º Seminário de Iniciação Científica, *Resumos*[...], Belém, Universidade Federal do Pará.
- 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 leucogranodioritegranite suites: evidence from the Rio Maria. *Lithos*, **120**:235-257.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**:201-221.
- Althoff F.J., Barbey P., Macambira M.J.B., Scheller T., Leterrier J., Dall'agnol R., Lafon J.M. 1998. La croissance du craton sud-amazonien (région de Rio Maria, Brésil). *In*: Réunion des Sciences de la Terre. Brest, Société Géologique de France, *Resumés*, p. 62.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A, Estado do Pará, escala 1:250.000*. Brasília-DF, CPRM – Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás, 135 p.
- Araújo R.N. & Sousa M.J. 2018. Geologia, Estratigrafia e análise do minério dos depósitos de manganês de Carajás: regiões do Azul, Sereno, Buritirama e Antônio Vicente. *In*: Araújo Raphael Neto & Sousa Marcelo Januário de. *Área de Relevante Interesse Mineral, Província Mineral de Carajás, PA: estratigrafia e análise do minério de Mn de Carajás, áreas Azul, Sereno, Buritirama e Antônio Vicente*. Belém, CPRM, Relatório técnico, 198p. (Províncias Mineral do Brasil, 16).
- 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**(4):453-460.
- Bard J.P. 1980. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks*. Tokyo, D. Reidel Publishing Company. 246 p.
- Barker F. & Arth J.G. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemitic-basalt suites. *Geology*, **4**(10):596-600.

- Best M.G. 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. New York, Freeman. 758 p.
- Boynton W.V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *In: Henderson P. (ed). Rare earth element geochemistry*. Amsterdam, Elsevier Science Publishing Company, p. 63-114.
- Brown M. 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America*, **125**:1079-1113.
- Champion D.C. & Sheraton J.W. 1997. Geochemistry and Nd isotope systematics of Archean granites of the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. *Precambrian Research*, **83**:109-132.
- Champion D.C. & Smithies R.H. 2001. Archaean granites of the Yilgarn and Pilbara cratons, Western Australia. *Geoscience Australia*, **134**:134-136.
- Companhia Vale do Rio Doce - DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 35° Congresso Brasileiro de Geologia*. Província Mineral de Carajás. Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. Belém. *Anexo dos Anais*. p. 11-59.
- Corfu F., Hancher J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**(1):469-500.
- Dall'Agnol R., Cunha I.R.V. Guimarães F.V., Oliveira D.C., Teixeira M.F.B., Feio G.R.L., Lamarão C.N. 2017. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, **277**:3-32.
- 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 P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – implicações para a evolução arqueana da Província Carajás – Pará. *In: SBG, 13° Simpósio de Geologia da Amazônia*, Belém. *Anais*[...], 1 CD-ROM.
- Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1997. Archean granitoids as magma sources for the anorogenic Paleoproterozoic Jamon and Musa granites (Eastern Amazonian Craton): new constraints based on geochemical and Sm-Nd isotope data. *In: The South American Symposium on Isotope Geology, Extended abstracts*. v.1, p. 96-97.
- Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*. **46**:431-462.
- Debon F. & Le Fort P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **73**(3):135-149.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. (ed.) 1992. *Rock-forming minerals*. 2nd ed. London, Longmans, 696 p.

Delinardo M.A.S. 2018. *Evolução tectono-metamórfica do embasamento mesoarqueano do Domínio Carajás, Província Carajás*. PhD Theses, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 164 p.

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

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

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

Felix W.Q., Oliveira D.C., Silva L.R., Silva F.F. 2020. Charnockites from Carajás Province, SE Amazonian Craton (Brazil): petrogenetic constraints and intensive crystallization parameters. *Journal of South American Earth Science*, **101**:102598.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, **42**(11): 2033-2048.

Frost C.D., Frost B.R., Kirkwood R., Chamberlain K.R. 2006. The tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) to granodiorite-granite (GG) transition in the late Archean plutonic rocks of the central Wyoming Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **43**(10):1419-1444.

Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2013. Petrologia magnética dos granodioritos Água Azul e Água Limpa, porção sul do Domínio Carajás – Pará. *Geologia USP: Série Científica*, **13**(4):89-110.

Gabriel E.O. 2012. *Geologia, Geoquímica e Petrologia Magnética dos granitoides arqueanos da porção nordeste de Água Azul do Norte (PA) – Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 107 p.

Gabriel E.O. 2014. *Petrogênese e Evolução Estrutural dos granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte – PA, Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 77 p.

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Galarza Toro 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: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

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.

Galarza M.A., Oliveira D.C., Rodrigues E.A., Santos A.N., Martins A.C., Marangoanha B. 2017. Neoproterozoic granitoids (2.73–2.74 Ga) intrusive and associated with the Pium Diopside-Norite, Canaã dos Carajás, Carajás Province (PA). *In: Lima A.M & Gorayeb P. (eds.). Contribuições à geologia da Amazônia, SBG-Núcleo Norte*, **10**:225-246.

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

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

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

Heilimo E., Halla J., Hölttä P. 2010. Discrimination and origin of the sanukitoid series: geochemical constraints from the Neoproterozoic western Karelian Province (Finland). *Lithos*, **115**(1-4):27-39.

Hibbard M.J. 1995. *Petrography to Petrogenesis*. New Jersey, Prentice-Hall, 587 p.

Hirata W.K., Rigon J.C., Kadkaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 1° Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Anais[...]*, v. 1, p. 100-110.

Hirth G. & Tullis J. 1992. Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, **14**(2):145-159.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, **211**:47-69.

Jayananda M., Chardon D., Peucat J.J., Capdevila R. 2006. 2.61 Ga potassic granites and crustal reworking in the western Dharwar craton, southern India: tectonic, geochronologic and geochemical constraints. *Precambrian Research*, **150**(1-2): 1-26.

Lafon J.M., Scheller T. 1994. Geocronologia Pb/Pb em zircão do Granodiorito Cumaru, Serra

dos Gradaús, PA. In: SBG, 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, SBG–Núcleo Norte, Belém, *Resumos expandidos*[...], p. 321-323.

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: SBG, 31º International Geological Congress. Rio de Janeiro, *Abstracts*, 1 CD-ROM.

Laurent O., Martin H., Moyen J.F., Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, **205**:208-235.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Woodley A.R. 2002. A classification of igneous rocks and glossary of terms. In: Le Maitre R.W. (ed.). *Recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks*. 2ª ed. Cambridge, 236 p.

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**(3):635-659.

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

Leite-Santos P.J. 2016. *Petrologia e geocronologia das associações leucograníticas arqueanas da região de Água Azul do Norte (PA): implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 83 p.

Leite-Santos P.J., Oliveira D.C., Galarza M.A., Macambira M.J.B. 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da região de Nova Canadá, município de Água Azul do Norte – Província mineral de Carajás. In: 45º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém. *Anais*[...], 1 CD-ROM.

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

Macambira M.J.B. & Lancelot J. 1991. Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do estado do Pará. In: SBG, 3º Simpósio de geologia da Amazônia. Belém,

Resumos Expandidos[...], p. 49–58.

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., Donaldson C.H., Guilford C. 1982. *Atlas of igneous rocks and their textures*. Harlow Essex, England, Longman Group Ltda, 148 p.

Marangoanha B. 2018. *Petrologia e Evolução Crustal da Porção Central do Domínio Canaã dos Carajás, Província Carajás*. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 193 p.

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

Marangoanha B., Oliveira D.C., Dall’Agnol R. 2019a. The Archean granulite-enderbite complex of the northern Carajás province, Amazonian craton (Brazil): origin and implications for crustal growth and cratonization. *Lithos*, **350–351**:105275.

Marangoanha B., Oliveira D.C., Oliveira V.E.S., Galarza M.A., Lamarão C.N. 2019b. Neoproterozoic A-type Granitoids from Carajás Province (Brazil): new insights from geochemistry, geochronology and microstructural analysis. *Precambrian Research*, **324**:86-108.

Martin H. & Moyen J.F. 2002. Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the Earth. *Geology*, **30**:319-322.

Mehnert K.R. 1968. *Migmatites and the origin of granitic rocks. Developments in petrology*. Amsterdam, Elsevier. 393p.

McDonough W.F. & Sun S.S. 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**(3-4):223-253.

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.

Moyen J.F. 2011. The composite Archean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archean crustal growth. *Lithos*, **123**:21-36.

Moyen J.F., 2020. Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin, In: Dey S. & Moyen J.F. (eds). *Archean granitoids of India: windows into early earth tectonics*. London, *Geological Society*, 489 p. (Special Publications).

Moyen J.F., Martin H., Jayananda M., Auvray B. 2003. Late Archean granites: a typology based on the Dharwar Craton (Índia). *Precambrian Research*, **127**(1-3):103-123.

Nascimento A.C., Oliveira D.C., Gabriel E.O., Silva L.R., Dall'Agnol R., Leite-Santos P.J., Santos J.O.S., Machado J.R.M., Galarza M.A., Guimarães F.V. 2023. Suíte gnáissico-migmatítica Caracol: novos dados isotópicos (U-Pb-Hf-Nd-Sr) e implicações para o significado tectono-metamórfico do embasamento Mesoarqueano do Terreno Sapucaia, Província Carajás. In: SBG, 17º Simpósio de Geologia da Amazônia, Santarém, *Anais[...]*, p. 200-204.

Nédélec A. & Bouchez J.L. 2015. *Granites: petrology, structure, geological setting, and metallogeny*. New York, Oxford University Press, 352 p.

O'Connor J.T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Papers*, **525**(B):79-84.

Oliveira D.C., Santos P.J.L., Gabriel E.O., Rodrigues D.S., Faresin A.C., Silva M.L.T., Sousa S.D., Santos R.V., Silva A.C., Souza M.C., Santos R.D., Macambira M.J.B. 2010. Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás – Província Mineral de Carajás. In: SBG, 45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Resumos[...]*, 1 CD-ROM.

Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B. 2022. Geologia Regional do Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico: Proposta litoestratigráfica e implicações para a compartimentação tectônica. In: II Congresso Amazônico de Mineração, Metalurgia e Materiais – COAMA. Marabá (PA), *Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B., Gabriel E.O., Leite-Santos P.J., Machado J.R.M., Felix W.Q., Silva-Silva L.C., Santos R.F.S. 2023. Revisão litoestratigráfica com implicações para compartimentação tectônica da Província Mineral de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. In: SBG, 17º Simpósio de Geologia da Amazônia. Santarém (PA), *Anais[...]*, p. 434-441.

Passchier C.W. & Trow R.A.J. (eds.). 2005. *Microtectonics*. Germany, Springer. 366 p.

Peccerillo A. & Taylor S.R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamoru area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **58**:63-81.

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 do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. In: SBG, 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, *Resumos Expandidos[...]*, p. 390-391.

Ragland P.C. 1989. *Basic analytical Petrology*. 2 ed. New York, Oxford University Press.

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*. Salvador, *Expanded Abstracts*[...]. 1 CD-ROM.

Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*, Zimbabwe, p. 1-344.

Rodrigues D.S., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará – Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais*, **9**(3):597-633.

Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. *In: Bizzi L. A. et al. (ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p. 169-226.

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**(3):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, 14° Simpósio de Geologia da Amazônia, Marabá. Anais*[...], 1 CD-ROM.

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

Santos M.S., Oliveira D.C., Gabriel E.O. 2018. Granitoides TTG de Água Azul do Norte (PA): implicações tectônicas para a Província Carajás. *Geologia USP, Série científica*, **18**:119-148.

Santos P.J.L. & Oliveira D.C. 2012. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. *In: SBG, 46° Congresso Brasileiro de Geologia, Santos-SP. Anais*[...], 1 CD-ROM.

Santos R.F. 2021. *Origem e construção dos granitos Marajoara e Manda saia: Contribuições para a definição da natureza do magmatismo Paleoproterozoico da Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 54 p.

Santos-Silva R.C., Sabóia A.M., Oliveira H.J. 2021. *Projeto integração geológica-geofísicametagenética das sequências de Greenstone Belts do Domínio Rio Maria – Novas*

Fronteiras Rio Maria. Escalas: 1:250.000–1:100.000. Belém, CPRM. 274 p.

Sawyer E.W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexitos. *Journal of Petrology*, **39**(6):1147-1157.

Sawyer E.W. 2008. *Atlas of migmatites*. 1st ed. Canada, Canadian Science Publishing. 371 p.

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**(1):13-46.

Silva A.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2010. Individualização e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu, região de Vila Jussara, Município de Água Azul do Norte-PA, Província Mineral de Carajás. In: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Silva, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G. 1974. Geologia. In: DNPM. Projeto Radam. *Folha SB. 22 Araguaia e parte da folha SC. 22 Tocantins*: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. RJ, p. I/3- I/143.

Silva L.R. 2022. Petrogênese e história tectônica dos granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) – Província Carajás. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, xv, 302 p.

Silva L.R., Oliveira D.C., Galarza M.A. 2019. Granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA): geocronologia e implicações tectônicas para a Província Carajás. In: SBG, 16° Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus. *Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Silva, L.R., Oliveira, D.C., Galarza M.A., Nascimento, A.C., Marangoanha B., Marques G.T. 2023. Zircon U-Pb-Hf isotope and geochemical constrains on the petrogenesis and tectonic setting of Mesoarchean granitoids from the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil. *Precambrian Research*, **398**:107294.

Silva, L.R., Oliveira, D.C., Nascimento, A.C., Lamarão, C.N., Almeida, J.A.C. 2022. The Mesoarchean plutonic complex from the Carajás province, Amazonian craton: Petrogenesis, zircon U-Pb SHRIMP geochronology and tectonic implications. *Lithos*, **432-433**:106901.

Silva M.A.D, Monteiro L.V.S., Santos T.J.S., Moreto C.P.N., Sousa S.D., Faustinoni J.M., Melo G.H.C., Xavier R.P., Toledo B.A.M. 2021. Mesoarchean migmatites of the Carajás province: from intra-arc melting to collision. *Lithos*, **388-389**:106078.

Silva-Silva L.C., Oliveira D.C., Souza D.B. 2020. Geology and geochemical constraints on the origin of the Mesoarchean granitoids from Carajás province, Amazonian craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **100**:102-568.

Sousa M.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., Galarza Toro M.A. 2010. Geologia, Petrografia e Geocronologia do granito de alto K da região de Velha Canadá, município de Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 45° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Sousa S.D., Monteiro L.V.S., Oliveira D.C., Delinardo M.A.S., Moreto C.P.N., Juliani C. 2013. O greenstone belt Sapucaia na região de Água Azul do Norte, Província Mineral de Carajás: Contexto geológico e caracterização petrográfica. *In: SBG, 47° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Sousa S.D., Monteiro L.V.S., Oliveira D.C., Juliani C., Delinardo M.A.S., Moreto C.P.N., 2014. O Greenstone Belt Sapucaia, Província Carajás: Evidências de platôs oceânicos vinculados a plumas mantélicas. *In: SBG, 47° Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

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

Souza D.B. 2018. *Geologia e Petrologia dos Granitoides Arqueanos da Área de Tucumã: Implicações Para a Evolução Crustal da Província Carajás*. Qualificação de PhD Theses. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 84 p.

Souza D.B., Oliveira D.C., Monteiro L.V.S., Gabriel E.O., Marangoanha B. 2017. Colocação, metamorfismo e natureza dos anfibolitos de Água Azul do Norte, Província Carajás. *Geologia USP, Série científica*, **17**:98-123.

Souza M.C., Oliveira D.C., Macambira M.J.B., Galarza M.A. 2010. Geologia, Petrografia e Geocronologia do granito de alto K da região de Velha Canadá, município de Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás. *In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém, Anais[...]*, 1 CD-ROM.

Souza Z.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archean evolution of the Rio Maria granite – greenstone terranes and the Carajás Block. *In: SBG, Symposium Archean Terranes of the South American Platform, Brasília. Extended Abstracts*. p. 31-32.

Souza Z.S., Potrel A., Lafon J.M., Althoff F.J., Pimentel M.M., Dall'Agnol R., Oliveira C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the geodynamic evolution of the Amazonian craton. *Precambrian Research*, **109**(3-4):293-315.

Stern R.A., Hanson G.N., Shirey S.B. 1989. Petrogenesis of mantle-derived, LILE- enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in Southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **26**:1688-1712.

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

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

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

Tavares F.M. 2014. *Rio Verde – SB.22-Z-A-III, Estado do Pará – Carta Geológica*. Belém, CPRM, Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

Tavares F.M., Trouw R.A.J., Silva C.M.G., Justo A.P., Oliveira J.K.M. 2018. The multistage tectonic evolution of the northeastern carajás province, Amazonian Craton, Brazil: revealing complex structural patterns. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:238-252.

Teixeira M.F.B., Dall’Agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área a norte de Sapucaia, Província Carajás, Pará: implicações petrogenéticas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **8**(3):291-323.

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

Teixeira M.F.B., Dall’Agnol R., Santos J.O.S., Sousa L.A.M., Lafon J.M. 2017. Geochemistry, geochronology and Nd isotopes of the Gogó da Onça Granite: A new Paleoproterozoic A-type granite of Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **80**:47-65.

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. Unidades litoestratigráficas. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM. 3, p. 113-215.

Vernon R.H. 2004. *A practical guide to rock microstructures*. Cambridge, Cambridge University Press, 594 p.

Watkins J.M., Clemens J.D., Treloar P.J. 2007. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6-1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **154**:91-110.