



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 659

**PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE
CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO:
IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS
NEOARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

SILVIO SANCHES NETO

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)

S211p Sanches Neto, Silvio.

Petrologia magnética e parâmetros de cristalização do Charnoquito Rio Seco: Implicações para evolução de granitos neoarqueanos da Província Carajás / Silvio Sanches Neto Sanches. — 2024.
xiii, 63 f.: il. color.

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

1. Petrologia. 2. Geocronologia. 3.
Granitoides. 4. Província Carajás. 5. Cráton
Amazônico. I. Título.

CDD 552



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

**PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE
CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO:
IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS
NEOARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS**

Dissertação apresentada por
SILVIO SANCHES NETO

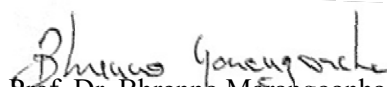
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, Linha de Pesquisa Petrologia e Evolução Crustal**

Data de Aprovação: 09 / 10 / 2024

Banca Examinadora:


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


Dr. Luciano Ribeiro da Silva
(Membro - UFOPA)


Prof. Dr. Bhrenno Marangoanha
(Membro - UFPA)

*Aos meus pais, Silvia (in memoriam) e Joel,
à minha esposa Ana Carolina e ao meu filho Solano,
e ao meu irmão Paulo Sanches.*

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

Ao Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da UFPA pelo fornecimento de infraestrutura;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo que permitiu a realização desta pesquisa; Cód. finc.001.

Ao orientador Prof. Davis C. de Oliveira, pela oportunidade e por todo apoio dado para a realização deste trabalho, pelas conversas e ensinamentos compartilhados desde meados da graduação como bolsista de PIBIC, depois com a conclusão do curso e TCC, até a esta etapa que fecha um importante ciclo em minha trajetória profissional;

Meus sinceros agradecimentos aos familiares que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, aos meus pais, Silvia (*in memoriam*) e Joel, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram em todas as minhas decisões. À minha esposa Ana Carolina, meu filho Solano e meu irmão Paulo que sempre me inspiraram e me ajudaram a crescer como pessoa;

Ao Laboratório de Microanálises (LM) que foi de extrema importância na obtenção de dados, com destaque para Gisele Marques e Ana Paula (técnicas do laboratório) e para o Prof. Cláudio Lamarão (coordenador do laboratório);

Ao Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UFPA, com destaque para o apoio da responsável técnica Joelma Lobo;

Aos membros do Grupo de Pesquisa e Petrologia de Granitoides (GPPG), em especial ao Luciano Ribeiro e Williamy Felix, por terem me auxiliado no desenvolvimento deste estudo, além de ter contribuído com dados que integram os resultados e discussões obtidos neste trabalho;

À todos os amigos e colegas adquiridos durante minha vida profissional na geologia, em especial aos amigos mais próximos como Luciano, Artur, Marcos Paulo, Paulo Magno, Hargel, João e Thays.

“Faça o seu melhor na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores para fazer melhor ainda”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

Este trabalho apresenta dados de petrologia magnética e condições de cristalização (T , fO_2 e xH_2O) do Charnoquito Rio Seco a partir do estudo sobre evolução textural de silicatos e óxido de Fe-Ti. O corpo é intrusivo em granitoides mesoarqueanos (2,88 Ga) e foi subdividido em quatro tipos petrográficos: (i) gabronorito; (ii) orto-clinopiroxênio granodiorito; (iii) clinopiroxênio-hornblenda monzogranito; (iv) hornblenda-biotita monzogranito. Os valores magnéticos variam entre $0,231 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ Slv e mostra caráter bimodal. As rochas com piroxênio concentram-se na população magnética A, cujos valores de susceptibilidade magnética variam entre $3,2 \times 10^{-3}$ e $22,1 \times 10^{-3}$, e são compatíveis com os valores de SM definidos para granitos neoarqueanos oxidados da Província Carajás. As rochas desprovidas de piroxênio definem a população magnética B, com valores mais baixos, entre $0,231 \times 10^{-3}$ e $0,309 \times 10^{-3}$, e estão compreendidos pela faixa de valores definida para os granitos reduzidos. A temperatura de cristalização do anfibólio varia de 713 a 809°C e a pressão de colocação varia de 81 a 300 MPa. A fO_2 (ΔNNO) varia de -0,4 a +2,4 e o $\log fO_2$ de -12,0 a -16,0. A baixa razão Fe/(Fe+Mg) em hornblenda e biotita confirma as condições oxidantes dessas rochas que pertencem a série à magnetita. O higrômetro utilizado indicou conteúdo de água no magma variando de 4,3 a 6,1%. As texturas do tipo corona registram o desequilíbrio físico-químico entre silicatos e favorecem a formação de minerais magnéticos nas rochas com piroxênio. As rochas da população A apresentam conteúdo modal de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7% com diferentes graus de exsolução da ilmenita em estágio magmático (série da magnetita-ulvoespínlio). A população magnética B mostra menores conteúdos de minerais opacos (<0,3%) e é caracterizada pela presença de goethita zonada formada por processos de oxidação em estágio tardi- a pós magmático. O estudo de evolução textural e mineralógica reforça o modelo de cristalização fracionada proposto em trabalho anterior e explica a abundância de minerais óxido de Fe-Ti na variedade com ortopiroxênio, conferindo caráter oxidado dessas rochas. O Charnoquito Rio Seco tem sua colocação controlada por um sistema de lineamentos de comportamento dúctil-rúptil, e que é favorável à interpretação de um plúton colocado em níveis crustais rasos. Em condições de crosta mais profunda, a assimilação de componentes crustais pode originar magmatismo ferroso.

Palavras-chave: petrologia magnética; química mineral; granitoides neoarqueanos; Província Carajás.

ABSTRACT

This work presents new magnetic petrological data and crystallization conditions (T , fO_2 and xH_2O) of the Rio Seco Charnockite from a detailed study of the textural evolution of silicates and Fe-Ti oxide. The body is intrusive in Mesoarchean granitoids (2.88 Ga) and was subdivided into four petrographic types: (i) gabbro-norite; (ii) ortho-clinopyroxene granodiorite; (iii) clinopyroxene-hornblende monzogranite; (iv) hornblende-biotite monzogranite. The magnetic values range from 0.231×10^{-3} to 22.1×10^{-3} SI and shows bimodal character. Pyroxene-bearing rocks are concentrated in magnetic population A, whose magnetic susceptibility values range from 3.2×10^{-3} to 22.1×10^{-3} , and are compatible with the SM values defined for oxidized neoarchean granites of the Carajás Province. Pyroxene-deprived rocks define magnetic population B, with lower values, between 0.231×10^{-3} and 0.309×10^{-3} . They are included in the range of values defined for reduced granites. The amphibole crystallization temperature ranges from 713 to 809°C and the emplacement pressure ranges from 81 to 300 MPa. The fO_2 (ΔNNO) ranges from -0.4 to +2.4 and the $\log fO_2$ from -12.0 to -16.0. The low Fe/(Fe+Mg) ratio in hornblende and biotite confirms the oxidizing conditions of these rocks, which belong to the magnetite series. The hygrometer used indicated water content in the magma ranging from 4.3 to 6.1% wt. The corona-type textures record the physical-chemical disequilibrium between silicates and favor the formation of magnetic minerals in the rocks with pyroxene. The rocks of population A present modal content of opaque minerals ranging from 0.2 to 1.7% with different degrees of exsolution of ilmenite in the magmatic stage (magnetite-ulvöspinel series). The magnetic population B shows lower contents of opaque minerals (<0.3%) and is characterized by the presence of zoned goethite formed by oxyhydration processes in the late to post-magmatic stage. The study of textural and mineralogical evolution reinforces the fractional crystallization model proposed in a previous work and explains the abundance of Fe-Ti oxide minerals in the variety with orthopyroxene, giving these rocks an oxidized character. The Charnockite Rio Seco has its emplacement controlled by a system of lineaments with ductile-ruptile behavior, which is favorable to the interpretation of a pluton emplaced at shallow crustal levels. In deeper crustal conditions, the assimilation of crustal components may give rise to ferrous magmatism.

Keywords: magnetic petrology; mineral chemistry; neoarchean granitoids; Carajás Province.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
Figura 1 - Mapa de acesso e localização da área de estudo.....	3
Figura 2 – Contexto tectônico regional: (a) Mapa geológico da Província Carajás e coluna litoestratigráfica; (b) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás. Fontes: Oliveira <i>et al.</i> (2022, 2023), (Silva 2022).....	5
CAPÍTULO 2 PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO: IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS NEOARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS.....	18
Figura 3 - Contexto tectônico regional: (a) Mapa geológico da Província Carajás e coluna litoestratigráfica; (b) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás. Fontes: Oliveira <i>et al.</i> (2022, 2023), (Silva 2022).....	23
Figura 4 - Mapa geológico da área de Ourilândia do Norte em escala de semi-detulhe (1:50.000) com destaque para o Charnoquito Rio Seco. Modificado de Silva <i>et al.</i> (2022).....	24
Figura 5 - Diagrama Q-A-P mostrando a classificação das rochas do Charnoquito Rio Seco, de acordo com as recomendações da IUGS (Le Maitre 2002). Destaque para o campo de rochas neoarqueanas oxidadas e reduzidas (Cunha <i>et al.</i> 2016, Oliveira <i>et al.</i> 2018, Sousa <i>et al.</i> 2022).....	26
Figura 6 - Aspectos texturais e mineralógicos do Charnoquito Rio Seco: rochas com piroxênio: (a,b e c) aspectos mesocópico do grabronorito, ortopiroxênio granodiorito e clinopiroxênio monzogranito com textura granular hipidiomórfica; (d) fotomicrografia de textura geral hipiomórfica mostrando bordas de reação entre piroxênios e anfibólio e biotitas associadas; (e) magnetita inclusa em clinopiroxênio e texturas de exsolução entre piroxênios; (f) diferentes graus de alteração de clinopiroxênio para anfibólio e plagioclásio intensamente saussuritizado. Rochas sem piroxênio: (h) aspectos mesoscópicos do hornblenda monzogranito; e (g) textura geral inequigranular hipidiomórfica com plagioclásio alterado, relíquias de clinopiroxênio e matriz quartzo-feldspática.	27
Figura 7 - Histograma de frequência mostrando comportamento bimodal para a susceptibilidade magnética do Charnoquito Rio Seco: (a) histograma de frequência dos charnoquitos em contraste com granitos neoarqueanos de caráter oxidado e reduzido do Domínio Carajás (Cunha <i>et al.</i> 2016, Oliveira <i>et al.</i> 2018, Sousa <i>et al.</i> 2022); (b) histograma de frequência	

mostrando o comportamento magnético de grabronoritos da série charnoquítica e rochas máficas do Diopsídio-Norito Pium (Santos *et al.* 2013).29

Figura 8 - Diagramas binários relacionando os valores de suscetibilidade magnética (SM) com conteúdo modal e composição química: a) minerais opacos vs SM; b) piroxênios vs SM; c) anfíbólio mais quartzo menos piroxênios vs SM; e d) óxido de Fe_2O_3 vs SM.31

Figura 9 - Aspectos texturais dos minerais opacos do Charnoquito Rio Seco. Imagens de elétrons retroespalhados (MEV): Rochas com piroxênio: (a) ilmenita composta (Ilm C) associada à magnetita; (b) magnetita hipidiomórfica com lamelas exsolvidas de ilmenita formando textura treliça (Ilm T); (c) ilmenita hipidiomórfica com textura esquelética inclusa em biotita. Rochas sem piroxênio: (d,e) goethita hipidiomórfica com zoneamento composicional; e (f) pirita hipiomórfica.32

Figura 10 - Figura esquemática ilustrando o modelo de cristalização e a evolução textural de silicatos e minerais óxido de Fe-Ti do Charnoquito Rio Seco: a) modelo marcado pela passagem de estágio magmático para hidrotermal indicando níveis de formação das variedades (a esquerda) e texturas de minerais óxido de Fe-Ti formadas em estágio magmático e pós-magmático (a direita); e b) fotomicrografias de minerais silicáticos e imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de minerais óxido opacos mostrando a evolução de microestruturas. Ambas posicionadas em de acordo suas respectivas variedades e tipologia textural no esquema ao lado.36

Figura 11 - Diagramas de parâmetros de cristalização do charnoquito Rio Seco com campos de granitos afins (Cunha *et al.* 2016, Dall' Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2022) oxidados e reduzidos: a) razão $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ vs AlIV em anfibólios (baseado em Anderson & Smith 1995); b) diagrama $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ vs $\text{AlIV}+\text{AlVI}$ em biotitas mostrando similaridade com a série magnetita de Ishihara (1981), conforme domínios indicados por Anderson *et al.* (2008); c) $\log f\text{O}_2$ vs $T(^{\circ}\text{C})$ estimados de modo empírico para as diferentes variedades da série charnoquítica de Ourilândia. Temperatura calculada por Felix *et al.* (2020) com base na composição do anfibólio e piroxênio (Ridolfi *et al.* 2010, Taylor 1998), e a $f\text{O}_2$ de acordo com Fegley (2013), plotadas sobre as curvas tampões níquel-óxido de níquel (NNO) e faialita-magnetita- quartzo (FMQ) conforme Frost (1991); e d) razão $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ vs $\text{AlIV}+\text{AlVI}$ em anfibólios da série charnoquítica e de rochas afins, isóbaras de Anderson & Smith (1995). Abreviação: Pop = população.41

Figura 12 - Aspectos geoquímicos do Charnoquito Rio Seco: a) Diagrama $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ vs SiO_2 de Frost *et al.* (2001), indicando caráter magnésiano para a série charnoquítica e ferroso para os granitos afins; e b) Diagrama $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ vs. Al_2O_3 de Dall' Agnol & Oliveira (2007) que define os campos de granitos tipo A reduzidos e oxidados, e dos granitoides cordilheiranos cálcico-alcálicos, onde plotam as rochas da série charnoquítica. Dados compilados (Feio *et al.* 2012, Dall' Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Maragoanha *et al.* 2019, Felix *et al.* 2020).....43

Figura 13 - Variação da fugacidade de oxigênio e temperatura de plútons charnoquíticos (modificado de Frost & Frost 2008). Campos da série charnoquítica de Ourilândia e granitos afins de caráter oxidado e reduzido da Província Carajás.45

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Composição modal do Charnoquito Rio Seco.....	25
Tabela 2 - Valores de susceptibilidade magnética (SM) e dos principais óxidos do Charnoquito Rio Seco.....	28
Tabela 3 - Dados de química mineral quantitativa em anfíbólio do Charnoquito Rio Seco	37
Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros de cristalização do Charnoquito Rio Seco e rochas afins	39

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
EPÍGRAFE.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
 CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	3
1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
1.3.1 Terreno Ganito- <i>Greenstone</i> Rio Maria	6
1.3.2 Terreno Sapucaia	6
1.3.3 Terreno Canaã dos Carajás	7
1.4 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	8
1.5 OBJETIVOS.....	9
1.6 MATERIAL E MÉTODOS	10
1.6.1 Pesquisa bibliográfica.....	10
1.6.2 Amostragem e trabalho de campo.....	10
1.6.3 Petrografia e estudo de minerais opacos	10
1.6.4 Petrologia magnética	11
1.6.5 Química mineral	11
 CAPÍTULO 2 PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO: IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS NEOARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS.....	 18
2.1 INTRODUÇÃO.....	20
2.2 GEOLOGIA REGIONAL	21
2.3 ASPECTOS GERAIS DO CHARNOQUITO RIO SECO.....	24
2.3.1 Petrografia e análise textural.....	25
2.4 PETROLOGIA MAGNÉTICA	28
2.4.1 Relações entre SM, conteúdo modal e composição química	30
2.4.2 Petrografia de minerais opacos	33

2.5 DISCUSSÕES	34
2.5.1 Tipologia e evolução textural de silicatos	34
2.5.2 Tipologia e evolução textural de minerais opacos	35
2.5.3 Termobarometria e conteúdo de H ₂ O em anfibólio.....	37
2.5.4 Fugacidade de oxigênio em composição de anfibólio e biotita	39
2.5.5 Comparação com granitoides neoarqueanos da Província Carajás	42
2.5.6 Origem de charnoquitos e evolução do magmatismo neoarqueano.....	46
2.6 CONCLUSÕES	50
CAPÍTULO 3 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Este trabalho apresenta novos dados de petrologia magnética do Charnorquito Rio Seco, unidade pertencente a Suíte Charnoquítica Pium de idade neoarqueana localizada a sudoeste do Terreno Canaã dos Carajás (Oliveira *et al.* 2022, 2023, Felix *et al.* 2023), mais especificamente na região de Ourilândia do Norte (Fig. 1). Os resultados apresentados fazem parte das contribuições do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) para o avanço do conhecimento geológico da área de Ourilândia do Norte, porção centro-oeste da Província Carajás. A pesquisa foi desenvolvida dentro da linha de pesquisa Evolução Crustal e Metalogênese do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA, tendo como o tema central a petrologia magnética e as condições formação do charnoquito Rio Seco, e suas possíveis relações petrogenéticas com o magmatismo hidratado do tipo A que ocorre no Terreno Canaã dos Carajás. A dissertação segue o formato de artigo científico, contendo inicialmente um capítulo introdutório (Capítulo 1) que apresenta o contexto geológico regional da Província Carajás, a localização da área de estudo, a problemática, os objetivos e a metodologia aplicada. O segundo capítulo, intitulado “PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO: IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS NEOARQUEANOS DE PROVÍNCIA CARAJÁS”, apresenta os resultados em formato de artigo científico, abordando os aspectos petrográficos, de petrologia magnética e a identificação dos minerais óxidos de Fe-Ti, além de discutir a evolução textural de silicatos e óxidos. Por fim, será apresentada uma reavaliação dos parâmetros de cristalização do Charnorquito Rio Seco, em especial sobre as condições de oxidação do magma, além de realizar uma discussão integrada entre estas rochas e outras unidades neoarqueanas da Província Carajás (granitos tipo-A “hidratados”), cujos magmas foram formados sob diferentes condições de fugacidade de oxigênio (oxidados e reduzidos) e que tem reflexo em suas assinaturas geoquímicas (tipologia) contrastantes (magnesianos e ferrosos). Este artigo será revisado e submetido para publicação em um periódico Qualis A (CAPES). O Capítulo 3 apresenta as conclusões e uma síntese dos aspectos mais relevantes da dissertação e suas principais contribuições para o avanço do conhecimento geológico da região.

Os estudos iniciais sobre os charnoquitos da região de Ourilândia do Norte foram realizados por Felix *et al.* (2020). O Charnorquito Rio Seco foi definido por Oliveira *et al.* (2023) e é formado por um corpo com cerca de 12km de extensão disposto segundo a direção NE-SW,

intrusivo em granitoides mesoarqueanos, é composto por uma sequência de rochas classificadas como noritios, quartzo gabros, granodioritos e monzogranitos com diferentes proporções de piroxênio e anfibólio. Pequenas intrusões satélites de direção geral E-W também fazem parte desta sequência. Estudos de petrologia magnética e estimativa das condições de cristalização de magmas graníticos relacionados às suítes neoarqueanas Planalto e Vila Jussara (Sousa *et al.* 2022), aliado a dados geoquímicos sugerem que a origem dos granitos hidratados tipo A pode estar relacionada aos charnoquitos presentes no Terreno Canaã dos Carajás (Dall'Agnol *et al.* 2017, Silva *et al.* 2022, Oliveira *et al.* 2023). Para aprofundar o debate, esta pesquisa apresenta dados que ratificam o modelo de cristalização fracionada proposto por Felix *et al.* (2020) para sequência de rochas do Charnoquito Rio Seco. Aqui é admitido que o caráter magnesiano e oxidado do magma charnoquítico foi herdado da fonte, no entanto, as evidências petrológicas, geoquímicas e o amplo contraste entre as condições de oxidação dos magmas charnoquíticos e dos granitos neoarqueanos, não permitem, a priori, admitir que estas rochas tenham origem relacionadas ao mesmo modelo petrogenético.

1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo (Fig. 1) está localizada no município de Ourilândia do Norte, sudeste do estado do Pará, e está inserida na porção nordeste da Folha Rio Branco (SB-22- Y-B-VI). O acesso à área pode ser realizado por via terrestre, a partir de Belém, pela rodovia PA-150 até Marabá, passando pelos municípios de Eldorado dos Carajás, Sapucaia, Água Fria e Xinguara, e prosseguindo pela rodovia PA-279, passando pelo município de Água Azul do Norte até o município de Ourilândia do Norte. A via aérea pode ser realizada a partir dos aeroportos de Belém-Marabá e/ou Belém-Carajás (Parauapebas).

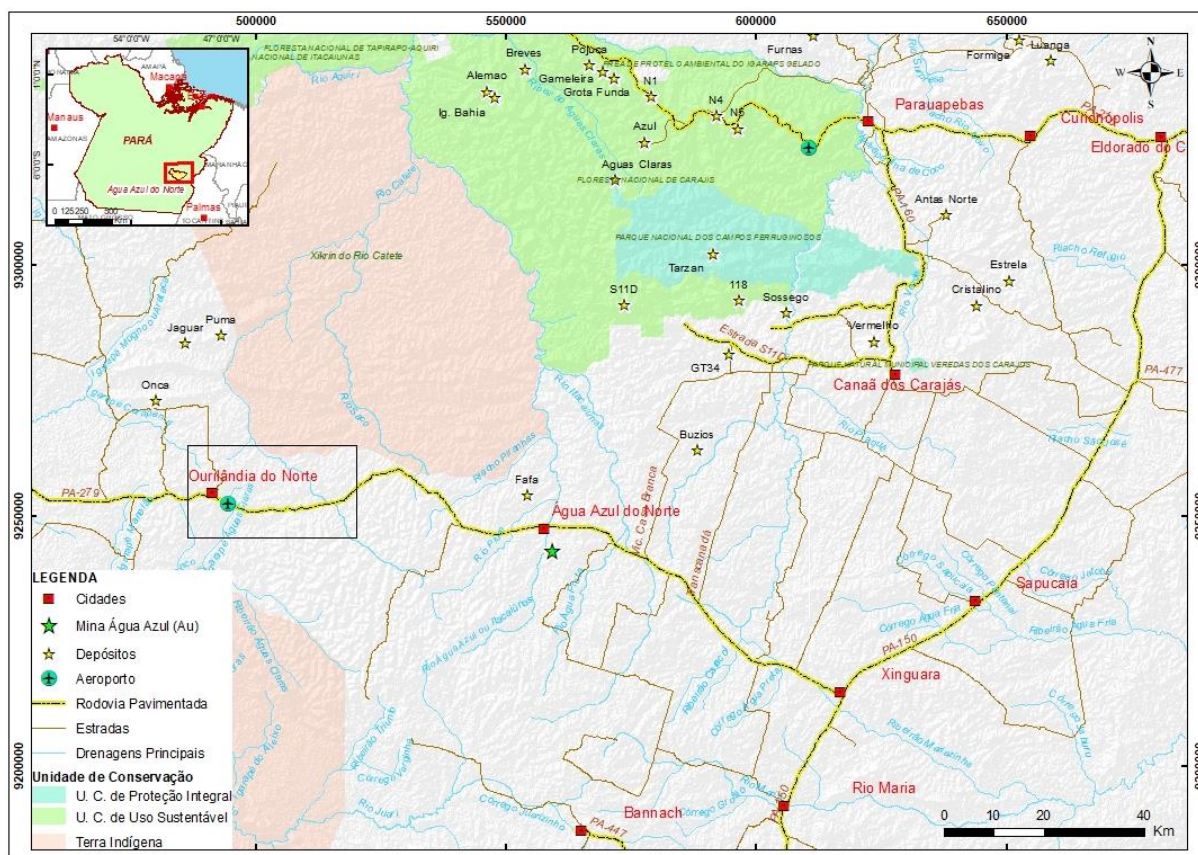


Figura 1 - Mapa de acesso e localização da área de estudo

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Carajás (PC) está localizada no sudeste do Cráton Amazônico e representa o seu principal núcleo arqueano preservado. Foi inicialmente inserida no domínio arqueano da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004) e posteriormente foi subdividida em dois domínios tectônicos distintos por diversos autores (Santos 2003, Vaquez *et al.* 2008, Dall'Agnol *et al.* 2013, Oliveira *et al.* 2023).

Nas últimas décadas foram propostos diversos modelos de compartimentação tectônica para a PC. Vasquez *et al.* (2008), seguindo proposta de Santos (2003), denominou a porção sul da PC de Domínio Rio Maria (DRM) e a porção norte de Domínio Carajás (DC). Posteriormente, Dall'Agnol *et al.* (2013) entendendo que a porção central da PC não corresponderia a uma crosta tectonicamente homogênea, propôs a subdivisão do DC em Domínio Sapucaia (DS), Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Bacia Carajás (BC). Recentemente, Oliveira *et al.* (2022, 2023), apresentou uma nova proposta estratigráfica para PC e sua compartimentação geral foi subdividida em: (i) Terreno Canaã dos Carajás (TCC), (ii) Terreno Sapucaia (TS) e (iii) Bacia Carajás. Nesta proposta, mantem-se os Domínios Carajás (norte) e Rio Maria (sul), porém eles são compostos por terrenos e não subdomínios. O Domínio Carajás é composto pela Bacia Carajás e pelos Terrenos Canaã dos Carajás e Sapucaia, enquanto o DRM é compreendido pelo Terreno Granito-*Greenstone* Rio Maria. Esta nova proposta de compartimentação tectônica da PC é apresentada em detalhes na tese de doutorado de Silva (2022), (Fig.2).

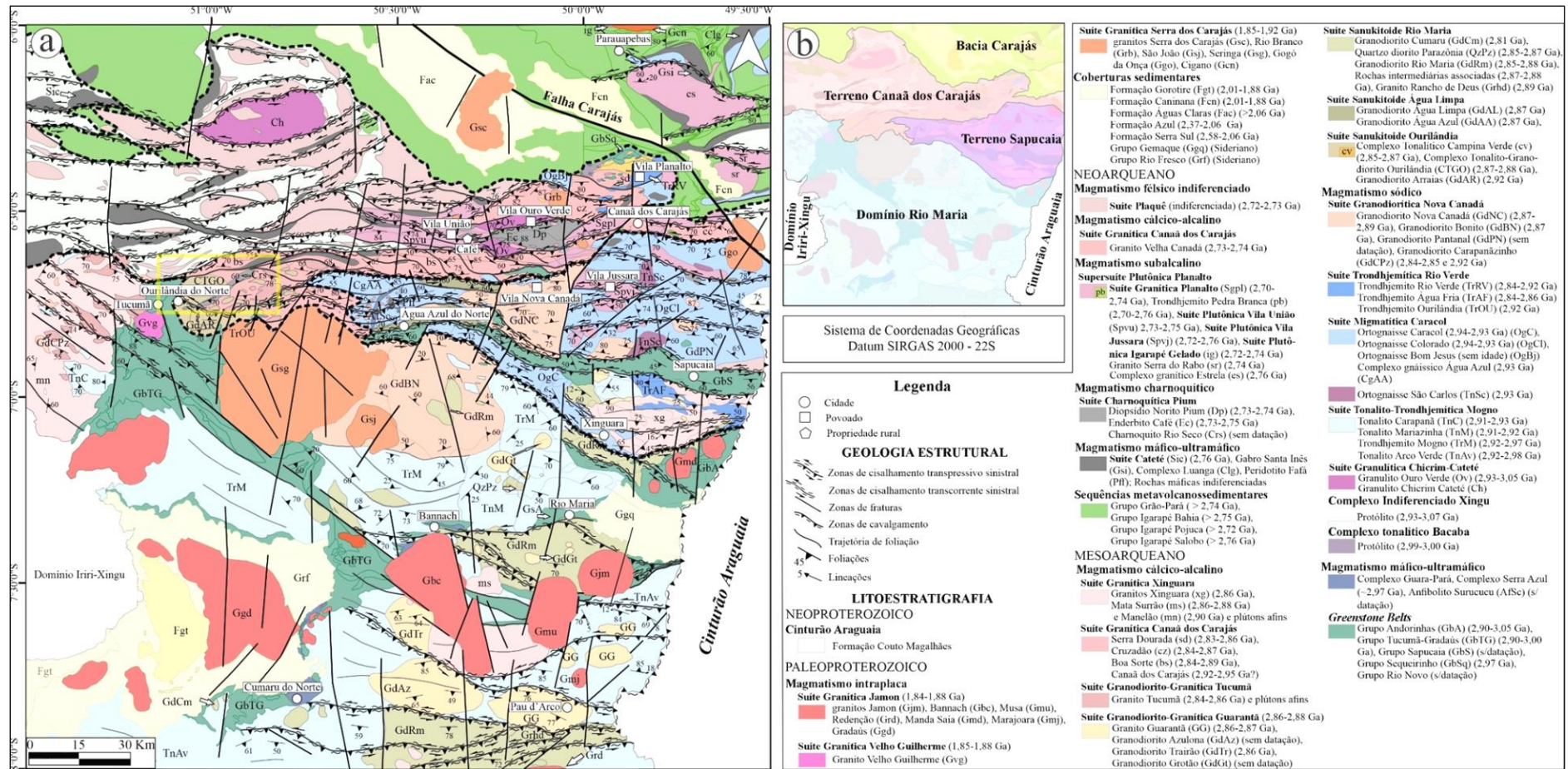


Figura 2 – Contexto tectônico regional: (a) Mapa geológico da Província Carajás e coluna litoestratigráfica; (b) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás. Fontes: Oliveira *et al.* (2022,2023), (Silva 2022).

1.3.1 Terreno Ganito-Greenstone Rio Maria

O Domínio Rio Maria (DRM), situado na porção sul da PC, é composto por rochas de idade mesoarqueana (2,98-2,85 Ga) e representa um típico terreno granito-*greenstone* com características ígneas bem preservadas (Oliveira *et al.* 2023). Este domínio é composto essencialmente por sequências *greenstone belts* (3.0 a 2.90 Ga; Macambira & Lancelot 1996, Souza *et al.* 2001), complexos máfico-ultramáficos (2,97 Ga; Pimentel & Machado 1994, Vasquez *et al.* 2008, Silva *et al.* 2021b) e suítes TTG (2.98 a 2.93 Ga; Almeida *et al.* 2011, 2013), com subordinadas ocorrências de rochas *sanukitoides*, suítes graníticas, granitoides calcioalcalinos e leucogranitos potássicos (2.87-2.86 Ga; Althoff *et al.* 2000, Dall’Agnol *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2011, Silva *et al.* 2018).

1.3.2 Terreno Sapucaia

No geral o Terreno Sapucaia (TS) de idade entre 2.95 e 2.73 Ga é bastante similar ao DRM, porém afetado por eventos de migmatização no final do Mesoarqueano, representado pela Suíte Migmatítica Caracol, e por magmatismo subalcalino sintectônico no Neoarqueano definido pela Suíte Vila Jussara (Oliveira *et al.* 2023). É composto pelas sequências *greenstone belt* do Grupo Sapucaia ainda sem idade (Costa *et al.* 2016) e, principalmente por TTG representadas por rochas metamorfizadas e intensamente migmatizadas do Complexo Caracol. Este complexo é composto pelos Ortognaisse Caracol (2,95-2,93 Ga; Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011), Ortognaisse Água azul do Norte (~2,93 Ga; Santos *et al.* 2018, Nascimento, em preparação) e Ortognaisse Colorado (2,87 Ga; Silva *et al.* 2010, 2014). O Trondjemito Água Fria apresenta afinidade TTG (2,86-2,84 Ga; Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2011) e representa a suíte Rio Verde (Oliveira *et al.* 2023). A suíte Nova Canadá é representada pelo Granodiorito Nova Canadá (2,89 Ga; Oliveira *et al.* 2010). O Complexo Caracol, a Suíte Rio Verde e a Suíte Nova Canadá juntos representam o magmatismo sódico do TS (Silva *et al.* em preparação).

O magmatismo cálcioalcalino do TS é representado pela Suíte Água Limpa composta pelo Granodiorito Água Azul (2,87 Ga; Sousa *et al.* 2010), pelo Granodiorito Água Limpa (2.87 Ga; Gabriel *et al.* 2010) e pela Suíte Xinguara, definida pelo Granito Xinguara (2,86 Ga; Leite *et al.* 2004). As rochas mesoarqueanas do TS foram intensamente deformadas durante o Neoarqueano (2,75-2,73 Ga) e seccionadas por granitoides subalcalinos da Suíte Vila Jussara (2,76-2,72 Ga; Silva *et al.*, 2020) e por leucogranitos potássicos, ambos de idade Neoarqueana (Leite-Santos & Oliveira 2016).

1.3.3 Terreno Canaã dos Carajás

O Terreno Canaã dos Carajás (TCC) compreende o embasamento da Bacia Carajás. Difere do Domínio Rio Maria e outros terrenos granito *greenstone* por apresentar um padrão imbricado de suas rochas que estão dispostas segundo a direção E-W (Pinheiro & Holdsworth 2000), escassez de TTG, predominância de biotita granitos que são representados pela Suíte Granítica Canaã dos Carajás e pela presença de migmatitos e granulitos da Suíte Granulítica Chicrim Cateté, além dos Charnoquitos da Suíte Charnoquítica Pium (Feio *et al.* 2013, Marangoanha *et al.* 2019, 2020, Felix *et al.* 2020, Silva *et al.* 2022, Oliveira *et al.* 2023).

O magmatismo sódico mesoarqueano do TCC é representado pelas rochas do Complexo Xingu, composto pelos *greenstone belts* do Grupo Sequeirinho (2,96 Ga; Moreto *et al.* 2015) e Complexo Chicrim Cateté definido pelo Granulito Vila Ouro Verde (3,06-2,84 Ga; Silva *et al.* 2021a, Marangoanha *et al.* 2019), além do Tonalito Bacaba (3,0-2,99 Ga; Moreto *et al.* 2011) e da Suíte Mogno com xenólitos tonalíticos (2,92 Ga; Silva *et al.* 2023) e Suíte Rio Verde composta por Trondjemitos antigos que ocorrem na área de Ourilândia (2,92 Ga; Silva *et al.* 2023) e Trondjemito Rio Verde (2,92-2,84 Ga; Feio *et al.* 2013).

O magmatismo cálcioalcalino do TCC é representado pelas rochas da Suíte Orilândia composta pelo Granodiorito Arraias (2,92 Ga; Silva *et al.* 2023) e Granodiorito Ourilândia (Silva *et al.* 2022), pelos Tonalitos do Complexo Campina Verde (2,87-2,85 Ga; Moreto *et al.* 2015, Feio *et al.* 2013) e pelas rochas graníticas da Suíte Canaã dos Carajás compostas pelo Granito Canaã dos Carajás (2,95 Ga; Feio *et al.* 2013), Granito Cruzadão (2,87-2,85 Ga; Feio *et al.* 2013), Granito Boa Sorte (2,89-2,85 Ga; Rodrigues *et al.* 2014), Granito Serra Dourada (2,86-2,84 Ga; Moreto *et al.* 2011, 2015) e Granito Bom Jesus (2,83 Ga; Feio *et al.* 2013).

No Neoarqueano (2,76-2,72 Ga) o magmatismo subalcalino do TCC é representado por granitoides da série charnoquítica (Felix *et al.* 2020), associações máfico-ultramáficas, além de granitos da Suíte Plaquê (Machado *et al.* 1991, Vasquez *et al.* 2008, Barros *et al.* 2009, Feio *et al.* 2013, Marangoanha *et al.* 2019, 2020). Recentemente, com base no mapa proposto por Oliveira *et al.* (2022), os plútons do Diopsídio Norito Pium, Enderbito Café, Charnoquito Rio Seco, e as rochas máfico-enderbíticas de Sapucaia, todas com idade $\sim 2,74 \pm 0,01$ Ga (Teixeira 2013, Santos *et al.* 2013, Feio *et al.* 2012, Marangoanha *et al.* 2019, Felix *et al.* 2020;) foram agrupados à Suíte Charnoquítica Pium (Felix *et al.* 2023).

1.4 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Ao longo da última década, o GPPG-UFPA vem contribuindo com o avanço no conhecimento geológico da região de Ourilândia do Norte, aprofundando o entendimento sobre as associações magmáticas e aspectos estruturais das rochas que compõe este segmento de crosta (Santos *et al.* 2013, Santos e Oliveira 2016, Felix *et al.* 2020, Silva *et al.* 2022, Nascimento *et al.* 2021, Oliveira *et al.* 2022), anteriormente mapeado como Complexo Xingu e suítes Rio Maria, Plaquê e Cateté, em escala de 1:1.000.000 (Vasquez *et al.* 2008).

Estudos envolvendo petrologia magnética e química mineral, realizados em unidades granitoides de idade neoarqueana do domínio Canaã dos Carajás, gerou informações valiosas sobre as condições de cristalização dessas rochas (Cunha *et al.* 2016, Feio *et al.* 2012, Dall'Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Felix *et al.* 2020, Sousa *et al.* 2022). Pesquisas em granitos com assinatura geoquímica magnésiana e ferrosa, de caráter oxidado e reduzido, sugeriram que a origem dos granitos hidratados do tipo-A estaria relacionada à rochas de afinidade charnoquítica (Feio *et al.* 2012, Dall' Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018). Felix *et al.* (2020) definiu a natureza do charnoquito Rio Seco, localizado na região de Ourilândia, onde foram individualizados quatro tipos petrográficos: (i) gabronorito; (ii) ortopiroxênio granodiorito, (iii) clinopiroxênio monzogranito e (iv) anfibólio monzogranito. Estes autores indicam que o grabronorito foi extraído do manto empobrecido (baixo HFSE) e evoluiu para granitoides com ortopiroxênio através de cristalização fracionada sob condições hidratadas até chegar à formação de monzogranitos enriquecidos em hornblenda. Apontaram ainda que os charnoquitos divergem em termos geoquímicos dos granitos hidratados tipo A (alto HFSE) reduzido, originados por fusão parcial de crosta granulítica máfica, e por isso não apresentariam correlação petrogenética.

Apesar do avanço no conhecimento sobre as condições de cristalização do magma da sequência charnoquítica Rio Seco, ainda há necessidade de um estudo integrado envolvendo informações de petrologia magnética e química mineral desta unidade com os demais granitos ferrosos e magnesianos, de caráter reduzido e oxidado da Província Carajás. Além disso, o debate sobre a possível relação petrogenética entre charnoquitos e granitos hidratados tipo-A permanece aberto e inconclusivo. Deste modo, esta dissertação visa preencher as seguintes lacunas sobre a granitogênese neoarqueana de Carajás:

- Ausência da caracterização de minerais óxido de Fe-Ti nas variedades do Charnoquito Rio Seco;

- Ausência de estudo integrado entre dados de susceptibilidade magnética (SM) e química mineral do Charnoquito Rio Seco;
- Ausência de estudo comparativo discutindo as condições de formação do Charnoquito Rio Seco, principalmente quanto ao estado de oxidação de seu magma, e a relação com a origem e evolução do magmatismo neoarqueano da Província Carajás.

1.5 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é realizar um estudo integrado de petrologia magnética e química mineral para redefinir os parâmetros de cristalização (T , P , fO_2 e xH_2O) do Charnoquito Rio Seco obtidos em trabalhos anteriores (Felix *et al.* 2020). Posteriormente, este trabalho visa discutir as condições de oxidação atuantes durante a cristalização dessas rochas e contribuir para o entendimento da relação petrogenética entre os magmas geradores dos charnoquitos e granitos hidratados da Província Carajás. Para isso, foram atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação e classificação da mineralogia primária e secundária, assim como as principais feições deformacionais presentes nestas rochas;
- Determinação da susceptibilidade magnética (SM) e comparação destes dados com a composição modal e geoquímica destas rochas;
- Integração dos dados de petrologia magnética (SM), petrografia e química mineral das variedades de rochas estudadas neste trabalho.
- Estudo da tipologia e evolução textural dos silicatos e minerais óxido de Fe-Ti.
- Comparação dos dados de petrologia magnética, parâmetros de cristalização e assinatura geoquímica do Charnoquito Rio Seco com rochas afins de caráter magnesiano e ferroso, oxidado e reduzido.

1.6 MATERIAL E MÉTODOS

1.6.1 Pesquisa bibliográfica

Nesta etapa foi realizado o levantamento bibliográfico contínuo referente ao contexto geológico da Província Carajás com ênfase em trabalhos que abordaram o estudo de petrologia magnética e química mineral em silicatos minerais óxido de Fe de rochas plutônicas. Além de uma vasta pesquisa de artigos científicos, mapas geológicos disponíveis, dissertações de mestrado e teses de doutorado, sobre a geologia de terrenos arqueanos com enfoque em estudos de petrologia magnética.

1.6.2 Amostragem e trabalho de campo

Inicialmente, a proposta desta dissertação seria realizar o trabalho mapeamento geológico, caracterização petrográfica e estudos de petrologia magnética de rochas plutônicas máficas distribuídas entre as regiões de Ourilândia do Norte e Tucumã. Contudo, imprevistos causados pela pandemia ocasionou mudanças no cronograma deste trabalho, uma vez que para cumpri-lo dependeria de campanhas de campo, análises de química mineral e uso de laboratório. Em função deste empasse, o tema dessa dissertação foi revisto e direcionado para rochas que já tinham sido alvo de estudos preliminares (Felix *et al.* 2020). O estudo de petrologia magnética permanece como tema central neste trabalho, porém sua abordagem será voltada para um estudo integrado com os dados de trabalhos realizados em outras suítes de rochas neoarqueanas do Domínio Carajás (Cunha *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2022). As amostras estudadas nessa pesquisa foram retiradas do acervo do GPPG/UFPA, coletadas em campanhas de campo do PPGG, vinculados a linha de pesquisa do projeto “Evolução crustal e história tectônica dos granitoides arqueanos do Domínio Carajás, SE do Cráton Amazônico”. Amostras complementares foram coletadas durante a disciplina de mapeamento geológico II ofertada pela faculdade de geologia FAGEO/UFPA sob a coordenação do professor Davis Carvalho de Oliveira.

1.6.3 Petrografia e estudo de minerais opacos

Felix *et al.* (2020), por meio de sua dissertação de mestrado, iniciou o estudo petrográfico do Charnoquito Rio Seco, porém restringiu-se a identificação e classificação apenas de fases minerais silicáticas. A análise da composição modal foi realizada em 20 lâminas com o auxílio do contador de pontos automático do *software* Hardledge (versão worksation 1.3.6. 1111) em cerca de 2.000 pontos por amostra. A classificação dessas rochas seguiu as recomendações da

IUGS (Le Maitre 2002). O presente autor contribuiu na contagem e classificação dessas rochas, pois concomitante ao trabalho de Felix *et al.* (2020), o autor realizava estudos complementares de petrologia magnética e química mineral nas mesmas amostras.

Neste trabalho foi feita uma reavaliação de dados petrográficos e microestruturais previamente realizados, com ênfase no estudo textural de minerais óxidos de Fe-Ti. O estudo de minerais opacos foi realizado em microscópio óptico sob luz refletida em amostras representativas das variedades do Charnoquito Rio Seco, a fim de descrever sistematicamente seus aspectos texturais, relações de contato, intercrescimentos, exsolução e/ou substituição de minerais óxido de Fe e Ti, bem como sua relação com demais minerais.

1.6.4 Petrologia magnética

O estudo de susceptibilidade magnética (SM) foi realizado no laboratório de Petrologia Magnética do IG-UFPA por meio de um susceptibilímetro portátil SM-30, fabricado pela ZH instruments, cujas medidas podem ser feitas até a ordem de 10^{-7} de SI. Foram efetuadas cinco medidas de SM em superfícies planas de cada amostra analisada e considerada a média aritmética dessas medidas. O Excel® 2020, Minitab 19 (versão gratuita) e CorelDraw® X10 foram utilizados no tratamento dos dados, o que permitiu gerar histograma e polígono de frequência representativos dessas amostras.

1.6.5 Química mineral

As análises químicas quantitativas em silicatos (piroxênio, plagioclásio, anfibólio, etc.) e, principalmente, óxidos de Fe-Ti (magnetita, ilmenita), foram realizadas em lâminas polidas representativas das diversas variedades estudadas, utilizando microsonda eletrônica e espectroscopia dispersiva de raio-X (*Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy* - WDS), no Laboratório de Microanálises do IG/UFPA. Além disso, análises químicas pontuais semi-quantitativas foram realizadas nos mesmos conjuntos de minerais no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA, a partir de um espectrômetro de energia dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy* – EDS) acoplado a um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Este equipamento fornecerá imagens de elétrons retroespalhados com informações de relevo e contraste entre os diferentes tons de cinza que variam em função do número atômico dos elementos que compõe o mineral analisado.

CAPÍTULO 2 PETROLOGIA MAGNÉTICA E PARÂMETROS DE CRISTALIZAÇÃO DO CHARNOQUITO RIO SECO: IMPLICAÇÕES PARA EVOLUÇÃO DE GRANITOS NEOARQUEANOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS

RESUMO

Este trabalho apresenta novos dados de petrologia magnética e sobre as condições de cristalização (T , fO_2 e xH_2O) do magma gerador da sequência charnoquítica Rio Seco, e que compreendeu um estudo detalhado de evolução textural de silicatos e óxido de Fe-Ti. O corpo é intrusivo em granitoides mesoarqueanos (2,88 Ga) e foi subdividido em quatro tipos petrográficos: (i) gabronorito; (ii) orto-clinopiroxênio granodiorito; (iii) clinopiroxênio-hornblenda monzogranito; (iv) hornblenda-biotita monzogranito. Os valores magnéticos variam entre $0,231 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ SI e mostra caráter bimodal. As rochas com piroxênio concentram-se na população magnética A, e os valores de susceptibilidade magnética variam entre $3,2 \times 10^{-3}$ e $22,1 \times 10^{-3}$ SI, compatíveis com os valores definidos para granitos neoarqueanos oxidados da Província Carajás. As rochas desprovidas de piroxênio definem a população magnética B, com valores mais baixos, entre $0,231 \times 10^{-3}$ e $0,309 \times 10^{-3}$ SI, e estão compreendidos pela faixa de valores definida para os granitos reduzidos. A temperatura de cristalização do anfibólio varia de 713 a 809°C e a pressão de colocação varia de 81 a 300 MPa. A fO_2 (ΔNNO) varia de -0,4 a +2,4 e o $\log fO_2$ de -12,0 a -16,0. A baixa razão Fe/(Fe+Mg) em hornblenda e biotita confirma as condições oxidantes dessas rochas que pertencem a série à magnetita. O higrômetro utilizado indicou conteúdo de água no magma variando de 4,3 a 6,1%. As texturas do tipo corona registram o desequilíbrio físico-químico entre silicatos e favorecem a formação de minerais magnéticos nas rochas com piroxênio. As rochas da população A apresentam conteúdo modal de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7% com diferentes graus de exsolução da ilmenita em estágio magmático. A população magnética B mostra menores conteúdos de minerais opacos (<0,3%) e é caracterizada pela presença de goethita formadas por processos de oxi-hidratação em estágio tardi- a pós-magmático. O estudo de evolução textural e mineralógica reforça o modelo de cristalização fracionada proposto em trabalho anterior e explica a abundância de minerais óxido de Fe-Ti na variedade com ortopiroxênio, conferindo caráter oxidado dessas rochas. O Charnokito Rio Seco tem sua colocação controlada por um sistema de lineamentos de comportamento dúctil-ruptil, e que é favorável à interpretação de um pluton colocado em níveis crustais rasos. Em condições de crosta mais profunda, a assimilação de componentes crustais pode originar magmatismo ferroso.

Palavras-chave: petrologia magnética; química mineral; granitoides neoarqueanos; Província Carajás.

ABSTRACT

This work presents new magnetic petrological data and crystallization conditions (T , fO_2 and xH_2O) of the Rio Seco Charnockite from a detailed study of the textural evolution of silicates and Fe-Ti oxide. The body is intrusive in Mesoarchean granitoids (2.88 Ga) and was subdivided into four petrographic types: (i) gabbro-norite; (ii) ortho-clinopyroxene granodiorite; (iii) clinopyroxene-hornblende monzogranite; (iv) hornblende-biotite monzogranite. The magnetic values range from 0.231×10^{-3} to 22.1×10^{-3} SIv and shows bimodal character. Pyroxene-bearing rocks are concentrated in magnetic population A, whose magnetic susceptibility values range from 3.2×10^{-3} to 22.1×10^{-3} , and are compatible with the SM values defined for oxidized Neoarchean granites of the Carajás Province. Pyroxene-deprived rocks define magnetic population B, with lower values, between 0.231×10^{-3} and 0.309×10^{-3} , and are included in the range of values defined for reduced granites. The amphibole crystallization temperature ranges from 713 to 809°C and the emplacement pressure ranges from 81 to 300 MPa. The fO_2 (ΔNNO) ranges from -0.4 to +2.4 and the $\log fO_2$ from -12.0 to -16.0. The low Fe/(Fe+Mg) ratio in hornblende and biotite confirms the oxidizing conditions of these rocks, which belong to the magnetite series. The hygrometer used indicated water content in the magma ranging from 4.3 to 6.1% wt. The corona-type textures record the physical-chemical disequilibrium between silicates and favor the formation of magnetic minerals in the rocks with pyroxene. The rocks of population A present modal content of opaque minerals ranging from 0.2 to 1.7% with different degrees of exsolution of ilmenite in the magmatic stage (magnetite-ulvöspinel series). The magnetic population B shows lower contents of opaque minerals (<0.3%) and is characterized by the presence of zoned goethite formed by oxyhydration processes in the late to post-magmatic stage. The study of textural and mineralogical evolution reinforces the fractional crystallization model proposed in a previous work and explains the abundance of Fe-Ti oxide minerals in the variety with orthopyroxene, giving these rocks an oxidized character. The Charnockite Rio Seco has its emplacement controlled by a system of lineaments with ductile-ruptile behavior, which is favorable to the interpretation of a pluton emplaced at shallow crustal levels. In deeper crustal conditions, the assimilation of crustal components may give rise to ferrous magmatism.

Keywords: magnetic petrology; mineral chemistry; neoarchean granitoids; Carajás Province.

2.1 INTRODUÇÃO

Recentemente, Oliveira *et al.* (2022,2023) apresentou uma nova proposta estratigráfica para Província Carajás e sua compartimentação geral foi subdividida em: (i) Terreno Canaã dos Carajás (TCC), (ii) Terreno Sapucaia (TS) e (iii) Bacia Carajás. No TCC, mais especificamente na área de Ourilândia do Norte, ocorre um corpo alongado na direção NE-SW formado por granitoides e rochas máficas, intrusivo em leucogranitos e *sanukitoides* de idade mesoarqueana. Felix *et al.* (2020) definiu esta sequência de rochas como uma série charnoquítica denominada de Rio Seco por Oliveira *et al.* (2022,2023). Pequenas intrusões satélites de direção geral E-W também fazem parte desta sequência.

Estudos de petrologia magnética realizados em granitoides neoarqueanos definiu a natureza oxidado e reduzido de seus magmas formadores (Oliveira *et al.* 2018), e sugeriram que a origem dos granitos hidratados tipo A pode estar relacionada aos charnoquitos presentes nesse segmento crustal da Província Carajás (Dall'Agnol *et al.* 2017). Apesar destas importantes contribuições, ainda existem algumas lacunas no conhecimento sobre a relação petrogenética entre tais grupos de rocha. Na busca de uma melhor definição sobre os aspectos evolutivos destes granitoides, é apresentado neste trabalho novos dados de petrologia magnética, combinados com aqueles de análise químico-mineralógica e evolução textural de silicatos e óxido de Fe-Ti do Charnoquito Rio Seco. A partir dos dados analíticos quantitativos apresentados por Felix *et al.* (2020), foi estimada e discutida as condições de cristalização, em especial sobre o estado de oxidação do magma gerador da sequência de rochas estudada. Para determinar a natureza de seu magmatismo, os dados gerados foram integrados aqueles de outras unidades neoarqueanas da Província Carajás (granitos tipo-A “hidratados”), cujos magmas foram formados sob diferentes condições de fugacidade de oxigênio (oxidados e reduzidos) e que tem reflexo em suas assinaturas geoquímicas (tipologia) contrastantes (magnesianos e ferrosos).

2.2 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Carajás representa o principal núcleo arqueano preservado do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981). Foi inicialmente inserida no domínio arqueano da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004) e posteriormente subdividida em dois domínios tectônicos distintos por diversos autores (Santos 2003, Vaquez *et al.* 2008, Dall'Agnol *et al.* 2013, Oliveira *et al.* 2023). Durante as últimas décadas diversos modelos de compartimentação tectônica foram propostos para a PC e a sua porção sul foi chamada de Domínio Rio Maria e a porção norte de Domínio Carajás (Santos 2003, Vasquez *et al.* 2008, Dall'Agnol *et al.* 2013). Recentemente, Oliveira *et al.* (2022, 2023), propôs uma nova compartimentação estratigráfica para PC que foi subdividida em: (i) Terreno Canaã dos Carajás (TCC), (ii) Terreno Sapucaia (TS) e (iii) Bacia Carajás. Os Domínios Carajás (norte) e Rio Maria (sul) são mantidos, porém eles são compostos por terrenos e não subdomínios como sugerido por Dall'Agnol *et al.* (2013). O Domínio Carajás é composto pela Bacia Carajás e pelos Terrenos Canaã dos Carajás e Sapucaia, enquanto o DRM é compreendido pelo Terreno Granito-Greenstone Rio Maria (Fig.3). Esta nova proposta de compartimentação tectônica da PC é apresentada em detalhes na tese de doutorado de Silva (2022).

Na região de Ourilândia do Norte, o avanço do conhecimento geológico se deu por meio da individualização de granitoides mesoarqueanos anteriormente atribuídos ao Complexo Xingu e ao Granodiorito Rio Maria (Silva *et al.* 1974, Vasquez & Rosa Costa 2008). Estudos recentes identificaram que esta área é caracterizada por um diversificado conjunto de granitoides (Silva-Silva *et al.* 2020, Felix *et al.* 2020, Silva *et al.* 2022, Oliveira *et al.* 2023) e que o embasamento é representado por uma crosta composta por tonalitos biotíticos de afinidade TTG e leucogranodioritos, além da ocorrência de ortognaisses migmatíticos do Complexo Xingu.

Eventos magmáticos de idade meso-a neoarqueanos são registrados na região de Ourilândia do Norte, sendo os mais antigos associados a formação de *greenstone belts* e suítes TTG entre 3,07 e 2,92 Ga (Avelar *et al.* 1999, Almeida *et al.* 2011, Silva *et al.* 2023), seguido pelo evento responsável pela formação de suítes *sanukitoides*, rochas cálcioalcalinas de alto-k e granitos híbridos. Este evento ocorreu entre 2,89 e 2,83 Ga e marca ainda o intenso metamorfismo de rochas granulíticas e migmatíticas (Marangoanha *et al.* 2019, Silva *et al.* 2021). Por fim, os estágios finais do magmatismo arqueano, entre 2,76 e 2,72 Ga, é marcado pelo desenvolvimento de sequências metavulcanossedimentares da Bacia de Carajás, além de

diversas intrusões máfica-ultramáfica, granitóides subalcalinos deformados e a formação de charnoquitos e suítes máficas correlatas (Pidgeon 2000, Feio *et al.* 2013, Tavares *et al.* 2018).

Recentemente, Felix *et al.* (2023) baseado no mapa proposto por Oliveira *et al.* (2022), agrupou à Suíte Charnoquítica Pium os plútons do Diopsídio Norito Pium (2,75-2,73 Ga; Ricci 2006, Santos *et al.* 2013, Feio *et al.* 2012), Enderbito Café (2,75-2,73 Ga; Marangoanha *et al.* 2019a), Charnoquito Rio Seco (sem datação, Felix *et al.* 2020, Oliveira *et al.* 2022), e as rochas máfico-enderbíticas de Sapucaia, todas com idade $\sim 2,74 \pm 0,01$ Ga (Teixeira 2013, Santos *et al.* 2013, Feio *et al.* 2012, Marangoanha *et al.* 2019). Essas rochas ocorrem associadas a granitos hidratados tipo A, e sua petrogênese pode estar relacionada (Feio *et al.* 2012, Dall'Agnol *et al.* 2017). Neste estudo, discutimos as semelhanças e diferenças entre essas suítes intrusivas, apoiados no trabalho de Felix *et al.* (2020). O Charnoquito Rio Seco e rochas associadas da Suíte Planalto foram formalizados como uma unidade litoestratigráfica em Oliveira *et al.* (2022). São granitóides com presença de piroxênio e afinidade charnoquíticas *sensu lato* identificados nos arredores de Ourilândia do Norte e da Vila Planalto (Felix *et al.* 2020, Dall'Agnol *et al.* 2017). Apesar de ainda não ter sido datado na área de Ourilândia do Norte, as rochas afins aflorantes próximo à Vila Planalto foram datadas em 2,73 Ga por U-Pb LA-ICP-MS em zircão, interpretada como idade de cristalização (Feio *et al.* 2012). Em algumas áreas, essas rochas ocorrem intimamente relacionadas aos granitos subalcalinos tipo-A (Feio *et al.* 2012).

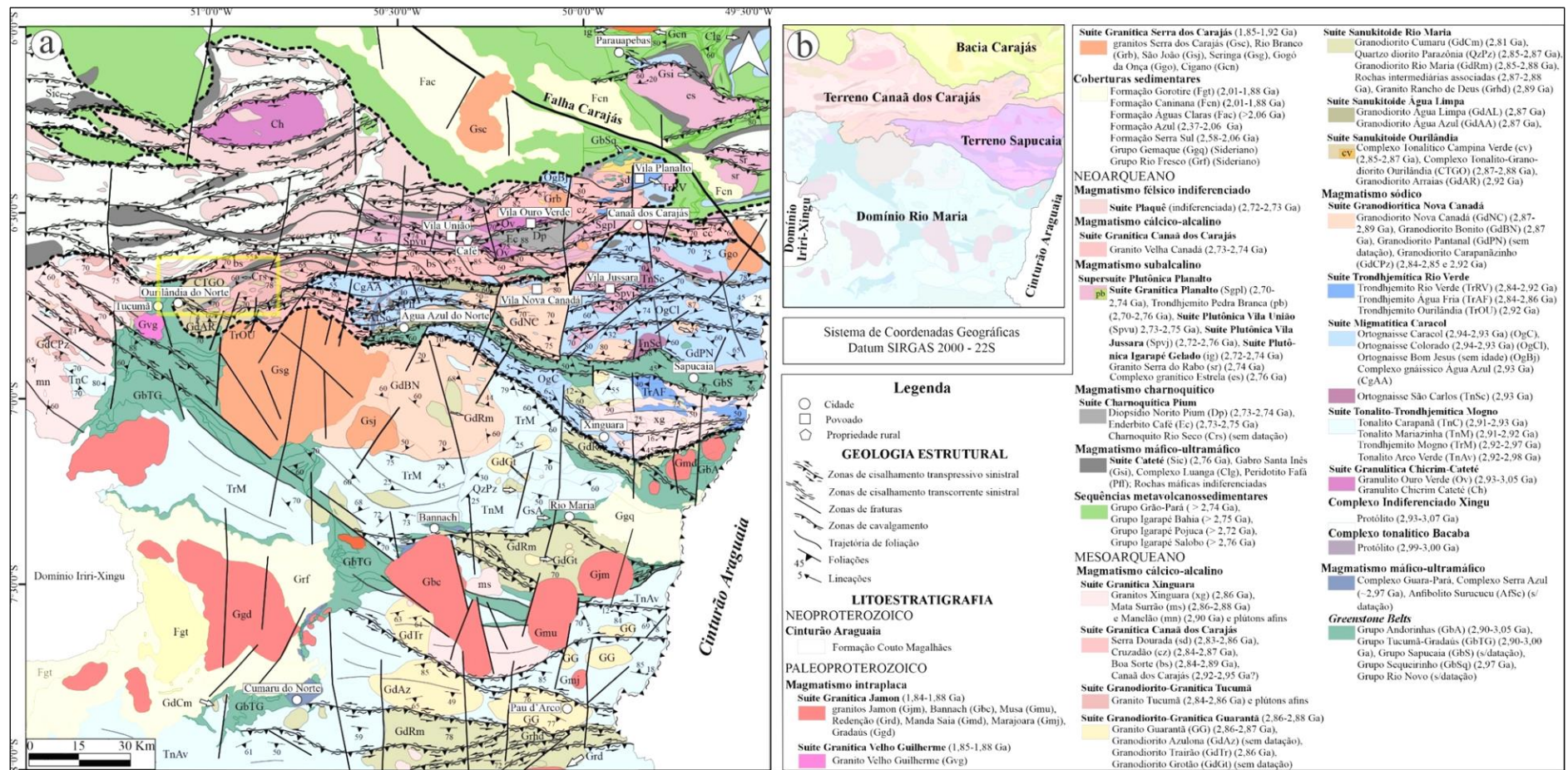


Figura 3 - Contexto tectônico regional: (a) Mapa geológico da Província Carajás e coluna litoestratigráfica; (b) Proposta de compartimentação tectônica da Província Carajás.

Fontes: Oliveira *et al.* (2022,2023), (Silva 2022).

2.3 ASPECTOS GERAIS DO CHARNOQUITO RIO SECO

A série charnoquítica Rio Seco forma quatro intrusões em leucogranitos e *sanukitoides* de idade mesoarqueana e é dividida em um plúton principal e três stocks associados Felix *et al.* (2020). Os plútons são alongados na direção NE-SW ou E-W e o corpo principal apresenta 12 km de extensão e 2,5 km de largura (Fig. 4), composto por granitoides com piroxênio e um membro máfico associado. O granito sem piroxênio forma três stocks lenticulares de ~3 Km. Em geral, apresentam coloração cinza escura e texturas magmática bem preservada. Às margens dos plútons nota-se trama planar definida pela orientação preferencial de feldspatos e minerais máficos, com direção NE-SW/E-W e caimento subvertical (70-85°), o que é compatível com o padrão das zonas de cisalhamento de escala regional.

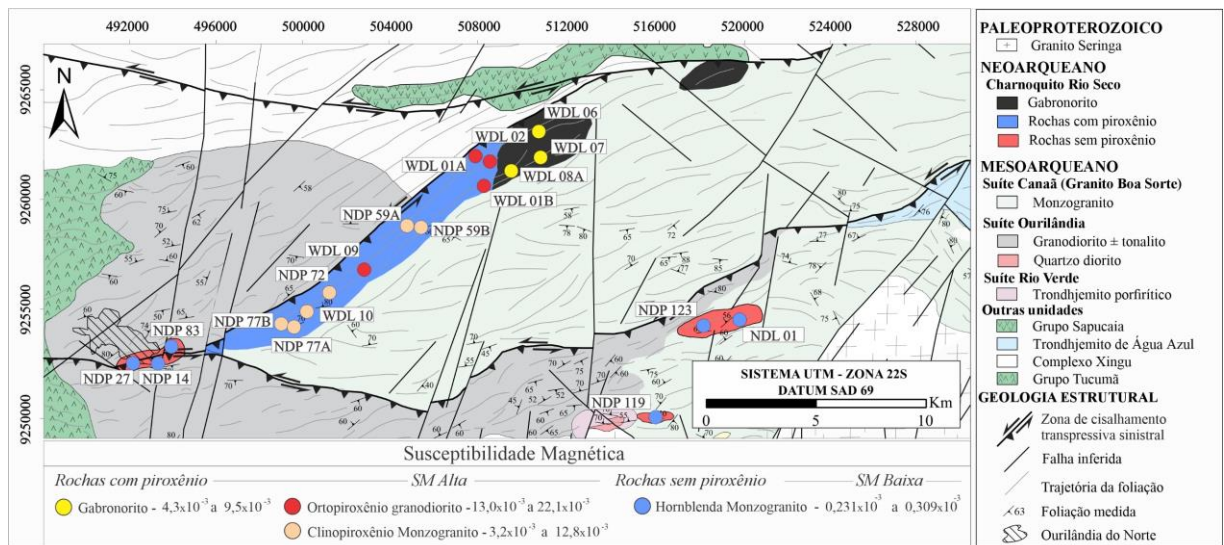


Figura 4 - Mapa geológico da área de Ourilândia do Norte em escala de semi-detalle (1:50.000) com destaque para o Charnokito Rio Seco. Modificado de Silva *et al.* (2022).

Tabela 1 - Composição modal do Charnoquito Rio Seco

Grupos	Rochas com piroxênio																Rochas sem piroxênio						
Variedades	Gabronorito					Opx Granodiorito					Cpx Monzogranito						Hbl Monzogranito						
Amostra	WDL 6	WDL 7	WDL 08A	WDL 08B	Média	WDL 01A	WDL 01B	WDL 9	WDL 2	Média	NDP 59A	NDP 59B	NDP 77A	NDP 72	NDP 77B	WDL 10	Média	NDP 123	NDP 27	NDP 83	NDP 119	NLD 1	Média
Quartzo	2,1	4,7	11,2	9,1	6,8	17,2	15,8	19,7	20,9	18,4	28,9	29,2	25,7	30,1	23,9	20,9	26,4	30,0	30,6	33,8	28,2	28,5	30,2
Alcali-feldspato	-	2,3	1,5	6,4	3,4	6,1	10,5	5,8	12,3	8,7	16,7	17,5	19,9	10,8	19,5	22,5	17,8	14,6	20,3	18,1	14,9	27,3	19,0
Plagioclásio	66,6	65,1	54,5	56,0	60,5	48,0	51,7	48,8	46,4	48,7	32,6	28,2	29,0	30,9	28,8	31,4	30,1	25,6	20,8	21,0	25,1	22,4	23,0
Biotita	1,0	1,0	1,3	1,2	1,1	1,3	1,9	1,6	1,5	1,5	1,2	2,6	2,9	4,0	2,6	3,3	2,8	1,0	6,4	2,4	3,4	1,1	2,9
Anfibólio	7,6	4,1	6,9	2,3	5,2	6,5	9,5	10,2	9,5	8,9	4,7	3,2	2,6	3,3	7,6	3,3	4,1	26,5	20,7	16,2	26,9	19,0	21,9
Ortopiroxênio	4,0	10,9	7,4	5,8	7,0	9,2	3,9	3,4	3,4	5,0	-	-	-	-	-	0,7	0,7	-	-	-	-	-	-
Clinopiroxênio	12,9	11,0	16,6	17,2	14,4	10,4	5,4	9,2	4,8	7,4	14,7	18,3	19,0	20,7	16,1	16,7	17,6	0,5	1,2	6,1	-	-	2,6
Olivina	5,8	0,5	Tr	1,4	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Titanita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	Tr	0,5	0,8	1,2	0,9
Allanita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr	-	-	-	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	0,1
Minerais opacos	0,2	0,7	0,8	0,8	0,6	1,5	1,4	1,5	1,2	1,4	1,5	1,0	0,9	0,2	1,8	1,0	1,1	-	-	0,3	-	0,3	0,3
Epidoto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,6	-	1,6	0,6	0,4	0,8
Apatita	Tr	Tr	Tr	-	-	Tr	0,2	Tr	0,1		-	-	-	Tr	-	0,1	0,1	Tr	-	-	-	0,1	0,1
Máficos	31,4	28,0	32,9	28,6	30,2	28,7	22,0	25,8	20,3		22,0	25,1	25,4	28,2	28,0	25,1	25,6	28,0	28,3	25,0	30,3	20,3	26,4
Px (Opx + Cpx)	16,9	21,9	24,0	23,0	21,4	19,5	9,3	12,6	8,2	12,4	14,7	18,3	19,0	20,7	16,1	17,4	17,7	0,5	1,2	6,1	0,0	0,0	1,6
Hbl + Qz - (Px)	-7,2	-3,8	-5,9	-11,6	-7,1	4,2	16,0	17,3	22,2	14,9	18,9	14,1	9,3	12,7	15,3	6,9	12,9	56,0	50,1	43,9	55,1	47,4	50,5
Abreviações: Opx = ortopiroxênio; Cpx = clinopiroxênio; Hbl = hornblenda; Qz = quartzo																							

Abreviações: Opx = ortopiroxênio; Cpx = clinopiroxênio; Hbl = hornblenda; Qz = quartzo

2.3.1. Petrografia e análise textural

A classificação do charnoquito Rio Seco foi realizada a partir da combinação entre o estudo petrográfico e a análise do conteúdo modal (Tab. 1). Suas composições foram plotadas no diagrama Q-A-P, de acordo com a *International Union of Geological Sciences* – IUGS (Le Maitre 2002), e são apresentadas em contraste com campos de rochas afins neoarquenais de caráter oxidado ou reduzido que ocorrem no Domínio Canaã dos Carajás (Fig. 5). Esta série é definida por gabronoritos, ortopiroxênio granodioritos, clinopiroxênio monzogranitos e hornblenda monzogranitos Felix *et al.* (2020). De modo geral, essas rochas são leucocráticas ($20 < M' < 33$) e os principais minerais máficos são piroxênio, anfibólio e biotita. Os minerais acessórios primários são allanita, epidoto, zircão, apatita, magnetita e ilmenita. A olivina e a titanita ocorrem no gabronorito e anfibólio monzogranito, respectivamente.

Os granitoides com piroxênio apresentam textura geral equigranular hipidiomórfica e suas principais feições texturais podem ser observadas na Fig. 6a-f. A variedade anfibólio monzogranito exibe textura inequigranular hipidiomórfica (Fig. 6g,h) e é marcada pela ausência de ortopiroxênio com ligeiras ocorrências de clinopiroxênio. As rochas com presença de os orto- e clinopiroxênio apresentam texturas de exsolução entre eles, caracterizadas por lamelas de clinopiroxênio hospedadas em ortopiroxênio idiomórfico. Adicionalmente, mostram textura em corona indicada por núcleo de ortopiroxênio envoltos por clinopiroxênio, e este último com borda de substituição e lamelas de hornblenda (Fig. 6d,e). Inclusões de epidoto, apatita e minerais opacos são comuns em piroxênios e anfibólios. A substituição de piroxênio por anfibólio é frequentemente observada no hornblenda-monzogranito (Fig. 6g). Estruturas de

deformação, na forma de microfratura intragranular em plagioclásio, preenchidas por minerais residuais da matriz, e zoneamento do tipo normal são observados nas rochas sem piroxênio, além de texturas de intercrescimento granofríco e microestruturas núcleo-manto em cristais de quartzo. Finas inclusões quartzo ocorrem associada a desestabilização de anfibólios. A biotita apresenta microestrutura de transformação a partir do anfibólio (biotitização) ou sob forma de alteração para clorita (cloritização). Apatita e zircão ocorrem como inclusões em feldspatos e minerais máficos, e o epidoto é parcialmente circundado por biotita e hornblenda.

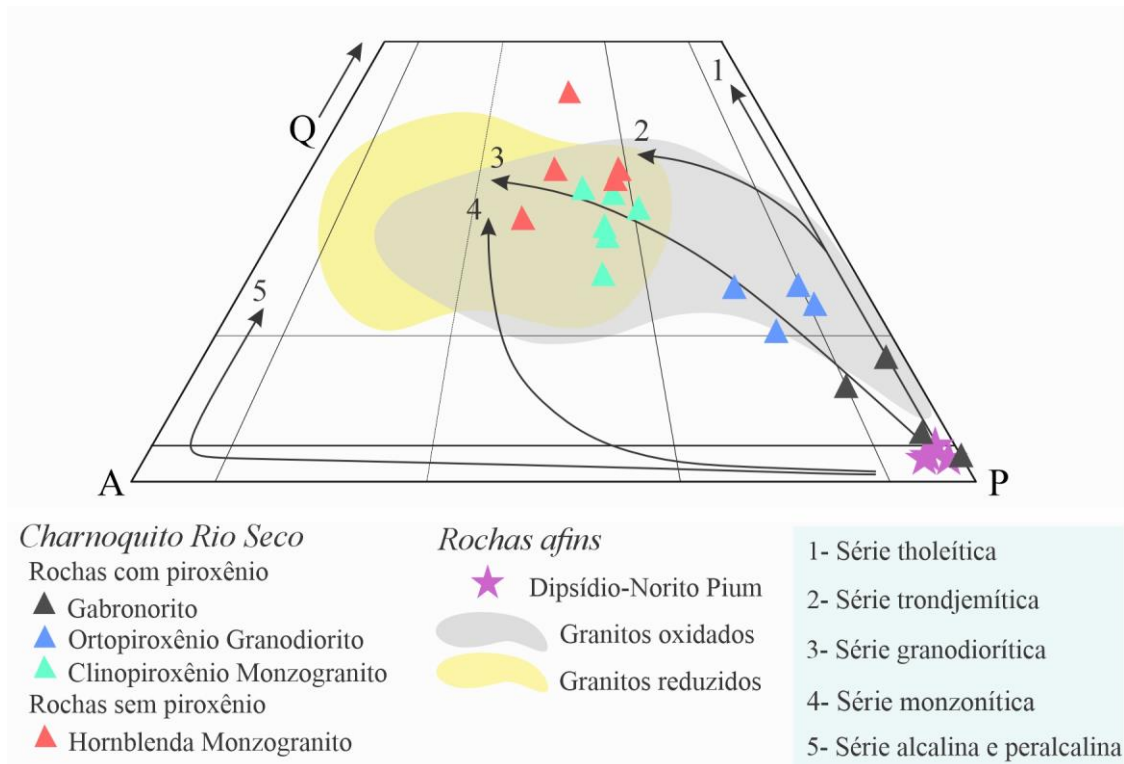


Figura 5 - Diagrama Q-A-P mostrando a classificação das rochas do Charnoquito Rio Seco, de acordo com as recomendações da IUGS (Le Maitre 2002). Destaque para o campo de rochas neoarqueanas oxidadas e reduzidas (Cunha *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2022).

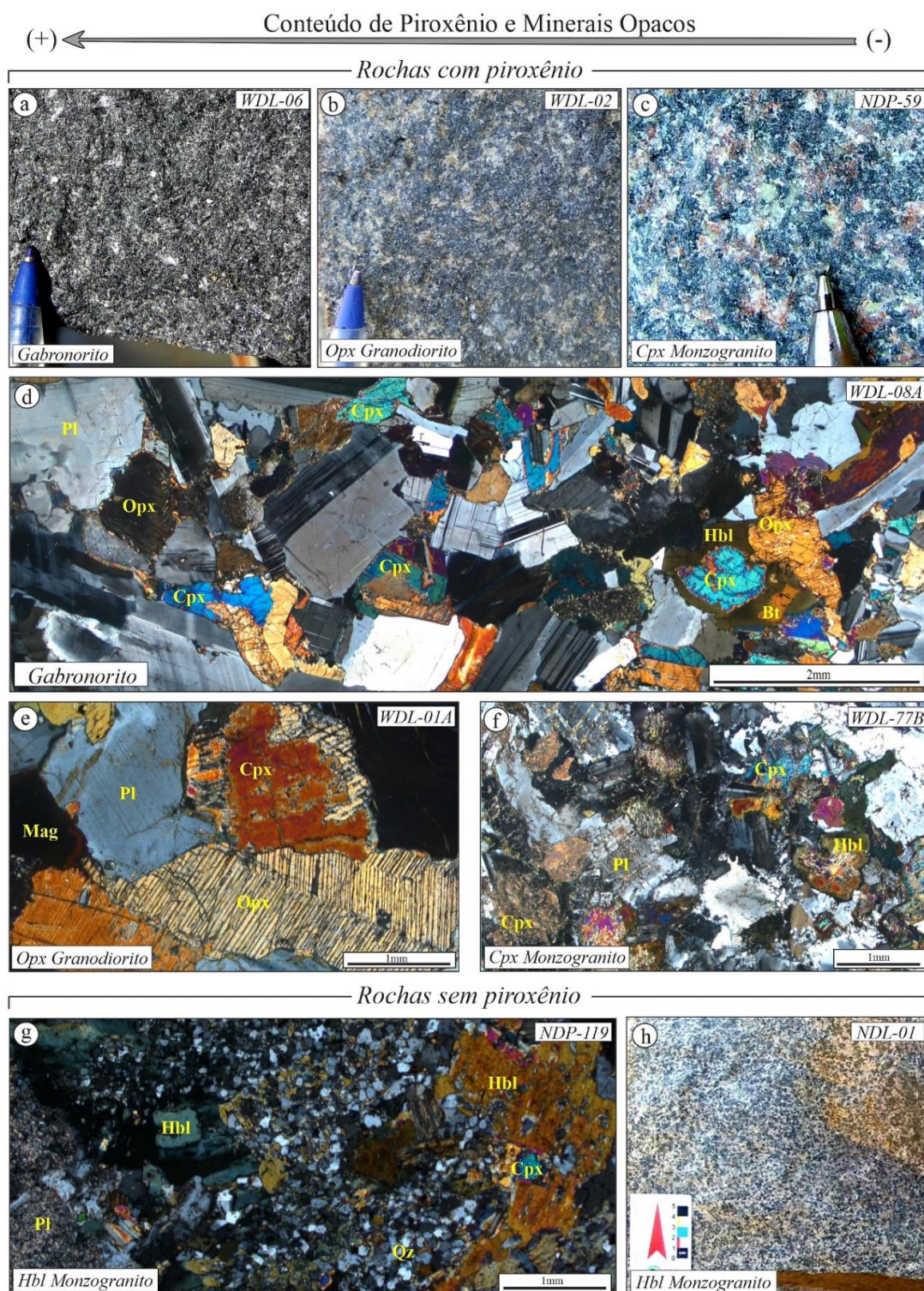


Figura 6 - Aspectos texturais e mineralógicos do Charnokito Rio Seco: rochas com piroxênio: (a,b e c) aspectos mesoscópicos do grabronorito, ortopiroxênio granodiorito e clinopiroxênio monzogranito com textura granular hipidiomórfica; (d) fotomicrografia de textura geral hipiomórfica mostrando bordas de reação entre piroxênios e anfibólio e biotitas associadas; (e) magnetita inclusa em clinopiroxênio e texturas de exsolução entre piroxênios; (f) diferentes graus de alteração de clinopiroxênio para anfibólio e plagioclásio intensamente saussuritizado. Rochas sem piroxênio: (h) aspectos mesoscópicos do hornblenda monzogranito; e (g) textura geral inequigranular hipidiomórfica com plagioclásio alterado, relíquias de clinopiroxênio e matriz quartzo-feldspática.

2.4 PETROLOGIA MAGNÉTICA

Os valores de susceptibilidade magnética (SM) do Charnoquito Rio Seco variam de $22,1 \times 10^{-3}$ a $0,231 \times 10^{-3}$ SI (Tab. 2) e mostram um comportamento bimodal no histograma de frequência, onde as maiores concentrações de SM estão entre log -1,8 e -3,6 (Fig. 7). Foram identificadas duas populações magnéticas: a população magnética A é composta pelas rochas com piroxênio e concentra os maiores valores de SM, que variam entre $3,2 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ SI (log -2,49 a -1,65), enquanto a população B compreende as amostras da variedade hornblenda monzogranito e apresentam os menores valores magnéticos que variam entre $0,231 \times 10^{-3}$ a $0,309 \times 10^{-3}$ SI (log -3,63 a -3,50). Nas rochas da população magnética A, o gabronorito, ortopiroxênio-granodiorito e clinopiroxênio-mon zodiorito apresentam valores médios de SM em $7,90 \times 10^{-3}$, $17,18 \times 10^{-3}$ e $7,17 \times 10^{-3}$ SI respectivamente, e representam 73,3% das amostras analisadas. Por outro lado, a variedade hornblenda monzogranito que define a população magnética B mostra valor médio de SM em $0,28 \times 10^{-3}$ SI e representa 26,6% das amostras analisadas. As amostras da população A apresentam conteúdos modais de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7% com ampla predominância de magnetita e ilmenita, enquanto a população magnética B tem menor conteúdo modal de minerais opacos (<0,3%), onde é marcante a presença de goethita.

Tabela 2 - Valores de susceptibilidade magnética (SM) e dos principais óxidos do Charnoquito Rio Seco

Pop. Magnética	População A										População B									
Variedades	Gabronorito					Opx Granodiorito					Cpx Monzogranito					Hbl Monzogranito				
	WDL	WDL	WDL	WDL		WDL	WDL	WDL	WDL		NDP	NDP	WDL		NDP	NDP	NDP	NLD		
Amostra	6	7	08A	08B	Média	01A	01B	9	2	Média	59A	77A	10	Média	123	27	119	1	Média	
SMx10 ⁻³	4,30	9,50	9,30	8,20	7,90	18,40	15,20	13,00	22,10	17,18	12,80	5,50	3,20	7,17	0,23	0,31	0,28	0,30	0,28	
Log K (SI)	-2,36	-2,02	-2,03	-2,09	-2,13	-1,73	-1,82	-1,89	-1,65	-1,77	-1,89	-2,26	-2,50	-2,22	-3,64	-3,51	-3,56	-3,53	-3,56	
Óxido (%)																				
SiO ₂	55,60	56,70	57,2	-	56,15	59,80	-	61,50	64,30	61,87	63,60	63,97	-	63,80	62,36	63,86	64,64	-	63,62	
FeOt	7,10	7,90	7,20	-	7,40	8,80	-	7,30	6,80	7,63	7,00	6,80	-	6,69	8,11	6,92	6,53	-	7,19	
MgO	6,70	4,80	4,8	-	5,75	3,30	-	2,90	2,40	2,87	2,50	2,31	-	2,40	2,17	2,07	1,97	-	2,07	
TiO ₂	0,30	0,40	0,40	-	0,37	0,70	-	0,60	0,60	0,63	0,62	0,61	-	0,61	0,70	0,57	0,62	-	0,63	
FeOt/(FeOt+MgO)	0,51	0,62	0,60		0,58	0,73		0,72	0,74	0,73	0,74	0,75		0,74	0,79	0,77	0,77		0,78	

Abreviações: pop = população; K (SI) = valor médio de SM em volume de cada amostra no Sistema Internacional.

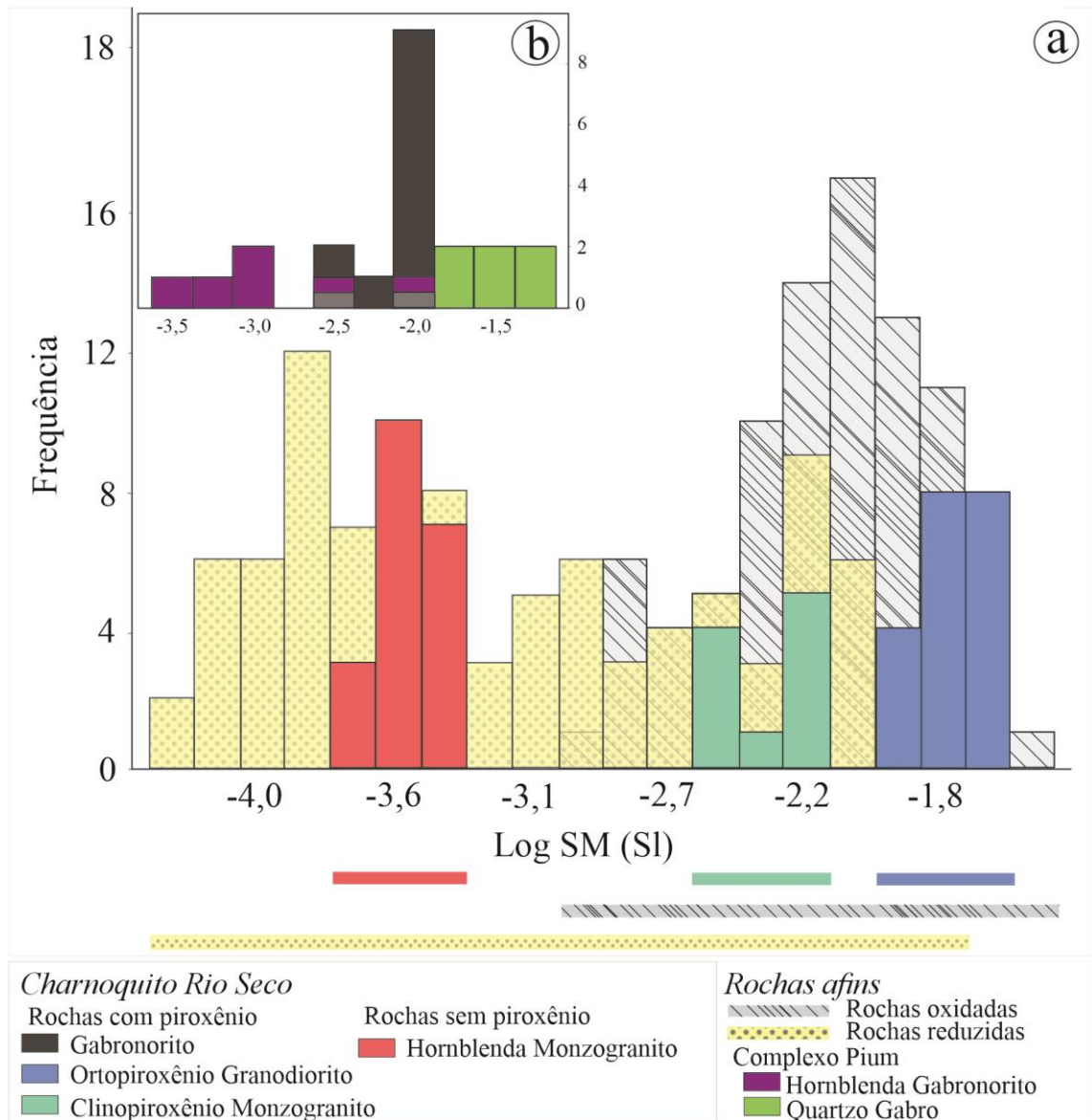


Figura 7 - Histograma de frequência mostrando comportamento bimodal para a susceptibilidade magnética do Charnoquito Rio Seco: (a) histograma de frequência dos charnoquitos em contraste com granitos neoarqueanos de caráter oxidado e reduzido do Domínio Carajás (Cunha *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2022); (b) histograma de frequência mostrando o comportamento magnético de gabronoritos da série charnoquítica e rochas máficas do Diopsídio-Norito Pium (Santos *et al.* 2013).

2.4.1 Relações entre SM, conteúdo modal e composição química

Os valores modais de minerais opacos, piroxênios, quartzo e anfibólio, além da composição química média do óxido Fe_2O_3 do Charnoquito Rio Seco são apresentados na Tab. 2. A média do conteúdo modal de minerais opacos é moderada no gabronorito (0,6%), relativamente alta no ortopiroxênio-granodiorito (1,4%) e clinopiroxênio monzogranito (1,1%), e baixa no hornblenda monzogranito (0,3%). Em geral, a relação entre o conteúdo modal de minerais opacos com os valores de SM mostra correlação positiva (Fig. 8a). A amostra WDL-02 apresenta comportamento anômalo com valor de SM em $22,1 \times 10^{-3}$ e conteúdo modal de opacos menor que as demais amostras de mesma variedade. As rochas com piroxênio, representantes da população magnética A, apresentam correlação negativa entre os valores de SM e o conteúdo modal deste mineral (Fig. 8b), indicando que os orto-e clinopiroxênio não controlam a assinatura magnética nas amostras em que estão presentes. Esse comportamento é especialmente observado no gabronorito, em que o conteúdo modal médio de piroxênios é de 21,4%, porém mostram valores de SM relativamente baixos (Tab 2; Fig. 8b). Por outro lado, a relação entre os valores de SM e o conteúdo modal de Hbl+Qz-(Px) mostram correlação positiva para as rochas da população A e um padrão flat vertical para as rochas da população B, indicando que os ferromagnesianos não influenciam nos valores de SM no hornblenda monzogranito (Fig 6c). Contudo, o conteúdo modal de piroxênios é empobrecido no hornblenda-monzogranito (população magnética B) que apresenta elevadas concentrações de modais de anfibólio, e registram os menores valores de SM. A relação entre SM e o óxido Fe_2O_3 nas rochas com piroxênio (população A) apresenta correlação positiva, enquanto para as rochas da população magnética B apresentam um padrão flat vertical (Fig 6d).

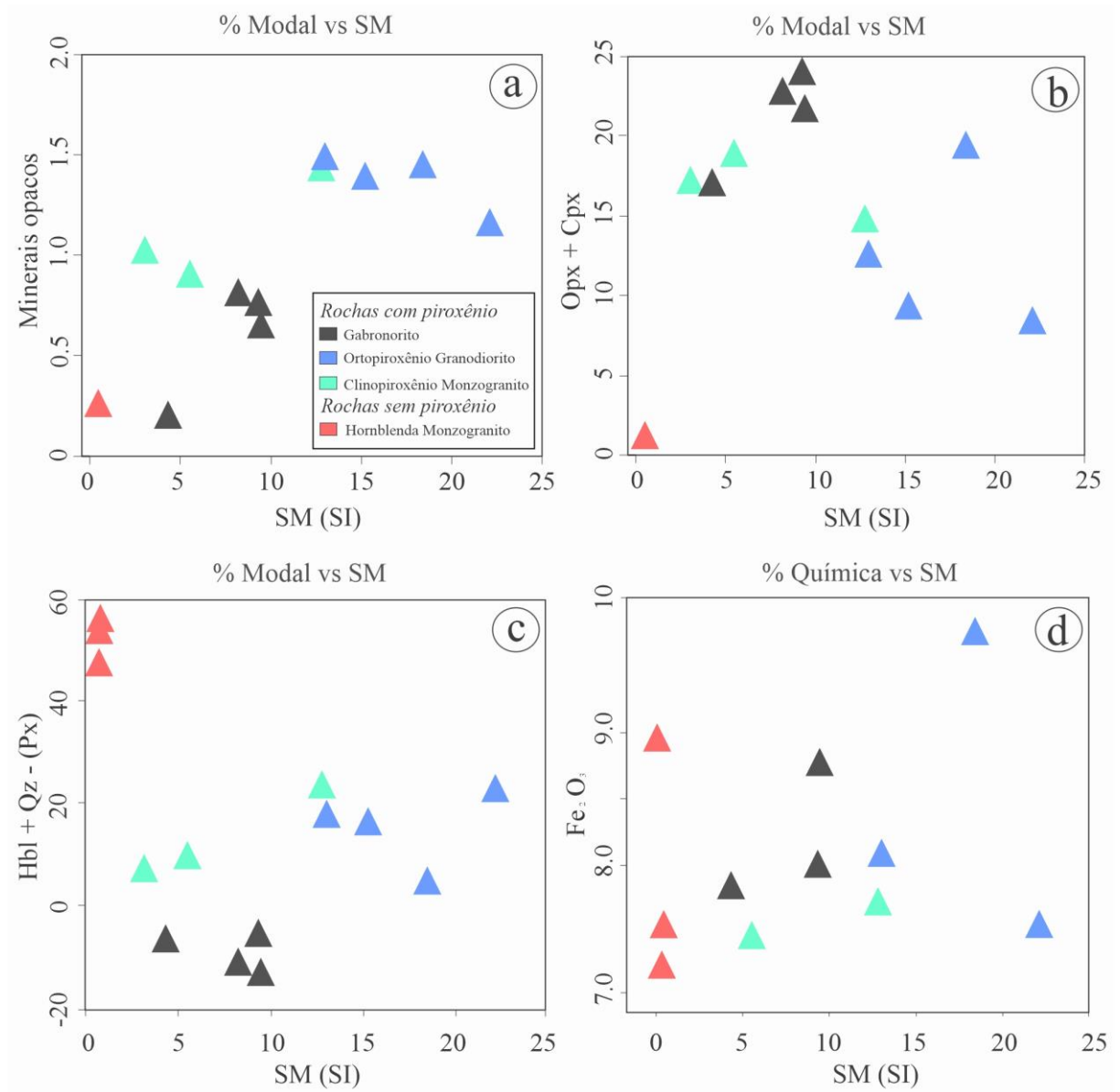


Figura 8 - Diagramas binários relacionando os valores de suscetibilidade magnética (SM) com conteúdo modal e composição química: a) minerais opacos vs SM; b) piroxênios vs SM; c) anfibólio mais quartzo menos piroxênios vs SM; e d) óxido de Fe_2O_3 vs SM.

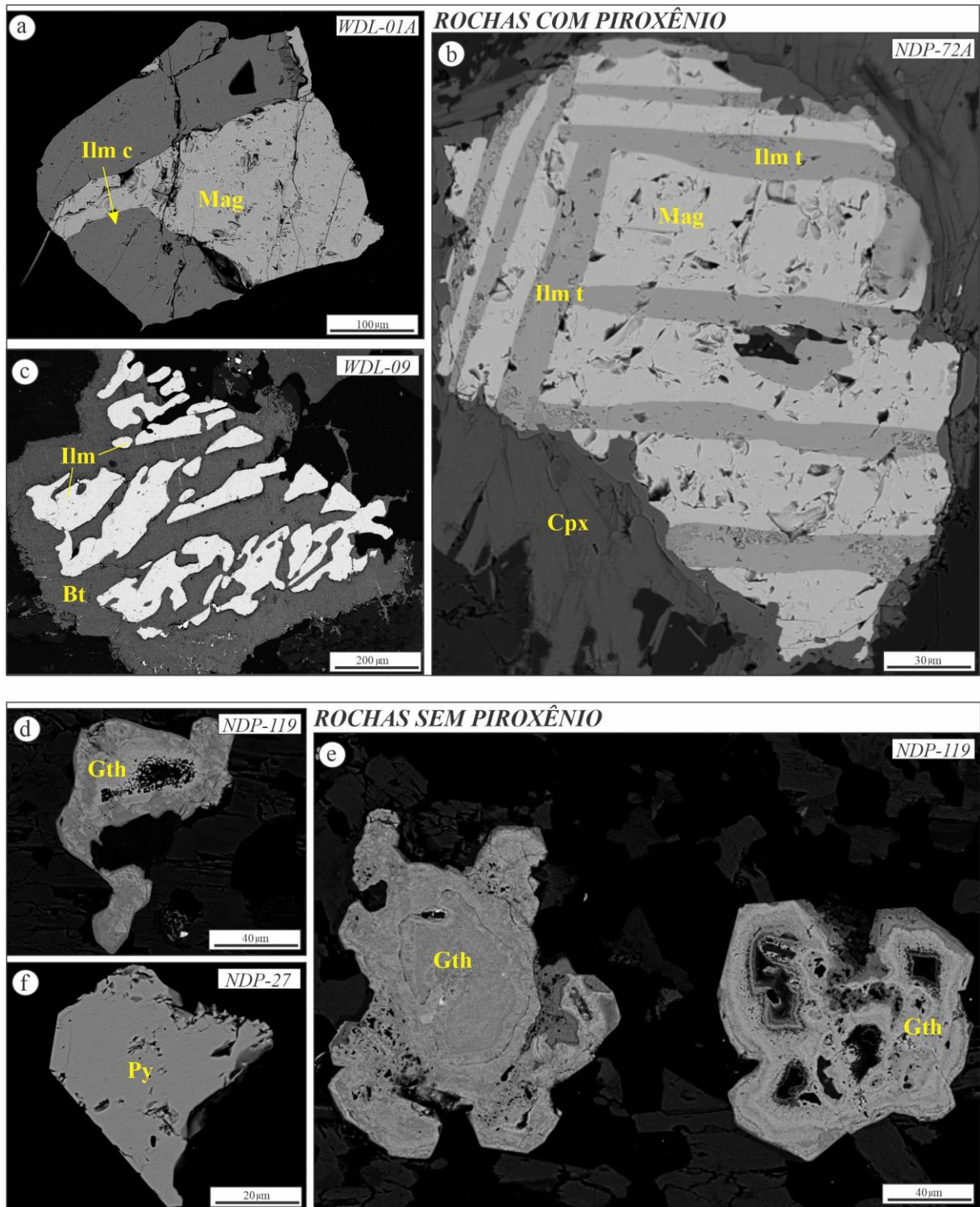


Figura 9 - Aspectos texturais dos minerais opacos do Charnokito Rio Seco. Imagens de elétrons retroespalhados (MEV): Rochas com piroxênio: (a) ilmenita composta (Ilm C) associada à magnetita; (b) magnetita hipidiomórfica com lamelas exsolvidas de ilmenita formando textura treliça (Ilm T); (c) ilmenita hipidiomórfica com textura esquelética inclusa em biotita. Rochas sem piroxênio: (d,e) goethita hipidiomórfica com zoneamento composicional; e (f) pirita hipiomórfica.

2.4.2 Petrografia de minerais opacos

Os minerais opacos do Charnoquito Rio Seco são representados por magnetita, hematita (martita), ilmenita, goethita e, pelos sulfetos pirita e calcopirita (Fig. 9). A população magnética A ($3,16 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ SI) é marcada pela presença de magnetita e ilmenita e conteúdo modal de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7%, enquanto a população magnética B ($0,231 \times 10^{-3}$ a $0,309 \times 10^{-3}$ SI) é caracterizada pela presença de goethita e o conteúdo modal de minerais opacos é $<0,3\%$. Existe notável mudança nas feições texturais de minerais de óxido Fe-Ti entre as populações, de modo que na população A a magnetita apresenta diferentes estágios de oxidação com substituição para martita ou associada a ilmenita (Fig. 9a,b). Na população B predomina goethita com zoneamento composicional (Fig. 9e).

Nas variedades com piroxênio, representadas pela população magnética A, a magnetita (Mag) ocorre como cristais hipidiomórficos, associada aos cristais de piroxênio (Fig. 9b), anfíbólio e biotita. Possuem dimensões de $\sim 1,0$ mm, por vezes martitizados (Fig. 9b) ou associada a IlmC de dimensões $<0,4$ mm. No hornblenda-monzogranito que define a população magnética B, a magnetita é rara, e quando ocorre, apresenta dimensões $> 0,5$ mm, raramente observada em bordas de cristais de goethita ou associada a sulfetos. A Ilmenita (Ilm) é hipidiomórfica, inclusa em biotita (Fig. 9c). A goethita (óxido-hidróxido de Fe) é o mineral opaco mais abundante na população magnética B e ocorre na forma hipidiomórfica, com cristais dimensões $<0,3$ mm. São frequentemente zonados (Fig. 9d,e) e estão associados a sulfetos, além de magnetita e hematita. Os sulfetos são representados por pirita (Fig. 9f) e calcopirita hipiomórfica, com dimensões de até 0,4 mm, comumente associados a agregados de minerais ferromagnesianos, podendo ocorrer na borda de magnetita ou em suas proximidades.

2.5 DISCUSSÕES

2.5.1 Tipologia e evolução textural de silicatos

A tipologia textural de silicatos do charnoquito Rio Seco é classificada em dois grupos de acordo com Shelley (1993): i) texturas primárias (granulares e granofíricas); e ii) texturas secundárias (pertitas, mimerquitas e corona). As rochas com piroxênio apresentam textura geral granular (Fig. 6d-f) e o intercrescimento granofírico surge no clinopiroxênio monzogranito e se desenvolve nas rochas sem piroxênio (Fig. 10b). A textura granular no gabronorito e ortopiroxênio-granodiorito é marcada por cristais de tamanho uniforme em contatos retos, característico de formação mútua em estágio final de cristalização. O intercrescimento granofírico ocorre com o crescimento simultâneo e irregular entre quartzo e feldspato alcalino, quando o sistema se enriquece em sílica e álcalis durante a fusão de magmas graníticos a temperaturas decrescentes (Best & Christiansen 2001, Vernon 2004). As texturas secundárias ocorrem em toda série charnoquítica em forma de coronas de substituição entre minerais ferromagnesianos e predomina nas rochas com piroxênio (Fig. 10b). O desequilíbrio físico-químico em cristais de olivina e plagioclásio propiciam a formação de texturas em corona (Claeson 1998). Essas microestruturas ocorrem a partir de três reações de acordo com Lamoen (1979): i) reações entre olivina e plagioclásio; ii) reações entre fases opacas e plagioclásio; e iii) reações entre fases opacas e clinopiroxênio. No primeiro caso, o contanto direto entre plagioclásio e olivina é essencial para a formação deste tipo textural em minerais ferromagnesianos, do contrário a reação não ocorre. Segundo Lang *et al.* (2004) a fórmula geral que melhor representa a reação é dada por:



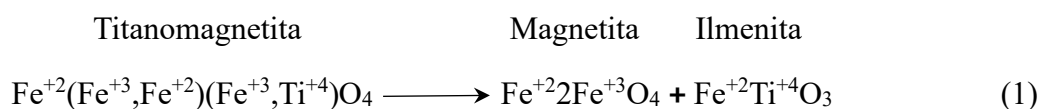
A reação começa a partir das bordas fraturadas de olivina e se desenvolve em estágio *subsolidus* com o resfriamento do magma, onde as coronas podem envolver outras fases minerais ferromagnesianas (Acquafredda *et al.* 1992). Olivinas são exclusivas do gabronorito, porém este tipo de reação é comum em todas as variedades com piroxênio (Fig 8b). Magnetitas e ilmenitas pertencem ao grupo do espinélio e a reação acima justifica sua abundância na variedade ortopiroxênio granodiorito que foi derivado do magma gabronorítico, como proposto por Felix *et al.* (2020). Pertitas e mimerquitas são comumente observadas na variedade hornblenda-monzogranito. Essas texturas ocorrem em interface no estágio final da cristalização, influenciada por alteração metassomática do sistema (Shelley 1993). Com o aumento no conteúdo de água, em estágio tardi-a pós magmático, o processo de alteração

deutérica modifica os minerais previamente formados (Shelley 1993), e nos monzogranitos hidratados do Charnokito Rio Seco, cristais de plagioclásio intensamente saussuritizado indicam este tipo de processo.

2.5.2 Tipologia e evolução textural de minerais opacos

As texturas de minerais óxido de Fe-Ti restringem-se a exsolução da ilmenita que pode ocorrer de três formas: (i) ilmenita composta (Ilm c), a qual é granular ou ocorre composta por lamelas inclusas no centro ou em borda de magnetita hospedeira; (ii) ilmenita sanduíche (Ilm s), com lamelas espessas no plano {111} de magnetita; e (iii) ilmenita treliça (Ilm t), com finas lamelas de ilmenita em todos os planos {111} de magnetita hospedeira (Buddington & Lindsley 1964, Haggerty 1991). Os três tipos texturais de ilmenita ocorrem nas rochas com piroxênio, de modo que a Ilmc predomina no grabronorito e ortopiroxênio-granodiorito e a Ilmt é frequente no clinopiroxênio-monzogranito. Nas rochas sem piroxênio predomina goethita zonada e a magnetita e ilmenita são incipientes nesta variedade, e quando ocorrem, são em forma de finos cristais pontuais (Fig. 9).

A presença de minerais magnéticos como magnetita e ilmenita em rochas plutônicas pode ser atribuída a reações intraóxidos de reequilíbrio e oxirredução dentro da série da titanomagnetita (Buddington & Lindsley 1964, Frost & Lindsley 1991, Haggerty 1981) em condições subsolidus. A magnetita de alta temperatura pode incorporar Ti, que substitui o Fe^{+3} , formando titanomagnetita. Com o resfriamento, o Ti pode ser exsolvido como ilmenita (FeTiO_3) hospedada em magnetita (Fig. 9b). Este processo é dado pela equação geral (1). A magnetita possui 2Fe^{+3} e 1Fe^{+2} ($\text{Fe}^{+2}2\text{Fe}^{+3}\text{O}_4$), e a substituição de um dos Fe^{+3} por Ti^{+4} (com ganho de carga +) é acoplada com a substituição do outro Fe^{+3} por Fe^{+2} (com perda de carga +) formando uma série entre a magnetita, com 1Fe^{+2} e sem Ti^{+4} , e o ulvoespínélio com 2Fe^{+2} , 1Ti^{+4} e sem Fe^{+3} ($2\text{Fe}^{+2}\text{Ti}^{+4}\text{O}_4$). A representação desta série é dada pela equação (2):



Alta T $\Rightarrow$ Resfriamento Baixa T



Magnetita $\longleftrightarrow$ Ulvoespínélio

A hematita pode ocorrer em granitoides formando lamelas de exsolução na magnetita (processo de martitização), expressa pela equação (3). O aumento na circulação de fluidos e no conteúdo de enxofre pode provocar a desestabilização da magnetita que é capaz de formar

sulfeto a partir da reação (4). Por sua vez, a goethita está relacionada a processos de oxidação da magnetita (hematita alterada), expressa pela reação (5):

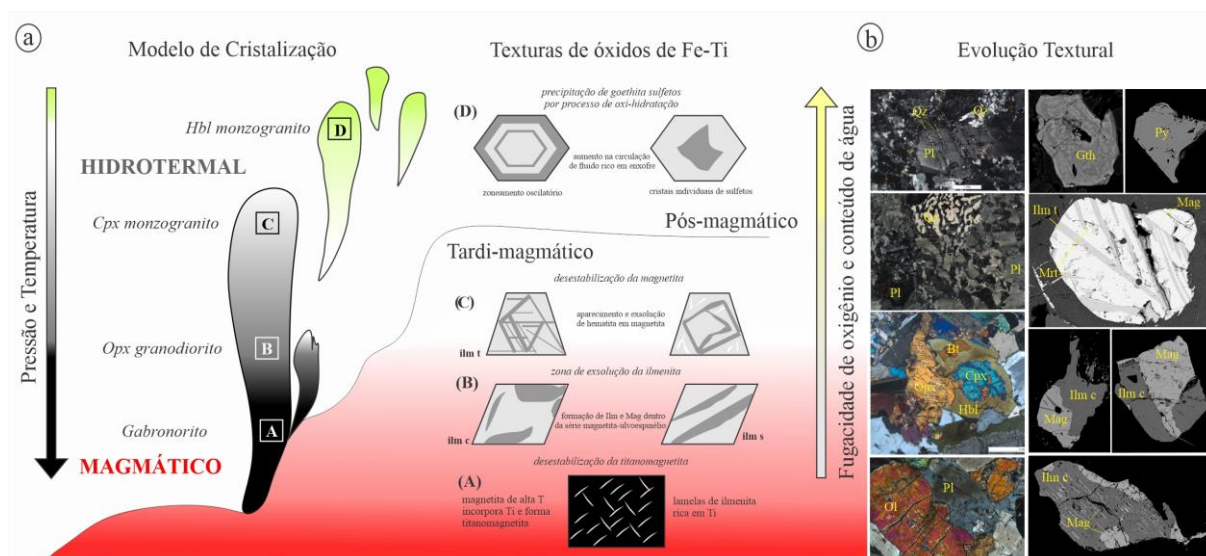
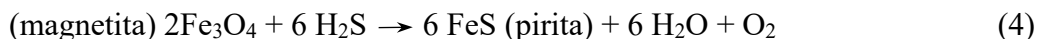
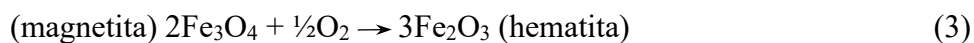


Figura 10 - Figura esquemática ilustrando o modelo de cristalização e a evolução textural de silicatos e minerais óxido de Fe-Ti do Charnóquito Rio Seco: a) modelo marcado pela passagem de estágio magmático para hidrotermal indicando níveis de formação das variedades (a esquerda) e texturas de minerais óxido de Fe-Ti formadas em estágio magmático e pós-magmático (a direita); e b) fotomicrografias de minerais silicáticos e imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de minerais óxido opacos mostrando a evolução de microestruturas. Ambas posicionadas em de acordo com suas respectivas variedades e tipologia textural no esquema ao lado.

O estudo microestrutural de minerais opacos presente no charnoquito Rio Seco mostrou que a sequência de formação se deu em dois estágios: (i) magmático e (ii) tardi-a pós magmático.

Magmático: relações texturais em grabronorito e ortopiroxênio granodiorito indicam formação precoce de magnetita e ilmenita que ocorrem inclusas em minerais primários como plagioclásio, biotita e piroxênio. Texturas de exsolução de ilmenita em magnetita, em forma composta e sanduiche, mostra contemporaneidade entre esses minerais em estágio magmático (Fig. 10b). Piroxênio, anfibólio e espinélio podem ser gerados a partir da reação entre olivina e plagioclásio na presença de água (seção anterior). Portanto, minerais óxidos de Fe-Ti ocorreram no espectro da série magnetita-ulvoespinélio (2) durante o resfriamento em estágio magmático.

Os contatos retos entre ilmenita composta e sanduiche com piroxênios e biotitas primárias reforçam esta afirmativa (Fig. 9b,c).

Tardi-a pós magmático: o aumento no conteúdo de água e no estado de oxidação em monzogranitos provoca a desestabilização da magnetita e ilmenita ainda em estágio magmático gerando ilmenita do tipo treliça e hematita em forma de martita (3). Neste processo, o Ti liberado pela ilmenita se associa ao cálcio e silício extraídos do líquido magmático para formar titanita. A passagem para o estágio pós-magmático é marcada pela formação de sulfetos a partir de magnetitas (4) com o aumento na circulação de fluidos enriquecidos em enxofre. Em condições ainda mais hidratadas e temperatura decrescente a goethita é formada por reação de oxi-hidratação a partir de hematita (5) no hornblenda monzogranito (Fig. 10b). O modelo de cristalização e a evolução textural de minerais óxido de Fe-Ti é apresentado de forma esquemática na Fig. 10a.

Tabela 3 - Dados de química mineral quantitativa em anfibólio do Charnoquito Rio Seco.

Variedades	Gabronorito			Ortopiroxênio Granodiorito			Clinopiroxênio Monzogranito			Anfibólio Monzogranito		
Amostras	WDL-06	WDL-08A	WDL-08A	WDL-09	WDL-01A	WDL-01A	WDL-10	WDL-10	NDP-59B	NDP-123	NDP-83	NDP-83
Análises	c1-amp1-1	c1-amp1-3	c6-amp1-2	c5-amp1-3	c4-amp1-1	c3-amp2-3	c7-amp1-1	c3-amp2-4	c5-amp3-1	c1-amp2-1	c3-amp1-1	c2-amp1-3
SiO ₂	51.04	46.15	46.70	46.65	44.38	45.18	46.33	48.20	47.88	46.65	46.53	45.43
TiO ₂	0.31	1.45	1.64	1.26	1.94	1.58	1.46	0.55	0.81	0.49	1.65	0.13
Al ₂ O ₃	6.06	7.44	7.87	6.76	7.62	7.62	6.74	5.77	5.86	7.87	6.65	8.48
FeO*	11.62	18.62	16.46	21.21	21.91	21.11	22.34	21.53	19.92	19.40	18.47	21.58
MnO	0.18	0.23	0.27	0.31	0.32	0.30	0.53	0.53	0.39	0.29	0.26	0.37
MgO	16.64	10.78	11.89	9.12	8.72	9.13	7.86	9.20	9.84	9.72	10.93	8.39
CaO	11.64	11.17	11.43	10.67	10.65	10.55	10.63	10.97	11.25	11.87	10.68	11.77
Na ₂ O	0.63	1.08	1.25	1.10	1.27	1.33	1.34	1.00	1.08	0.89	1.57	1.01
K ₂ O	0.62	0.91	0.93	0.76	1.03	0.99	0.95	0.63	0.64	1.02	0.89	0.75
Soma	98.74	97.82	98.43	97.84	97.82	97.78	98.18	98.37	97.67	98.20	97.64	97.91
Fórmula estrutural baseada em 23 átomos de oxigênio												
Si	7.13	6.83	6.83	6.96	6.68	6.76	6.99	7.15	7.15	6.95	6.91	6.84
Al ^{iv}	0.87	1.17	1.17	1.04	1.32	1.24	1.01	0.85	0.85	1.05	1.09	1.16
Soma T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{vi}	0.125	0.127	0.182	0.147	0.028	0.106	0.183	0.164	0.180	0.331	0.071	0.340
Ti	0.033	0.161	0.180	0.142	0.219	0.178	0.165	0.061	0.091	0.055	0.185	0.015
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.906	0.671	0.506	0.739	0.833	0.794	0.478	0.657	0.443	0.352	0.606	0.536
Fe ²⁺	0.451	1.634	1.506	1.907	1.924	1.847	2.339	2.016	2.045	2.066	1.687	2.180
Mn	0.022	0.029	0.034	0.039	0.041	0.038	0.068	0.066	0.049	0.037	0.033	0.048
Mg	3.463	2.378	2.592	2.027	1.955	2.037	1.766	2.035	2.190	2.158	2.418	1.881
Soma C	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.742	1.771	1.790	1.706	1.716	1.691	1.717	1.744	1.799	1.894	1.698	1.898
Na	0.171	0.229	0.210	0.294	0.284	0.309	0.283	0.256	0.201	0.106	0.302	0.102
Soma B	1.913	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.000	0.082	0.144	0.023	0.086	0.077	0.108	0.033	0.112	0.152	0.151	0.194
K	0.110	0.172	0.174	0.144	0.198	0.189	0.182	0.120	0.122	0.194	0.169	0.143
Soma A	0.110	0.254	0.318	0.167	0.284	0.266	0.291	0.153	0.235	0.346	0.320	0.337
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.885	0.593	0.633	0.515	0.504	0.524	0.430	0.502	0.517	0.511	0.589	0.463
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Al ^{vi})	0.879	0.840	0.736	0.834	0.968	0.882	0.723	0.800	0.710	0.515	0.895	0.612

Recalculado a partir dos dados de Felix *et al.* (2020).

2.5.3 Termobarometria e conteúdo de H₂O em anfibólio

O estudo experimental de Ridolfi *et al.* (2010), baseado na composição química de anfibólio, permite estimar sua temperatura de cristalização fornecendo importantes informações para as condições de formação de suítes graníticas. O método é recomendado para inferir as

temperaturas de anfíbólios cristalizados em magmas com diferentes conteúdos de água, de assinatura cálcico-alcalina a alcalina, e caráter oxidado e reduzido. Esse geotermômetro foi utilizado para estimar as temperaturas de cristalização das rochas associadas aos charnoquitos da Província Carajás (Cunha *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2018, Dall' Agnol *et al.* 2017). Por essa razão, a fim de padronizar a metodologia utilizada nas estimativas de condições de cristalização dessas rochas, o mesmo cálculo foi adotado neste trabalho e os valores obtidos são apresentados na Tab. 4. A equação que representa esse geotermômetro é dada por:

$$T(^{\circ}\text{C}) = -151,487\text{Si}^* + 2041; \text{ onde } \text{Si}^* = \frac{\text{Si}^{+\text{iv}}\text{Al}}{15-2^{\text{iv}}\text{Ti}-^{\text{vi}}\text{Al}/2-^{\text{vi}}\text{Ti}/1,8+\text{Fe}^{+3}/9+\text{Fe}^{+2}/3,3+\text{Mg}/26+^{\text{B}}\text{Ca}/5+^{\text{B}}\text{Na}/1,3-^{\text{A}}\text{Na}/15+^{\text{A}}[\text{ }]/2,3}.$$

No Charnoquito Rio Seco, as temperaturas de cristalização do anfibólio variam de 713 a 809°C nas rochas com piroxênio e 774 a 790°C nas rochas sem piroxênio. O geobarômetro de Ridolfi *et al.* (2010) baseado na concentração de Al em anfibólio é calculado a partir da equação: $P = 19,209e^{(1,438\text{Al})}$, $R^2 = 0,99$, o que indicou pressões variando entre 81 e 134MPa. Contudo, Anderson e Smith (1995) admitem que barômetros de Al em hornblendas são extremamente sensíveis as variações de $f\text{O}_2$ e temperatura, de modo que baixa $f\text{O}_2$ pode refletir em pressões mais elevadas e o efeito da temperatura pode causar uma variação de até 2kbar a cada 100°C. Para corrigir os efeitos da temperatura de barômetros de Al em anfibólio, Schmidt (1992) revisou este experimento, onde recomendou que temperaturas próximas ao *sólidus* sejam usadas na equação:

$$P \text{ (kbar)} = 4,76\text{Al} - 3,01 - [T (^{\circ}\text{C}) - 675] / 85 \times 0,530\text{Al} + 0,005294 [T (^{\circ}\text{C}) - 675]$$

A faixa de calibração utilizada no experimento para razão Fe / (Fe + Mg) em anfibólio é de 0,40-0,60 e a assembleia mineral deve conter quartzo, os dois feldspatos, hornblenda, biotita e óxido de Fe-Ti, formados em condições de $f\text{O}_2$ relativamente alta (>NNO). As rochas da série charnoquítica Rio Seco se enquadram em todas as condições estabelecidas para utilização do barômetro e os valores de pressão obtidos a partir deste experimento variam de 119 a 225MPa (Tab. 4), e parecem ser os mais consistentes para refletir as condições de colocação do Charnoquito Rio Seco. Ainda de acordo Anderson & Smith (1995) foi realizada a estimativa gráfica da pressão com base na razão Fe/(Fe+Mg) vs $\text{Al}^{\text{iv}}+\text{Al}^{\text{vi}}$ em anfibólio e indicam valores entre ~120 e 300 MPa (Fig. 11d). A cristalização do anfibólio cálcico em sistemas graníticos é extremamente dependente do conteúdo H_2O e CaO disponível no magma. Em pressões entre 200 a 400 MPa um teor mínimo de 4% de água é necessário para estabilizar anfibólio e em pressões >400 MPa esse teor é de 5% em peso de água (Naney 1983, Dall'Agno

et al. 1999). A fórmula higrométrica proposta por Ridolfi *et al.* (2010), baseada em hornblendas magnesianas, foi aplicada para estimar o conteúdo de água no magma que deu origem ao charnoquito Rio Seco, de acordo com a seguinte equação: $H_2O_{melt} = 5.215 [^6]Al^* + 12.28$; onde $[^6]Al^* = [^6]Al^* + [^4]Al/13.9 - Si + [^6]Ti/5 - Fe^{+2}/3 - Mg/1.7 + [^B]Ca + [^A]]/1.2 + [^A]Na/2.7 - 1.56K - Fe/1.6$. Dessa forma, o higrômetro utilizado indicou conteúdo de água no magma variando de 4,2 a 6,1 (wt %). Conferir valores na Tab. 4.

Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros de cristalização do Charnoquito Rio Seco e rochas afins.

Rochas estudadas	T (°C)	P (MPa)	P (MPa)	H ₂ O _{melt} (wt. %)	Fugacidade de oxigênio (fO ₂)	Log fO ₂	Log fO ₂
Gabronorito	777 - 809	81 - 125 ^a	119 - 141 ^b	4,3 - 5,2	oxidado + 0,5 < ΔNNO < + 2,4	- 12,0 / -13,5 ^c	- 13,2 / -14,1 ^d
Opx granodiorito	747 - 792	106 - 134 ^a	158 - 179 ^b	5,0 - 5,9	oxidado - 0,1 < ΔNNO < + 0,2	- 14,1 / -14,9 ^c	- 13,6 / -15,0 ^d
Cpx monzogranito	713 - 745	82 - 108 ^a	135 - 186 ^b	5,6 - 6,1	oxidado - 0,4 < ΔNNO < + 0,4	- 15,1 / -15,5 ^c	- 15,1 / -16,0 ^d
Hbl monzogranito	774 - 790	102 ^a	120 - 225 ^b	4,2	oxidado ΔNNO = 0,5	-13,9 ^c	- 13,8 / -14,2 ^d
Granitos Vila União ¹	831 - 926	532 - 814	-	> 4	oxi/red FMQ ± 0,5 a NNO + 1,0	-	-
Suíte Vila Jussara ²	833 - 917	230 - 770	-	> 4	oxi/red FMQ ± 0,5 a NNO ± 0,6	-	-
Suíte Planalto ³	831 - 910	300 - 500	-	> 4	reduzido FMQ ± 0,5	-	-
Complexo Estrela ⁴	782 - 893	180 - 340	-	-	reduzido < FMQ	-	-
Granitos Serra do Rabo ⁵	750 - 1020	180 - 380	-	-	reduzido < FMQ	-	-

Opx-ortopiroxênio; Cpx-clinopiroxênio; Hbl-hornblenda. Note: temperatura, H₂O_{melt} e fugacidade de oxigênio baseada em Ridolfi *et al.* (2010); a-dados obtidos por Felix *et al.* (2020) com base no geobarômetro de Ridolfi *et al.* (2010), b-dados de pressão obtidos nesta pesquisa com base no geobarômetro de Anderson & Smith (1995), c-logfO₂ obtido neste trabalho com base no cálculo de Ridolfi *et al.* (2010), d- logfO₂ obtida por Felix *et al.* (2020) com base no cálculo de Wones (1989). Fonte de dados: 1-Oliveira *et al.* (2018), 2-Dall' Agnol *et al.* (2017), 3-Cunha *et al.* (2016), 4-Barros *et al.* (2001), 5-Sardinha *et al.* (2006).

2.5.4 Fugacidade de oxigênio em composição de anfibólio e biotita

A fugacidade de oxigênio (fO_2) é a atividade química do oxigênio no magma e representa a pressão parcial do gás oxigênio. É uma variável termodinâmica que pode ser controlada em laboratório e deduzida a partir de assembleias minerais (Clark 1999). A fO_2 influencia fortemente a oxidação do ferro que pode ocorrer no estado metálico (Fe), ferroso (Fe^{+2}) e férrico (Fe^{+3}). Em sistemas com sílica, o ferro ocorre no estado ferroso e férrico, e é incorporado principalmente em minerais silicáticos e na magnetita. Com o aumento da fO_2 o ferro férrico é incorporado à hematita (Frost 1991, Clark 1999). Neste contexto, a fO_2 em rochas graníticas representa um importante indicador petrológico, uma vez que registra a variação de oxidação durante os processos que formam, alteram e deformam rochas graníticas, além de refletir a natureza da fonte (Buddington & Lindsley 1964, Ishihara 1977, Haggerty 1981, Wones 1981, Dall' Agnol *et al.* 1997, Figueiredo 1999, Gabriel & Oliveira 2014). De acordo com a natureza dos minerais opacos, os granitoides são divididos em duas séries magmáticas formadas em condições distintas de fO_2 : (i) série magnetita, que pode conter ilmenita, e são formados em condições oxidantes, e (ii) série ilmenita, com ausência de magnetita e formada em condições

redutoras (Ishihara 1977). O estudo da natureza de minerais óxido de Fe-Ti combinado com análise de química mineral em anfibólio e biotita fornecem informações valiosas sobre o estado de oxidação das rochas.

No charnoquito Rio Seco, as rochas com piroxênio (população A) concentram os maiores valores magnéticos e seu conteúdo modal de minerais opacos varia de 0,2 a 1,75%, com presença de magnetita e ilmenita. As rochas sem piroxênio (população B) registra os menores valores magnéticos, contêm <0,3% minerais opacos e predomina goethita. Nesta pesquisa, dados quantitativos (WDS-*Wavelength dispersive spectroscopy*) de química mineral em anfibólio e biotita obtidos por Felix *et al.* (2020) foram utilizados para reestimar as condições de oxidação do charnoquito Rio Seco, de acordo com a equação de Ridolfi *et al.* (2010):

$$\Delta\text{NNO} = 1.644 \text{ Mg}^* - 4.01; \text{ onde } \text{Mg}^* = \text{Mg} + \text{Si}/47 - {}^{\text{VI}}\text{Al}/9 - 1.3 {}^{\text{VI}}\text{Ti} + \text{Fe}^{3+}/3.7 + \text{Fe}^{2+}/5.2 - {}^{\text{B}}\text{Ca}/20 - {}^{\text{A}}\text{Na}/2.8 + {}^{\text{A}}[\text{ }]/9.5.$$

Nas rochas da população magnética A (com piroxênio) o ΔNNO varia de -0,4 a +2,4 e nas rochas da população magnética B (sem piroxênio), os valores se concentram em +0,5. O $\log f\text{O}_2$, calculado com base na equação de Hirschmann *et al.* (2008), e de acordo com os valores termobarométricos de Ridolfi *et al.* (2010), mostra intervalos entre -15,5 e -12,0 nas rochas com piroxênio e valor de -13,9 nas rochas sem piroxênio. Esses valores são próximos aos obtidos por Felix *et al.* (2020) ($\log f\text{O}_2$ entre -13,2 e 16,0) com base no cálculo de Wones (1989). A baixa razão Fe/(Fe+Mg) em hornblenda e biotita reitera graficamente as condições oxidantes do charnoquito Rio Seco, que pertencem a série da magnetita (Fig. 11b). As pequenas quantidades de magnetita que teriam se formado nas rochas oxidadas sem piroxênio foram transformadas para martita, e em seguida, para goethita na presença de água, a partir de reações de oxi-hidratação. Isto justifica os baixos valores magnéticos dessas rochas que evoluíram sob condições oxidantes. Os valores de temperatura de cristalização de anfibólio obtidos neste trabalho e de piroxênio (Felix *et al.* 2020) combinado com o $\log f\text{O}_2$ permitiu posicionar o charnoquito Rio Seco acima das curvas tampões níquel-óxido de níquel (NNO) no diagrama de Frost (1991), reforçando o caráter oxidado dessas rochas (Fig. 11c).

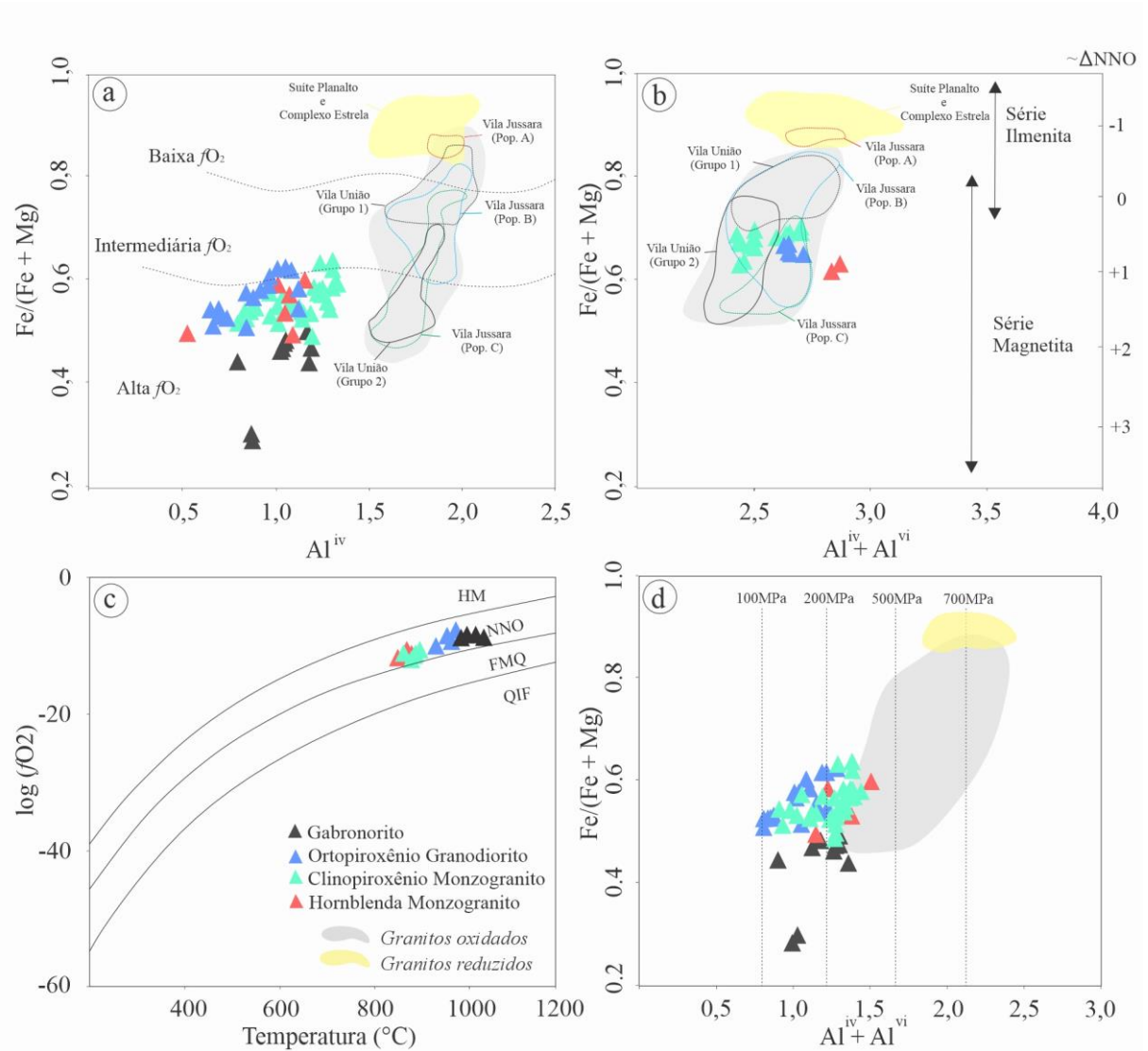


Figura 11 - Diagramas de parâmetros de cristalização do charnoquito Rio Seco com campos de granitos afins (Cunha *et al* 2016, Dall' Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Sousa *et al.* 2022) oxidados e reduzidos: a) razão $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ vs Al^{IV} em anfibólios (baseado em Anderson & Smith, 1995); b) diagrama $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ vs $\text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$ em biotitas mostrando similaridade com a série magnetita de Ishihara (1981), conforme domínios indicados por Anderson *et al.* (2008); c) $\log f\text{O}_2$ vs $T(^{\circ}\text{C})$ estimados de modo empírico para as diferentes variedades da série charnoquítica de Ourilândia. Temperatura calculada por Felix *et al* (2020) com base na composição do anfibólio e piroxênio (Ridolfi *et al.* 2010, Taylor 1998), e a $f\text{O}_2$ de acordo com Fegley (2013), plotadas sobre as curvas tampões níquel-óxido de níquel (NNO) e faialita-magnetita-quartzo (FMQ) conforme Frost (1991); e d) razão $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ vs $\text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$ em anfibólios da série charnoquítica e de rochas afins, isóbaras de Anderson & Smith (1995). Abreviação: Pop = população.

2.5.5 Comparação com granitoides neoarqueanos da Província Carajás

Estudos detalhados envolvendo petrografia, química mineral e petrologia magnética foram realizados em rochas neoarqueanas da Província Carajás (Feio *et al.* 2012, Santos *et al.* 2013, Cunha *et al.* 2016, Dall’Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Felix *et al.* 2020). Aqui, comparamos e discutimos as principais semelhanças e diferenças entre os granitoides neoarqueanos (Vila União, Vila Jussara, Planalto e o Diopsídio-Norito Pium) e o Charnóquito Rio Seco. No geral, os granitoides neoarqueanos apresentam assinatura magnética bimodal: i) marcado por baixos valores de SM com presença de ilmenita e ausência de magnetita; e ii) apresenta valores magnéticos mais elevados e contem magnetita e ilmenita. As rochas da suíte Vila União e Vila Jussara apresentam distribuição magnética bimodal e são essencialmente oxidadas, exceto algumas variedades de granitos com biotita e hornblenda que são semelhantes em termos magnéticos aos monzo-e sienogranitos reduzidos da suíte Planalto. Semelhante aos demais granitos neoarqueanos, o charnoquito Rio Seco apresenta assinatura magnética bimodal, de caráter oxidado divergindo dos granitos hidratados e reduzidos da Suíte Planalto.

No charnoquito Rio Seco os ortopiroxênios são do tipo enstatita e ferrosilita na população A e augita e diopsídio na população B (Felix *et al.* 2020). Os anfibólios são cálcicos e plotam no campo da magnesiohornblenda e ferrohornblenda e as biotitas são subalcalinas com pequenas variações para cálcio-alcalinas reequilibradas em monzogranitos da população B. O hornblenda gabronorito do Diopsídio-Norito Pium é semelhante em termos magnéticos ao membro máfico do charnoquito Rio Seco (Fig. 5b). Nas suítes Vila União e Vila Jussara o anfibólio é cálcico (hastingsita e hastingsita magnesiana subordinada) e a biotita é de composição próxima a da annita e compatível com biotitas de rochas subalcalinas (Oliveira *et al.* 2018, Cunha *et al.* 2016). Nessas unidades piroxênios são raros.

Intrusões graníticas com assinatura charnoquíticas são registradas em diversos períodos geológicos, das quais se reconhece pelo menos três grupos (Frost & Frost 2008, Frost *et al.* 2000). O primeiro e mais comum é formado por granitoides cálcico-alcalinos a alcalinos ferrosos, conhecidos como granitos tipo A. O segundo inclui granitos cálcicos a cálcico-alcalino, metaluminoso e magnesiano, de composição semelhante aos batólitos cordilheirianos e um terceiro grupo parece abranger a transição entre granitos magnesianos e ferrosos. Esta variação composicional é explicada pela ampla faixa de ambientes tectônicos e diferentes processos petrológicos envolvidos na formação deste tipo de associação petrológica (Rajesh *et al.* 2019, Frost & Frost 2008). O charnoquito Rio Seco é cálcico-alcalino, metaluminoso e magnesiano ($\text{FeOt} / \text{FeOt} + \text{MgO} \leq 0,80$) e o membro máfico desta série apresenta assinatura

geoquímica semelhante ao Diopsídio-Norito- Pium (Fig. 12a), cuja relação entre os óxidos apresenta razão ainda menor. Por outro lado, a relação $\text{FeOt} / (\text{FeOt} + \text{MgO})$ para as os granitoides de Vila União e da suíte Vila Jussara mostra valores $\geq 0,70$ e indicam um caráter ferroso para as rochas destas suítes. Algumas amostras dessas suítes mostram baixa razão $\text{FeOt} / (\text{FeOt} + \text{MgO})$, indicando transição entre granitos magnesianos e ferrosos. Para os granitos ferrosos do tipo Planalto, os valores desta razão são extremamente altos ($\geq 0,90$) e apresentam tendência peraluminosa ($A/\text{CNK} \geq 1,0$), sendo acompanhados por leucogranitos e granitos com biotita das suítes Vila União e Vila Jussara. Tais granitos são semelhantes geoquimicamente aos tipos ferrosos tipo A reduzidos, enquanto o charnoquito Rio Seco e as rochas do Norito Pium coincidem com o campo dos granitos cálcico-alcálinos cordilheirianos (Fig. 12b).

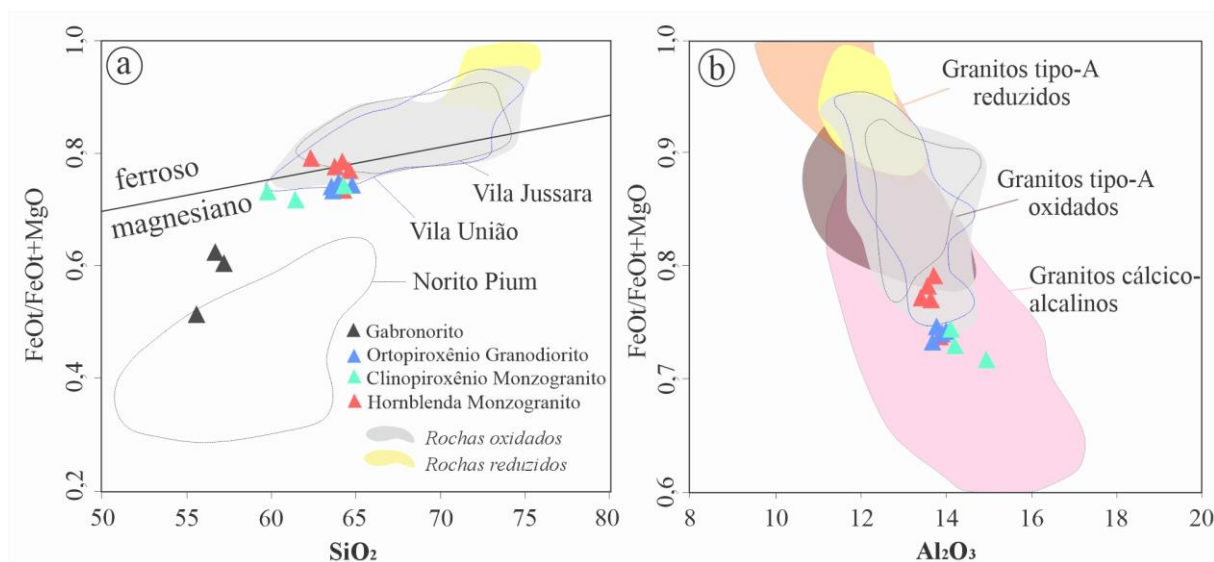


Figura 12 - Aspectos geoquímicos do Charnoquito Rio Seco: a) Diagrama $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$ vs SiO_2 de Frost *et al.* (2001), indicando caráter magnesiano para a série charnoquítica e ferroso para os granitos afins; e b) Diagrama $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$ vs Al_2O_3 de Dall'Agnol & Oliveira (2007) que define os campos de granitos tipo A reduzidos e oxidados, e dos granitoides cordilheiranos cálcico-alcálinos, onde plotam as rochas da série charnoquítica. Dados compilados (Feio *et al.* 2012, Dall' Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Maragoanha *et al.* 2019, Felix *et al.* 2020).

Estudos que investigam as condições de cristalização (T , P , $f\text{O}_2$ e $x\text{H}_2\text{O}$) de rochas granitoides foram realizados em diversas unidades nearqueanas da Província Carajás. Dall'Agnol *et al.* (2017) indicaram temperaturas de cristalização de anfibólio para os granitoides de Vila Jussara variando entre 833 e 917 ($^{\circ}\text{C}$) e pressão de colocação entre 230 a 770 Mpa. Oliveira *et al.* (2018) mostraram temperaturas variando de 831 a 926 $^{\circ}\text{C}$ e pressões entre 532 a 814 MPa para os granitoides de Vila União. No caso das rochas da suíte Planalto esses valores variam de 620 a 910 $^{\circ}\text{C}$ e 300 a 500 Mpa (Cunha *et al.* 2016). Nesta última, algumas considerações devem ser feitas. A composição de Al em anfibólio é utilizada como

fator determinante nos cálculos que permitem estimar pressões de colocação de magmas graníticos e a ampla maioria dos experimentos são recomendados para rochas cálcio-alcálicas, metaluminosas e magnesianas, com assembleia mineral específica (Anderson & Smith 1995, Ridolfi *et al.* 2010). Nesse sentido, ao notar o uso exacerbado de barômetros que se baseiam em composição Al em anfibólio, Anderson & Smith (1995) fizeram algumas ponderações sobre a aplicação inadequada do método. Dentre as quais: i) a temperatura e a fugacidade de oxigênio exercem grande influência em barômetros que se baseiam em Al de anfibólio; e ii) rochas supersaturadas em alumina podem indicar pressões superestimadas. Baixos teores de fO_2 em magmas graníticos devem diminuir as razões Mg/Fe e Fe^{+3}/Fe^{+2} em hornblendas e aumentar a substituição de Al, o que resultaria em pressões superestimadas. As rochas da suíte Planalto são reduzidas e peraluminosas (Feio *et al.* 2012) e as pressões indicadas no diagrama Fe/Fe+Mg vs Al total (Fig. 11d) em anfibólio proposto por Anderson & Smith (1995) não parecem ser reais pelos fatores acima citados. Assim, consideramos os intervalos entre 300 a 500 Mpa estimados para essas rochas com base em saturação de apatita, conforme foi sugerido por Cunha *et al.* (2016). Todas as unidades apresentam conteúdo de $H_2O_{melt} > 4\%$.

A fugacidade de oxigênio dos granitoides neoarquenaos do terreno Canaã dos Carajás foi estimada seguindo os experimentos de trabalhos clássicos (Wones 1989, Frost 1991, Anderson & Smith 1995, Ridolfi *et al.* 2010, Fegley 2013) amplamente utilizados entre os petrólogos. No geral, os granitoides intermediários de Vila União e da suíte Vila Jussara são formados em condições oxidadas ($NNO \pm 1,0$) e as variedades de caráter reduzido destas suítes são formadas próximas ao tampão FMQ ($\pm 0,5$), semelhante as condições de formação da suíte Planalto. Os granitos reduzidos do Complexo Estrela e Serra do Rabo são formados abaixo de FMQ. As altas razões FeO/FeO+MgO em química de rocha total e Fe/Fe+Mg em composição de anfibólio e biotita reiteram o caráter reduzido desses granitos, enquanto razões baixas e intermediárias para a maioria dos granitoides de Vila União e Vila Jussara indicam condições mais oxidantes (Fig. 11a). No caso do charnoquito Rio Seco essa razão ainda menor reforça as condições mais oxidantes em que essas rochas foram formadas. Apesar da ausência de estudos de química mineral nas rochas do Diposídio-Norito Pium, as composições geoquímicas e assinaturas magnéticas indicam condições de oxidação compatíveis com o charnoquito Rio Seco. Campos de granitoides neoarquenaos de caráter oxidado e reduzido, magnesiano e ferroso da Província Carajás e campos de batólitos com assinatura charnoquítica são comparados aos charnoquitos Rio Seco no diagrama de classificação da fugacidade de oxigênio modificado de Frost & Frost (2008) na Fig. 12. Semelhante ao batólito de Utsalik, a variação da fugacidade do charnoquito Rio Seco é influenciada pelo amplo intervalo de temperatura em que estas rochas foram

formadas. Campos de granitoides oxidados (suíte Vila e União e Vila Jussara) representam espectros transicionais entre granitos oxidados (magnesiano) e reduzidos (ferroso) e o campo de granitos reduzidos da suíte Planalto é coincidente com plútons charnoquíticos ferrosos (< FMQ) de Sherman e Thor Range.

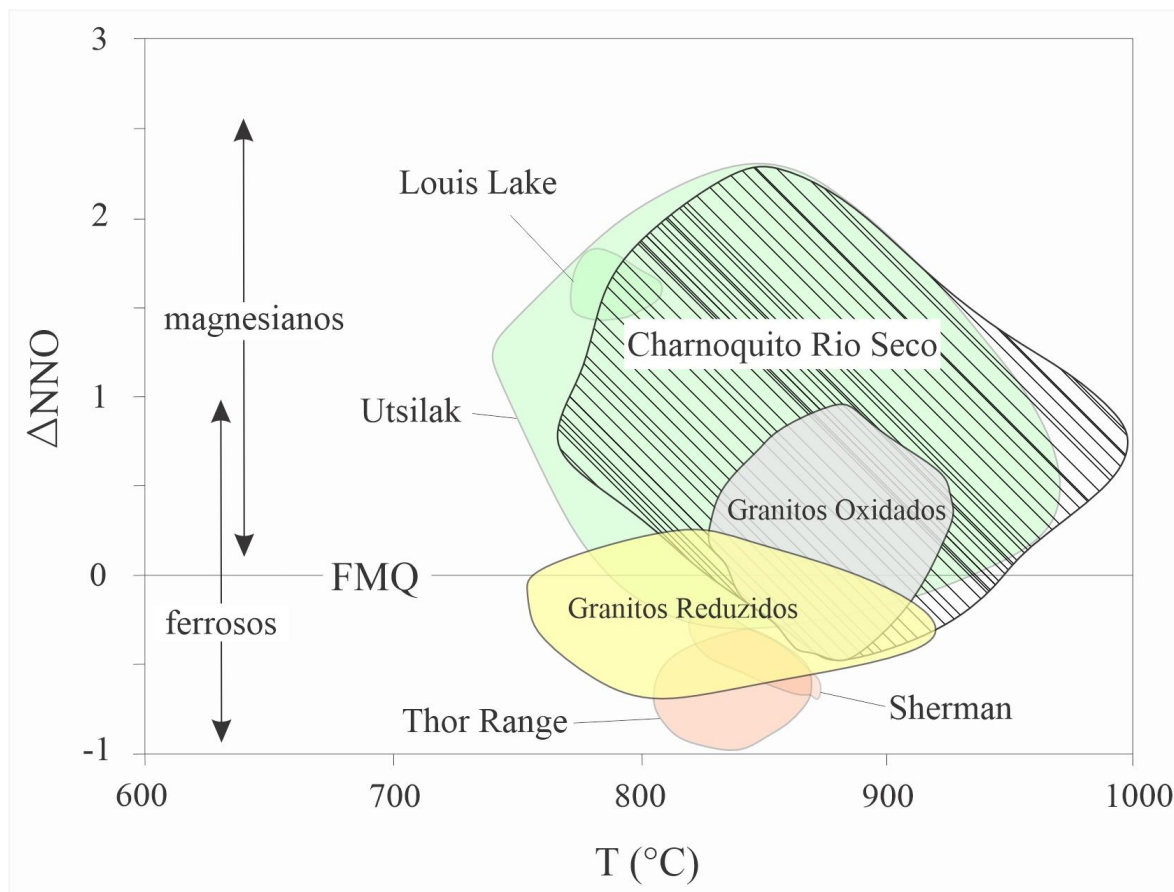


Figura 13 - Variação da fugacidade de oxigênio e temperatura de plútons charnoquíticos (modificado de Frost & Frost 2008). Campos da série charnoquítica de Ourilândia e granitos afins de caráter oxidado e reduzido da Província Carajás.

2.5.6 Origem de charnoquitos e evolução do magmatismo neoarqueano

Intrusões granitoides de idade neoarqueana (2,75 a 2,73 Ga) foram colocadas a norte da Província Carajás (Barros *et al.* 2009, Feio *et al.* 2012, Santos *et al.* 2013, Cunha *et al.* 2016, Oliveira *et al.* 2018, Dall’Agnol *et al.* 2017). De leste a oeste, a sequência intrusiva neoarqueana da porção transicional desta Província é representada pelas suítes granitoides Planalto, Vila Jussara, Vila União, máficas do Diopsídio-Norito Pium e por associações charnoquíticas (Fig. 3). As rochas destas suítes apresentam ampla variação composicional e incluem granitoides magnesianos e ferrosos, oxidados e reduzidos (Cunha *et al.* 2016, Dall’Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018). No geral, todas as unidades estão alongadas na direção NE-SW ou E-W e seguem a tendência regional da zona de cisalhamento com plútons de dimensões entre 2 a 35km de extensão e 1 a 10km de largura. São classificadas como gabros e gabronoritos a monzo-e sienogranitos de composição intermediária entre as suítes, incluindo granitoides portadores de piroxênio. Apresentam clara continuidade composicional e petrográfica e variam de magnesiano no charnoquito Rio Seco e Diopsídio-Norito Pium a ferroso nas demais unidades (Fig. 12a).

Barros *et al.* (2009) propuseram que a fonte de magmas ferrosos compatíveis com os granitos Estrela e Serra do Rabo podem ser originados a partir da fusão de crosta granulítica não esgotada. A hipótese foi reiterada por Feio *et al.* (2012) ao mostrar com modelagem geoquímica que a fusão parcial de toleíta máfica a intermediária portador de ortopiroxênio é capaz de gerar rochas semelhantes aos granitos do tipo Planalto. Ainda de acordo com os autores, o resíduo do fundido de crosta inferior granulítica deve conter plagioclásio, clino- e ortopiroxênio, magnetitas e ilmenitas, assembleia mineral necessária para cristalizar magma charnoquítico. Assim, concluíram que a origem do magmatismo ferroso de granitos tipo A de Carajás poderia estar relacionada aos charnoquitos que ali ocorrem.

Dall’Agnol *et al.* (2017) em estudo geoquímico e mineralógico da suíte Vila Jussara aprofundou a discussão e indicou evidências consistentes para a hipótese: 1) esses granitoides são predominantemente ferrosos, mas variam ligeiramente para magnesianos; 2) são enriquecidos em Ba e Zr com conteúdo de Sr moderado a baixo; 3) o fracionamento de HRRE não foi acentuado $[(La/Yb)_N < 20]$ e a maioria das amostras mostram anomalias negativas de Eu; e 4) baixas razões Sr/Y (< 8) e diagramas multi-elementos indicam diferentes variedades de granitos com comportamento geoquímico semelhante, esgotados em Nb, Sr, P e Ti e enriquecidos em Ba e Zr em comparação com o manto primitivo. Contudo, estudos detalhados

em granitoides associados (Vila União) e em associações charnoquítica deste segmento de crosta ainda eram ausentes.

Felix *et al.* (2020) definiu a natureza e os aspectos petrológicos dos charnoquitos Rio Seco e apontou algumas divergências com os modelos propostos até então: i) divergência entre assinatura geoquímica de charnoquitos e granitos tipo A; e ii) divergência entre modelos propostos para a formação de charnoquito e granitos hidratados tipo A. Os charnoquitos são magnesianos [$\text{rocha total } 0,8 \geq \text{FeOt} / (\text{FeOt} + \text{MgO}) \leq 0,5$], cálcico-alcálico a alto-K e metaluminoso. Apresentam altas razões Rb / HFSE, enriquecimento em LILEs e o caráter magnésiano e oxidado pode ter sido herdado de sua fonte. Modelagem geoquímica indica extração de manto empobrecido (baixo conteúdo de HFSE) para geração do gabronorito que originou ortopiroxênio granodiorito por cristalização fracionada. A hidratação progressiva de magmas residuais foi responsável pela formação de monzogranitos. Recentemente, estudos envolvendo petrologia, geoquímica e geocronologia concederam uma importante contribuição para o avanço desta discussão (Oliveira *et al.* 2018, Maragoanha *et al.* 2020). Maragoanha *et al.* (2020) propuseram um modelo geodinâmico para a formação dos granitoides de Vila União e rochas afins envolvendo múltiplos estágios. Segundo os autores a formação desta suíte iniciou com underplating promovido pela delaminação da crosta inferior e geração de magmatismo máfico, responsável pela formação do Dipsídio-Norito Pium. A colocação de magmas máficos em crosta inferior / média causou a fusão parcial de granulitos félsicos mesoarqueano, gerando magmas de composição leucogranítica. A interação entre esses dois magmas foi capaz de formar os granitoides híbridos de Vila União. Por fim, com o resfriamento em profundidades mais rasas, os granitos tipo A dessa suíte foram gerados. Todo processo teria ocorrido em um regime tectônico transpressivo dominado por cisalhamento puro (N-S) e o magmatismo híbrido foi canalizado para zonas de cisalhamento pré-existentes de direção E-W gerando os granitos tipo A.

Segundo Frost & Frost (2008), petrólogos reconhecem quatro ambientes tectônicos para formação de magmas charnoquíticos: i) relacionado a rifts que geram magmatismo ferroso; ii) é do tipo caledoniano; iii) associado a cordilheiras profundamente erodidas; e iv) relacionado a fusão de crosta profunda em zona de metamorfismo granulítico. Os dois últimos podem ocorrer associados e o modelo arqueano para geração de magmatismo cálcico-alcálico não se restringe à subducção em um cenário de arco. Bédard (2006) apresentou um modelo de fusão de crosta eclogítica delaminada capaz de produzir o magmatismo cálcico-alcálico, comumente encontrado em terreno granulítico. Chanoquitos gerados a partir desse processo tendem a ser metaluminoso a fracamente peraluminoso e magnésiano com razões $\text{FeO} / (\text{FeO} + \text{MgO})$

intermediárias. Os batólitos de Utsalik e Louis Lake (Frost *et al.* 2000) são exemplos deste tipo de magmatismo associado a ambiente de arco. Neste ambiente, a assimilação de componentes crustais pode originar magmatismo ferroso (Frost *et al.* 2000, Frost & Frost 2008). Para explicar o caráter mais oxidado dos granitoides da suíte Vila Jussara, Dall'Agnol *et al.* (2017) atribuem herança de características da fonte e admitem que uma crosta granulítica heterogênea de composição toleítica e predominantemente reduzida, geraria o magmatismo ferroso dos granitos Planalto, Estrela e Serra do Rabo. Por outro lado, fontes mais oxidadas de composição cálcico-alcalina dariam origem a magmas magnesianos e oxidados dos granitoides de Vila Jussara. A coexistência de magmas distintos provavelmente favorecia os processos de mistura entre eles, tornando as relações entre as variedades de granito resultantes ainda mais complexas. A mesma relação foi utilizada por Maragoanha *et al.* (2020) para explicar a variação composicional e contrastes geoquímicos dos granitoides de Vila União. Portanto a fusão parcial de fontes com composição ligeiramente distinta é assumida pelos autores. Contudo, a hipótese de evolução por cristalização fracionada de líquidos primitivos independentes não é descartada.

A partir deste histórico, e as evidências petrológicas apresentadas nesta pesquisa, alguns pontos importantes são levantados para o avanço dessa discussão. O estudo de evolução textural e mineralógica realizado no charnoquito Rio Seco reforça o modelo de cristalização fracionada proposto por Felix *et al.* (2020) e é capaz de explicar a abundância de minerais óxido de Fe-Ti na variedade ortopiroxênio granodiorito, conferindo caráter oxidado dessas rochas. Frost & Frost (2008) sugerem um modelo de origem de granitos hidratados a partir de magmas charnoquíticos. Este tipo de magmatismo poderia acumular líquidos residuais enriquecidos em água nas porções superiores do plúton produzindo granitos com biotita e hornblenda. Dall'Agnol *et al.* (2017) considerou a hipótese assumindo que os granitoides neoarqueanos de Carajás corresponderiam aos altos níveis crustais de intrusões graníticas hidratada de biotita + hornblenda. O modelo é perfeitamente aplicável para explicar a origem e evolução da série charnoquítica Rio Seco, mas não parece consistente para justificar a origem do magmatismo responsável pela geração de granitos hidratados de outras suítes granitoides de Carajás a partir do charnoquito Rio Seco. Teores de água relativamente altos (>4% em peso) e pressões intermediárias (180-814 MPa) foram estimados para os magmas dos diferentes granitos neoarqueanos (Tab. 4), enquanto os magmas do charnoquito Rio Seco mostram conteúdos de água elevado (4,3-6,1% em peso) e pressões de colocação consideravelmente baixas (119-225 MPa), indicando níveis crustais mais rasos para a formação dessas rochas. O hornblenda-monzogranito apresenta baixos valores magnéticos, mas a baixa razão Fe/Fe+Mg em anfibólio e biotita indicam caráter oxidado para essas rochas, assim como nas demais variedades da

sequência charnoquítica Rio Seco. É provável que o caráter magnesiano e oxidado do charnoquito Rio Seco tenha sido herdado da fonte como proposto por Felix *et al.* (2020). Portanto, evidências petrológicas, geoquímicas e o amplo contraste entre as condições de oxidação gerando magmas oxidados e reduzidos entre o charnoquito Rio Seco e granitos afins não permitem admitir o modelo de Frost & Frost (2008) como capaz de explicar a origem de granitos neoarquenos ferrosos e reduzidos de Carajás. O que não descarta a hipótese de granitos hidratados tipo-A de caráter reduzido como Planalto terem sido formados por processo similar, porém com fontes distintas.

Apesar das semelhanças petrológicas entre os charnoquitos e o Diopsídio-Norito Pium, ambos possivelmente foram formados por processos e fontes distintos, enquanto a origem dos granitoides intermediários ligeiramente magnesiano de caráter oxidado e reduzido das suítes Vila União e Vila Jussara representam a transição entre granitos magnesianos e ferrosos, cuja formação foi fortemente influenciada por processos de fusão parcial e mistura de magmas em diferentes níveis crustais (*cf.* Silva *et al.* 2020) . Finalmente, os granitos ferrosos e reduzidos da suíte Planalto podem ter sua origem relacionada a fusão parcial de crosta toleítica portadora de piroxênio (Feito *et al.* 2012) ou ao resfriamento de magmas híbridos colocados em níveis crustais mais rasos como proposto por Maragoanha *et al.* (2020) para a geração dos granitos tipo-A.

2.6 CONCLUSÕES

- A série charnoquítica Rio Seco é intrusiva em leucogranitos e *sanukitoides* mesoarqueanos (2,88 Ga) e foi subdividida em quatro grupos petrográficos: (i) gabronorito; (ii) ortopiroxênio granodiorito; (iii) clinopiroxênio monzogranito; (iv) anfibólio monzogranito. Os valores magnéticos variam $0,231 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ Slv e mostram caráter bimodal. As rochas com piroxênio representam a população magnética A e os valores de SM estão entre $3,2 \times 10^{-3}$ e $22,1 \times 10^{-3}$ e as rochas sem piroxênio definem a população magnética B com valores entre $0,231 \times 10^{-3}$ e $0,309 \times 10^{-3}$.
- A temperatura de cristalização do anfibólio varia de 713 a 809°C e a pressão de colocação de 119 a 225 MPa. Graficamente, a pressão varia de ~120 a 300 MPa. O ΔNNO varia de -0,4 a +2,4 e o log da $f\text{O}_2$ de -12,0 a -16,0. A baixa razão $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ em hornblenda e biotita reitera graficamente as condições oxidantes dos charnoquitos que pertencem a série da magnetita. Portanto o Charnoquito Rio Seco foi formado em condições oxidantes acima dos tampões níquel-óxido de níquel (NNO), é magnesiano e apresenta condições de $f\text{O}_2$ semelhante aos granitos oxidados de Vila União e da Suíte Vila Jussara.
- As microestruturas de coronas registram o desequilíbrio físico-químico entre silicatos que propiciam a formação de minerais magnéticos nas rochas com piroxênio. A população A apresenta conteúdo modal de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7% com diferentes graus de exsolução da ilmenita em estágio magmático na série da magnetita-ulvoespínélio. A população magnética B mostra menores conteúdos de minerais opacos (<0,3%) e é caracterizada pela presença de goethita zonada formadas por processos de oxidação em estágio tardio a pós magmático.
- O estudo de química mineral combinado com análise textural e petrologia magnética indica condições distintas de formação entre a série charnoquítica e o granitos neoarqueanos afins. A sequência de formação definida para silicatos e minerais opacos é coerente com o contexto de cristalização fracionada no sentido gabronorito → ortopiroxênio granodiorito, enquanto a evolução dos monzogranitos envolveram hidratação. Apesar das semelhanças quanto ao estado de oxidação atuante durante a formação dos charnoquitos e granitos afins, eles são geoquimicamente distintos e formados por diferentes modelos petrogenéticos.

REFERÊNCIAS

- Acquafredda P., Caggianelli A., Piccarreta G. 1992. Late magmatic to subsolidus coronas in gabbroic rocks from the silamassif (Calberiya, Italy). *Mineralogy and Petrology Springer Wien*, **46**(3): 229- 238.
- 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., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**: 201-221
- Anderson J.L., Smith D.R. 1995. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in hornblende barometer. *Am. Mineral*, **80**: 549-559.
- Anderson J.L., Barth A.P., Mazdab J.L.W.F. 2008. Thermometers and thermobarometers in granitic systems. *Rev. Mineral Geochem*, **69**: 121-142.
- Avelar V.G., Lafon J.M., Correia Júnior 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.
- Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Krimski R., Macambira M.J.B. 2001. Pb-Pb and zircon ages of Archean syntectonic granites of the Carajás metallogenic province, Northern Brazil. In: Serviço Nacional de Geologia e Mineral, 3º Simpósio Sul-americano de Geologia Isotópica, *Resumos Expandidos*, Pucon, Chile, 1 CDrom.
- Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Macambira M.J.B., Barbey P., Boullier A.M. 2009. Structure, Petrology, Geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb Geochronology of the Synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type Granites from the Carajás Metallogenic Province, Northern Brazil. *The Canadian Mineralogist*, **47**: 1423-1440.
- Bédard J.H. 2006. A catalytic delamination-driven for coupled genesis of Archean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**: 1188-1214.
- Best M.G., Christiansen E.H. *Igneous Petrology*. Oxford: Blackwell, 2001.
- Buddington A.F., Lindsley D.H. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *J. Petrol*, **5**: 310-357.
- Claeson D.T. 1998. Coronas, reaction rims, symplectites and emplacement depth of Rymmen Gabbro, Transscandian igneous belt, southern Sweden. *Mineralogy Magazine*, **26**: 743-757.
- Clark D.A. 1999. Magnetic Petrology of igneous intrusion: implications for exploration and magnetic interpretation. *Explor. Geophys*, **30**: 5-26.

- Cunha I.R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province – Amazonian Craton: implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**: 100-121.
- Dall'Agnol R., Pichavant M., Champenois M. 1997. Iron-titanium oxide minerals of the Jamon Granite, eastern Amazonian region, Brazil: implications for the oxygen fugacity in Proterozoic, A-type granites. *An. Acad. Bras. Ci.*, **69**(3): 325-347.
- Dall'Agnol R., Ramos O.T., Magalhaes M.S., Macambira M.J.B. 1999. Petrology of the anorogenic, oxidized Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, **46**: 431-462.
- Dall'Agnol R., Oliveira D.C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, **93**: 215-233.
- Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J.P., Silva C.R.P., Santos R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – Implicações para a Evolução Arqueana da Província Carajás – Pará. In: 13º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, *Anais[...]*, CD-rom.
- 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 Neoarchean ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, **277**: 3-32.
- Fegley B. 2013. Practical chemical thermodynamics for geoscientists, 1st ed. In: Practical Chemical Thermodynamics for Geoscientists. *Elsevier, London*, p. 732.
- Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E., Macambira M.J.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Santos P. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Planalto granite suite and associated rocks: implications for the Neoarchean evolution of the Carajás Province. *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 as province, SE Amazonian craton (Brazil): petrogenetic constraints and intensive crystallization parameters. *J. S. Am. Earth Sci.*, **101**: 102-598.
- Felix W.Q., Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B., Silva F.F. 2023. Suíte Charnoquítica Pium: uma proposta litoestratigráfica para o magmatismo charnoquítico da Província Carajás. In: 17º Simpósio de Geologia da Amazônia (SGA). SBG–UFOPA–CPRM, Santarém (PA), *Anais[...]*.

Figueiredo M.A. 1999. *Minerais óxidos de Fe-Ti e susceptibilidade magnética em vulcânicas e granitóides proterozóicos da Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 182p.

Frost B.R. 1991. Introduction to oxygen fugacity and its petrologic importance. In: Lindsley, D.H. (Ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*, Reviews in Mineralogy. *Mineralogical Society of America*, **25**: 1-8.

Frost B.R., Lindsley D.H. 1991. Occurrence of iron-titanium oxides in igneous rocks. In: Lindsley, D.H. (Ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*, Reviews in Mineralogy. *Mineralogical Society of America*, **25**: 433-468.

Frost B.R., Frost C.D., Hulsebosch T.P., Swapp S.M. 2000. Origin of the charnockites of the Louis lake batholith, wind river range. *Wyoming. J. Petrol*, **41**: 1759-1776.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, **42**: 2033-2048.

Frost, B.R., Frost, C.D. 2008. On charnockites. *Gondwana Res*, **13**: 30-44.

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.

Haggerty S.E. 1981. Oxidation of opaque mineral oxides in basalts. In: Rumble D. *Oxide minerals*. 2nd ed. Washington, Miner. Soc. Am. P. Hg1-Hg99. (Short course notes). Reviews in Mineralogy, v.3.

Haggerty S.E., 1991. Oxide textures e a mini-atlas. In: Lindsley, D.H. (Ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*, Reviews in Mineralogy. *Mineralogical Society of America*, **25**: 129-219.

Hirschmann M.M., Ghiorso M.S., Davis F.A., Gordon S.M., Mukherjee S., Grove T.L., Krawczynski M., Medard E., Till C.B. 2008. Library of Experimental Phase Relations (LEPR): A database and Web portal for experimental magmatic phase equilibria data. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **9**: 1525-2027.

Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, **27**: 293-305.

Ishihara, S. 1981. The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol*, **75**: 458-484.

Lamoén H.V. 1979. Coronas in Olivine and Gabbros an Ores from Susimaki and Riuttamaa, Finland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **68**: 259- 268.

Lang H.M., Wachter A., Peterso V., Ryon J.G. 2004. Coexisting clinopyroxene / spinel and amphibole / spinel symplectites in metatroctolites from the Buck Creek ultramafic body. *American Mineralogist*, **89**: 20-30.

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

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

Marangoanha B., Oliveira D.C., Oliveira V.E.S., Galarza M.A., Lamarao C.N., 2019a. Neoarchean A-type Granitoids from Carajas. Province (Brazil): new insights from geochemistry, geochronology and microstructural analysis. *Precambrian Res*, **324**: 86–108.

Marangoanha B., Oliveira D.C., Galarza M.A., Marques G.T. 2020. Crustal anatexis and mantle-derived magmas forming Neoarchean A-type granitoids in Carajás Province, northern Brazil: petrological evidence and tectonic control. *Precambrian Res*, **338**: 105-585.

Naney M.T. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granite systems. *Am. J. Sci*, **283**: 993-1033.

Oliveira V.E.S., Oliveira D.C., Marangoanha B., Lamarão C.N. 2018. Geology, mineralogy and petrological affinities of the Neoarchean granitoids from the central portion of the Canaã dos Carajás domain, Amazonian craton. *Brazil. J. South Am. Earth Sci*, **85**: 135-159.

Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B. 2022. Geologia Regional da Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico: Proposta litoestratigráfica e implicações para a compartimentação tectônica. In: II Congresso Amzônico de Mineração, Metalurgia e Materiais – COAMA. Marabá (PA), *Anais*, 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., Silva F.F. 2023. Revisão litoestratigráfica com implicações para compartimentação tectônica da Província Mineral de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. In: 17º Simpósio de Geologia da Amazônia (SGA). SBG–UFOPA–CPRM, Santarém (PA), *Anais*[...].

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. *Chem. Geol*, **166**: 159-171.

Rajesh H.M., Belyanin G.A., Safonov O.G., Van Reenen D.D. 2019. Pyroxene-bearing low- and high-HREE TTGs from the northeastern margin of the Kaapvaal Craton, southern Africa: implications for Archean geodynamics. *Lithos* 348–349, 105181.

Ricci P.S.F. 2006. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil – a deep-seated high-T gabbroic pluton (charnockitoid-like) with xenoliths of enderbitic gneisses dated at 3002 Ma – the basement problem revisited. In: 9º Simpósio de Geologia da Amazônia, SBG, Belém, *Resumos expandidos*[...], 1 CDrom.

Ridolf F., Renzulli A., Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**: 45-66.

Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi L.A. *et al.* eds.). 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.

Sardinha A.S., Barros C.E.M., Krymsky R. 2006. Geology, geochemistry, and U–Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Journal South American Earth Science*, **20**: 327-339.

Schmidt M.W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **110**: 304-310.

Shelley D. *Igneous and metamorphic rocks under microscope classification features, microstructures and mineral preferred orientations*. Chapman & Hall: London, 1993.

Silva G.C., Lima M.I.C., Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. *Geologia das folhas SB-22 Araguaia e parte da SC-22 Tocantins*. Belém, DNPM, **4**:1-143.

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 F.F., Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Silva L.R., Cunha I.V. 2020. Lithological and structural controls on the emplacement of a Neoproterozoic plutonic complex in the Carajás province, southeastern Amazonian craton (Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **102**: 102696.

Silva L.R. 2022. *Petrogênese e História Tectônica dos Granitoides Mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) - Província Carajás*. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 317 p.

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 constraints on the petrogenesis and tectonic setting of Mesoarchean granitoids from the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **398**: 107204.

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-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 L.A.M., Dall'Agnol R., Cunha I.R.V., Silva F.F., Oliveira D.C. 2022. Magnetic petrology of the Neoarchean granitoids in the Vila Jussara Suite, Carajás Province, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **4**: 1-30.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 471-485.

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.

Taylor W.R. 1998. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, **172**: 381-408.

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.

Vasquez L.V., Rosa-Costa L.R., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. *Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG* texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. Organizadores: Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM.

Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org). 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. CPRM, Belém, pp. 329.

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

Wones D.R. 1981. Mafic silicates as indicators of intensive variables in granitic magmas. *Min Geol*, **31**(4): 191-212.

Wones D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite+magnetite+quartz in granitic rocks. *American Mineralogist*, **74**: 744-749.

CAPÍTULO 3 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A série charnoquítica Rio Seco é intrusiva em granitoides mesoarqueanos (2,88 Ga) e foi subdividida em quatro tipos petrográficos: (i) gabronorito; (ii) orto-clinopiroxênio granodiorito; (iii) clinopiroxênio-hornblenda monzogranito; (iv) hornblenda-biotita monzogranito. Os valores magnéticos obtidos para o corpo variam entre $0,231 \times 10^{-3}$ a $22,1 \times 10^{-3}$ SI e mostram caráter bimodal. As rochas com piroxênio concentram-se na população magnética A, cujos valores de SM variam entre $3,2 \times 10^{-3}$ e $22,1 \times 10^{-3}$, e são compatíveis com os valores de SM definidos para granitos neoarqueanos oxidados da Província Carajás. Já as rochas desprovidas de piroxênio definem a população magnética B, com valores mais baixos, entre $0,231 \times 10^{-3}$ e $0,309 \times 10^{-3}$, e estão compreendidos pela faixa de valores de SM definida para os granitos reduzidos.
- A temperatura de cristalização calculada para o anfibólio varia de 713 a 809°C e a pressão de colocação varia de 81 a 134Mpa para a equação de Ridolfi *et al.* (2010) e de 120 a 300 Mpa pelo geobarômetro de Anderson & Smith (1995). A fO_2 (ΔNNO) varia de -0,4 a +2,4 e o $\log fO_2$ de -12,0 a -16,0. A baixa razão $Fe/(Fe+Mg)$ em hornblenda e biotita confirma as condições oxidantes do Charnokito Rio Seco, que apresenta comportamento similar aos granitos da série magnetita. Diferentemente dos demais granitoides neoarqueanos da região de Canaã dos Carajás, as rochas estudadas são magnesianas, mas apresentam condições de fO_2 semelhantes (acima do tampão NNO) aos granitos oxidados das suítes Vila União e Vila Jussara.
- As texturas do tipo corona registram o desequilíbrio físico-químico entre silicatos que favorecem a formação de minerais magnéticos nas rochas com piroxênio (Fig. 10). As rochas da população A apresentam conteúdo modal de minerais opacos variando de 0,2 a 1,7% com diferentes graus de exsolução da ilmenita em estágio magmático (série da magnetita-ulvoespínélio). A população magnética B mostra menores conteúdos de minerais opacos (<0,3%) e é caracterizada pela presença frequente de goethita zonada formadas por processos de oxi-hidratação em estágio pós-magmático.
- O estudo de química mineral, combinado com aquele de análise textural e de petrologia magnética, indica condições distintas de formação entre a série charnoquítica e o granitos neoarqueanos correlatos. A sequência de formação definida para silicatos e minerais opacos é coerente com o contexto de cristalização fracionada no sentido gabronorito → ortopiroxênio granodiorito como proposto por Felix *et al.* (2020). Paralelamente a isto, A hidratação progressiva de magmas residuais foi responsável pela formação de monzogranitos com hornblenda e goethita (Fig.8). O caráter magnésiano e oxidado do magma charnoquítico

certamente foi herdado da fonte, portanto, evidências petrológicas, geoquímicas e o amplo contraste nas condições de oxidação entre Charnoquitos e granitos neoarqueanos, não permitem, a priori, admitir que estas rochas tenham suas origens relacionadas ao mesmo modelo petrogenético.

▪ Neste trabalho, o estudo de evolução textural e mineralógica reforça o modelo de cristalização fracionada proposto por Felix *et al.* (2020), explicando a abundância de minerais óxido de Fe-Ti na variedade granodiorítica (com ortopiroxênio), conferindo caráter oxidado dessas rochas. Os maiores níveis de saturação de H₂O nas variedades monzograníticas indicam sua origem a partir de líquidos residuais hidratados derivados da cristalização de magmas charnoquíticos. Desta forma, podemos admitir um modelo em que granitoides reduzidos e hidratados corresponderiam à exposição em altos níveis crustais de intrusões graníticas. Até aqui o modelo seria perfeitamente aplicável para explicar a origem e evolução da série de granitos reduzidos a partir de magmas charnoquíticos de alta temperatura. No entanto, os estudos sobre parâmetros de cristalização mostram que ambos os magmas são hidratados (H₂O > 4%), com aqueles charnoquíticos de baixas pressões (119-225 MPa) e os formadores de granitos reduzidos de pressões intermediárias (180-814 MPa), indicando colocação em níveis crustais mais profundos e controlada por altas temperaturas. Tais informações são condizentes com a forma de ocorrência do Charnoquito Rio Seco, cuja colocação é controlada por um sistema de lineamentos de comportamento dúctil-ruptil, e que é favorável à interpretação de um pluton colocado em níveis crustais rasos. Em condições de crosta mais profunda, a assimilação de componentes crustais pode originar magmatismo ferroso (cf. Frost *et al.* 2000).

REFERÊNCIAS

- 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.
- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.
- Althoff F.J., Barbey P., Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, **104**: 187-206.
- Anderson J.L. & Smith D.R. 1995. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, **80**(5-6): 549-559.
- Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Macambira M.J.B. 2009. Structure, petrology, geochemistry and zircon U-Pb and Pb-Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Canadian Mineralogist*, **47**: 1423-1440.
- Costa U.A.P., Paula R.R., Silva D.P.B., Tavares F.M., Oliveira J.K.M., Justo A.P. 2016. *Mapa geológico-geofísico ARIM Carajás*. Belém, CPRM. Escala 1:250.000. Programa Geologia do Brasil (PGB) – (Projeto Evolução Crustal e Metalogenia da Província Mineral de Carajás – ARIM Carajás).
- Cunha I.R.V., Dall'Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province – Amazonian Craton: implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**: 100-121.
- Dall'Agnol R., 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 Neoarchean 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 R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – Implicações para a Evolução Arqueana da Província Carajás – Pará. In: 13º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, *Anais[...]*, CD-rom.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. In: Dall'Agnol R., Rosa-Costa L.T., Klein E.L. (eds.). Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, *Abstracts Volume And Field Trips Guide*, p. 150.

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

Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., 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.

Felix W.Q., Oliveira D.C., Silva L.R., Nascimento A.C., Marangoanha B., Silva F.F. 2023. Suíte Charnoquítica Pium: uma proposta litoestratigráfica para o magmatismo charnoquítico da Província Carajás. In: 17º Simpósio de Geologia da Amazônia (SGA). SBG–UFOPA–CPRM, Santarém (PA), *Anais[...]*.

Frost B.R., Frost C.D., Hulsebosch T.P., Swapp S.M. 2000. Origin of the charnockites of the Louis lake batholith, wind river range, Wyoming. *J. Petrol.* **41**: 1759-1776

Gabriel E.O., Oliveira D.C., Galarza M.A. 2010. Geologia, petrografia e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu da região nordeste de Água Azul do Norte – PA, Província Mineral de Carajás. In: SBG, 45º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém, *Anais[...]*, CD-ROM.

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. 2016. Geologia, petrografia e geoquímica das associações leucogranítica arqueanas da área de Nova Canadá: Província Carajás. *Geologia USP. Série Científica*, **16**(2): 37-66.

Macambira M.J.B. & Lancelot J. 1996. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review*, **38** (12):1134-1142.

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., Oliveira D.C., Dall'Agnol R. 2019. The Archean granulite-enderbite complex of the northern Carajás province, Amazonian craton (Brazil): origin and implications for crustal growth and cratonization. *Lithos*, **350-351** e105275.

Marangoanha B., Oliveira D.C., Galarza M.A., Marques G.T. 2020. Crustal anatexis and mantle- derived magmas forming Neoproterozoic A-type granitoids in Carajás Province, northern Brazil: Petrological evidence and tectonic control. *Precambrian Research*, **338**: 105585

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.

Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S.A., Melo G.H.C., Silva M.A.D., Tassinari C.C.G., Sato K., 2015. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide– copper gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineral Deposita*, **50**: 517-546.

Nascimento A.C., Oliveira D.C., Silva L.R., Lamarão C.N. 2021. Mineral thermobarometry and its implications for petrological constraints on Mesoarchean granitoids from the Carajás Province, Amazonian Craton (Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **109**: 103-271.

Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Scaillet B. 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean sanukitoid rocks, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **51**(10): 2121-2148.

Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Almeida J.A.C. 2011. Petrology of the Mesoarchean Rio Maria suite and the discrimination of sanukitoid series. *Lithos*, **127**: 192-209.

Oliveira V.E.S., Oliveira D.C., Marangoanha B., Lamarão C.N. 2018. Geology, mineralogy and petrological affinities of the Neoarchean granitoids from the central portion of the Canaã dos Carajás domain, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **85**:135-159.

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: 2º Congresso Amzônico de Mineração, Metalurgia e Materiais – COAMA. Marabá (PA), *Anais[...]*, 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., Silva F.F. 2023. Revisão litoestratigráfica com implicações para compartimentação tectônica da Província Mineral de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. In: 17º Simpósio de Geologia da Amazônia (SGA). SBG–UFOPA–CPRM, Santarém (PA), *Anais[...]*.

Pimentel M.M. & Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb do Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. In: 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, *Resumos Expandidos*, p. 390-391.

Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(4): 597-606.

Ridolf F., Renzulli A., Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol*, **160**: 45-66.

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.* (eds.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília,DF, 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.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 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.

Silva F.F., Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Silva L.R., Cunha I.V. 2020. Lithological and structural controls on the emplacement of a Neoproterozoic plutonic complex in the Carajás province, southeastern Amazonian craton (Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **102**: 102696.

Silva L.R. 2022. *Petrogênese e história tectônica dos granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) - Província Carajás*. PhD Thesis. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 317 p.

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 constraints on the petrogenesis and tectonic setting of Mesoarchean granitoids from the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **398**: 107204.

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: 45º Congresso Brasileiro de Geologia, SBG, Belém, *Anais[...]*, CD ROM, p. 82.

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 L.R., Oliveira D.C., Santos M.N.S. 2018. Diversity, origin and tectonic significance of the Mesoarchean granitoids of Ourilândia do Norte, Carajás province (Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **82**: 33–61.

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 R.C.S., Sabóia A.M., Oliveira H.J. 2021b. *Projeto integração geológica-geofísica-metalogenética das sequências de Greenstone Belts do Domínio Rio Maria – Novas Fronteiras Rio Maria*. Escalas: 1:250.000–1:100.000. CPRM, Belém, p. 274.

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. 2021a. Mesoarchean migmatites of the Carajás Province: From intra-arc melting to collision. *Lithos*, **388-389**, 106078.

Sousa L.A.M., Dall'Agnol R., Cunha I.R.V., Silva F.F., Oliveira D.C. 2022. Magnetic petrology of the Neoarchean granitoids in the Vila Jussara Suite, Carajás Province, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **4**: 1-30.

Sousa S.D., Oliveira D.C., Gabriel E.O., Macambira M.J.B. 2010. Geologia, Petrografia e Geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da porção a leste da cidade de Água Azul do Norte (PA) - PMC. In: 45º Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, *Anais[...]*, CDrom.

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.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 471-485.

Teixeira M.F.B., 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.

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. 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 Unidade, p. 113-215.