







## Caracterização geológica, geoquímica e aerogeofísica dos granitoides arqueanos da porção sul do Domínio Rio Maria

*Geological, geochemical, and aerogeophysical characterization of archaean granitoids in the southern portion of the Rio Maria Domain*

José de Arimatéia Costa de Almeida<sup>1</sup> , Vinícius Eduardo Silva de Oliveira<sup>1</sup> , Jorge Luis Sousa Rocha<sup>1</sup> ,  
Gilmara Regina de Lima Feio<sup>1</sup> , Marcílio Cardoso Rocha<sup>1</sup> , Karla Petrucia Pedroso da Rocha<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Folha 17, Quadra 4, Lote Especial, Nova Marabá, CEP 68505-080, Marabá, PA, BR (ari@unifesspa.edu.br; vinicius.oliveira.geo@gmail.com; jorgeluisg12@hotmail.com; gilmarafeio@unifesspa.edu.br; marcilio.rocha@unifesspa.edu.br; karlapprocha@gmail.com)

Recebido em 8 de março de 2020; aceito em 12 de junho de 2020

### Resumo

As informações geológicas da porção sul do Domínio Rio Maria, Província Carajás (sudeste do Cratón Amazônico), são escassas. Dados aerogeofísicos e de campo permitiram definir a assinatura aerogeofísica das unidades geológicas, identificar enxames de diques (NE-SW, NW-SE e N-S) e reconhecer distintos padrões estruturais (NE-SW, NW-SE e N-S e E-W) na porção sul do Domínio Rio Maria. Três grupos de granitoides foram distinguidos nessa região: 1) associação tonalítica-trondhjêmica; 2) leucomonzogranitos e; 3) leucogranodioritos. Observa-se aumento do conteúdo de SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O e Rb e das razões alcáli-feldspato/plagioclásio, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O, FeOt/(FeOt + MgO), e decréscimo das proporções de TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub>, CaO, MgO, Sr e Zr no sentido grupo 1 → grupo 2. Os grupos 1 e 3 registram similaridades geoquímicas. No entanto, o grupo 1 exibe teores mais elevados de CaO e mais baixos de K<sub>2</sub>O e Rb em relação ao grupo 3. Essas rochas apresentam moderada a alta razão La/Yb e ausência de anomalia de európio. Já o grupo 2 mostra enriquecimento dos elementos terras-raras leves (ETRL) e moderado fracionamento dos elementos terras-raras pesados (ETRP), com moderada a pronunciada anomalia negativa de Eu. O grupo 1 representa as rochas mais antigas do Tonalito Arco Verde (2,96 ± 0,02 Ga), enquanto as rochas dos grupos 2 e 3 mostram fortes analogias com os leucogranitos potássicos e com os leucomonzogranitos-granodioritos ricos em Ba e Sr do Domínio Rio Maria, respectivamente. A integração dos dados multifontes permite assumir que a granitogênese arqueana do Domínio Rio se estende por pelo menos 80 km a sul da cidade de Redenção, e as séries granitoides aflorantes nessa porção são análogas àquelas presentes na região de Pau D'Arco, Rio Maria, Bannach e Xinguara.

**Palavras-chave:** Cratón Amazônico; Tonalitos; Trondhjemitos; Leucomonzogranitos; Leucogranodioritos.

### Abstract

The geological information about the southern portion of the Rio Maria domain, Carajás Province (southeastern Amazonian craton) is scarce. Aerogeophysical and field data allowed to define the aerogeophysical signature of the geological units, to identify mafic dike swarms with NE-SW, NW-SE, and N-S trends and to recognise different structural patterns (NE-SW, NW-SE e N-S, and E-W) in the southern portion of the Rio Maria domain. Three granitoid groups were distinguished in this region: 1) tonalitic-trondhjemitic association; 2) leucomonzogranites; 3) leucogranodiorites. The SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Rb contents and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O, FeOt/(FeOt + MgO) ratios increase and TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub>, CaO, MgO, Sr, and Zr decrease from group 1 to group 2. Groups 1 and 3 showed some geochemical similarities, however, group 1 exhibits higher content of CaO and lower K<sub>2</sub>O and Rb compared to group 3. These rocks exhibit moderate to high La/Yb<sub>n</sub> ratio and absence of Eu anomaly, while group 2 shows light rare earth elements (LREE) enrichment, moderate heavy rare earth elements (HREE) fractionation, and moderate to prominent negative Eu anomaly. The granitoids from group 1 are representative of the oldest rocks of the Arco Verde tonalite (2.96 ± 0.02 Ga), whereas the rocks of groups 2 and 3 show strong analogies with potassic leucogranites and Ba- and Sr-rich leucogranodiorite-granite suites from the Rio Maria domain, respectively. The integration of the multi-source data allows us to assume that the Archean granitoid series from Rio Maria domain extends for at least 80 km south of the city of Redenção, and the granitoids outcropping in this area are similar to those of the regions of Pau D'Arco, Rio Maria, Bannach, and Xinguara.

**Keywords:** Amazonian craton; Tonalites; Trondhjemitos; Leucomonzogranites; Leucogranodiorites.

## INTRODUÇÃO

O Domínio Rio Maria integra a porção sul da Província Carajás (Vasquez et al., 2008; Figura 1), no Cráton Amazônico. Ele é largamente constituído de granitoides arqueanos originados no intervalo de 2,98 a 2,87 Ga e similares às típicas séries de granitoides presentes em outros terrenos arqueanos. O conhecimento geológico sobre tais rochas deve-se, em grande parte, aos estudos sistemáticos realizados pelo Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG/UFGPA). Entretanto, esses estudos se concentraram nas áreas de Xinguara, Rio Maria, Bannach e Redenção, ocasionando um desnível de conhecimento no Domínio Rio Maria, haja vista que as informações acerca da granitogênese arqueana em sua porção sul, mais precisamente ao sul da cidade de Redenção, são relativamente escassas. Os trabalhos de Rolando e Macambira (2002, 2003) sobre as idades Pb-Pb em zircão e os dados de Nd dos granitoides da região da Serra do Inajá contribuíram para posicionar estratigraficamente tais rochas e sugerir a extensão do Domínio Rio Maria para essa região. Entretanto, essas rochas carecem de estudos geológicos, petrográficos e geoquímicos mais detalhados, com o intuito de nivelar o grau de conhecimento geológico no Domínio Rio Maria, além de estabelecer comparações com as séries granitoides aflorantes no seu setor norte.

Recentemente, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) gentilmente cedeu aos autores desta pesquisa, o banco de dados geofísicos do projeto de aerogeofísica Conceição do Araguaia, o qual inclui a Folha Redenção (SC.22-X-A), localizada na porção sul do Domínio Rio Maria. Os produtos aerogeofísicos gerados a partir do processamento digital integrados com dados geológicos, petrográficos e geoquímicos obtidos neste trabalho permitiram definir com maior precisão os limites geológicos das unidades aflorantes, refletindo na elaboração de um mapa geológico mais consistente e confiável dessa porção, mesmo em áreas de acesso limitado e amostragem reduzida, contribuindo, assim, para entender a extensão dos principais grupos de granitoides arqueanos presentes no Domínio Rio Maria.

## Geologia regional

A Província Carajás expõe o maior volume de rochas arqueanas do Cráton Amazônico (Figura 1), sendo incluída dentro da Província Amazônia Central (Tassinari e Macambira, 2004) ou como uma província tectônica independente (Santos et al., 2000). A Província Carajás é dividida em: Domínio Carajás, situado no setor norte, e Domínio Rio Maria, localizado na porção sul (Souza et al., 1996; Santos, 2003; Vasquez et al., 2008; Figura 1).

O Domínio Carajás, de idade meso a neoarqueana, é subdividido nos subdomínios Sapucaia, Bacia Carajás e Canaã

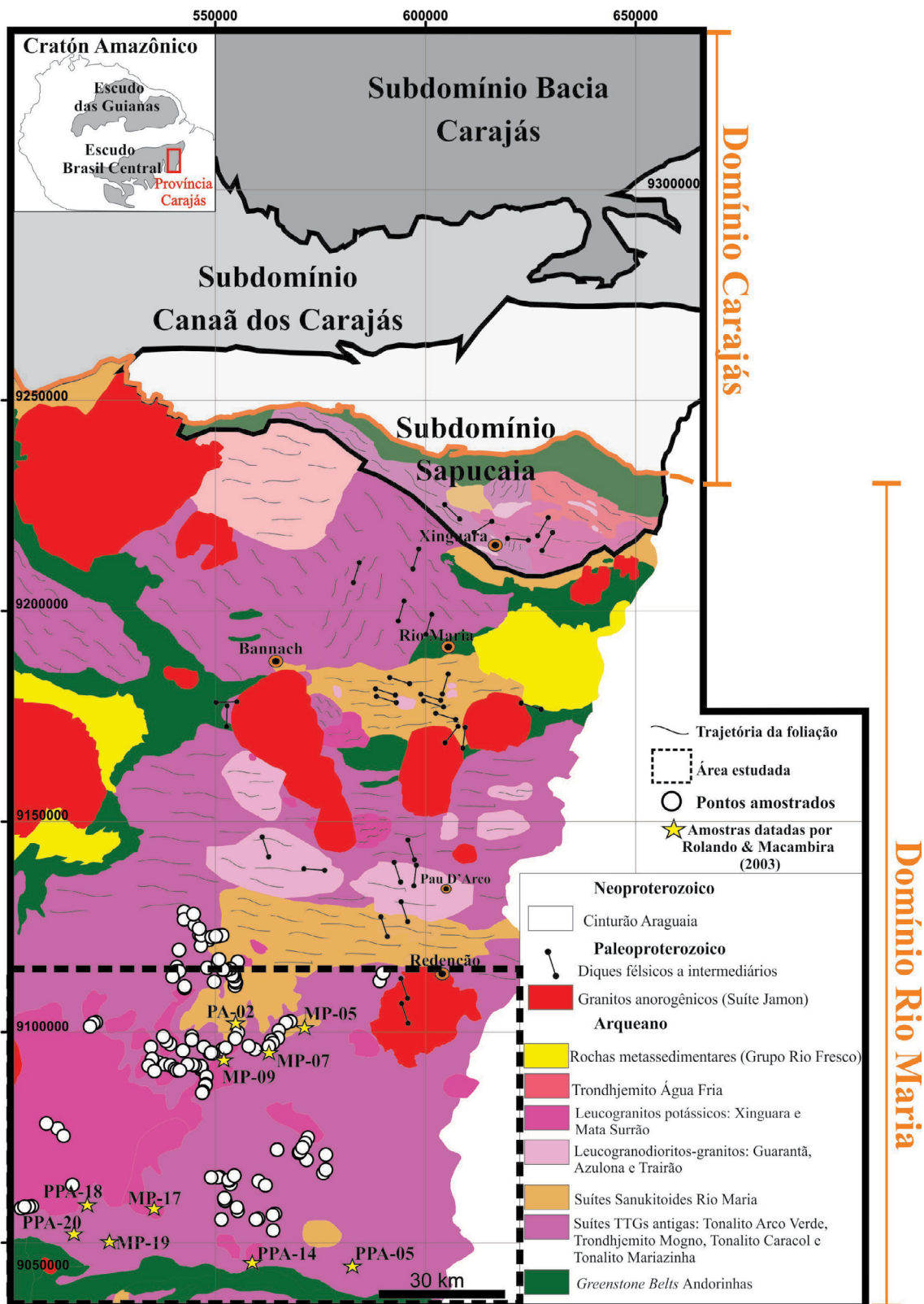
dos Carajás (Dall'Agnol et al., 2013; Figura 1). O subdomínio Sapucaia (2,95 a 2,73 Ga; Oliveira et al., 2010; Dall'Agnol et al., 2013; Gabriel e Oliveira, 2014; Santos et al., 2013; Silva et al., 2014; Santos e Oliveira, 2014; Rodrigues et al., 2014) apresenta unidades similares, em termos litológicos, ao Domínio Rio Maria —, no entanto elas foram fortemente afetadas por eventos tectônicos neoarqueanos. Já o subdomínio Bacia Carajás é predominantemente constituído de rochas metavulcânicas máficas a intermediárias e formações ferríferas bandadas incluídas no Supergrupo Itacaiúnas (~2,76 Ga; Gibbs et al., 1986; Machado et al., 1991). O subdomínio Canaã dos Carajás apresenta evolução geológica mais complexa, em que vários episódios magmáticos são registrados:

- episódio 1 (~ 3,0 Ga): formação do Tonalito Bacaba;
- episódio 2 (2,96 – 2,93 Ga): colocação do Granito Canaã dos Carajás e das rochas mais antigas do Trondhjemito Rio Verde;
- episódio 3 (2,87 – 2,83 Ga): cristalização do Complexo Tonalítico Campina Verde, das rochas mais jovens do Trondhjemito Rio Verde e dos granitos Cruzadão, Bom Jesus e Serra Dourada; e
- episódio 4 (~ 2,75 Ga): marcado pela origem dos granitoides sódicos da Suíte Pedra Branca e de rochas com afinidade charnokítica ligadas ao Complexo Pium (ver, especialmente, Feio et al., 2013; Moreto et al., 2011).

Granitos subalcalinos do tipo-A, de idade neoarqueana (~2,73 Ga), cortam indiscriminadamente as unidades do Domínio Carajás, sendo incluídos na Suíte Vila Jussara (região do subdomínio Sapucaia; Dall'Agnol et al., 2017) e na Suíte Planalto (subdomínio Canaã dos Carajás; Feio e Dall'Agnol, 2012; Feio et al., 2013; Dall'Agnol et al., 2017; Cunha et al., 2016) e representados pelos plútons Estrela (Barros et al., 2004), Serra do Rabo (Sardinha et al., 2006) e Igarapé Gelado (Barbosa et al., 2004), na região do subdomínio Bacia Carajás. Tais granitos são ausentes no Domínio Rio Maria.

O Domínio Rio Maria (Vasquez et al., 2008) corresponde a um núcleo mesoarqueano (3,0 – 2,86 Ga) bem preservado, composto de *greenstones belts* contendo metakomatititos, metabasaltos, metagabros e rochas metaígneas félsicas a intermediárias com intercalações de metagrauvascas (Supergrupo Andorinhas; Docegeo, 1988; Huhn et al., 1988; Souza et al., 2001). Os *greenstones belts* são seccionados por uma variedade de granitoides arqueanos originados no intervalo entre 2,98 e 2,86 Ga (Dall'Agnol et al., 2006; Almeida et al., 2010, 2011, 2013). Almeida (2010) distinguiu quatro grupos de granitoides arqueanos composicionalmente distintos no Domínio Rio Maria:

- grupo 1: associações TTGs originadas em três episódios magmáticos (2,96; 2,93 e 2,86 Ga), representadas pelo Tonalito Arco Verde, Trondhjemito Mogno, Complexo Caracol, Tonalito Marizinha e Trondhjemito



**Figura 1.** Mapa geológico simplificado da Província Carajás, mostrando os domínios tectônicos, conforme Vasquez et al. (2008), e os subdomínios Sapucaia, Canaã dos Carajás e Bacia Carajás, propostos por Dall'Agnol et al. (2013). As unidades estratigráficas do Domínio Rio Maria, a área de trabalho e os pontos descritos estão destacados no mapa.

Água Fria — sendo este o que marca o evento TTG mais jovem do Domínio Rio Maria (Leite et al., 2004; Almeida et al., 2011);

- grupo 2: Suíte Sanukitoide Rio Maria, com idade de 2,87 Ga (Oliveira et al., 2009);
- grupo 3: leucogranitos potássicos compostos dos plútons Xinguara e Mata Surrão (~2,86 Ga; Leite, 2001; Leite et al., 2004; Almeida et al., 2013);
- grupo 4: leucogramonzogranitos-granodioritos com alto Ba e Sr (~2,87 Ga; Althoff et al., 2000; Almeida et al., 2010; 2013).

Os domínios tectônicos da Província Carajás são localmente cobertos pelos sedimentos do Grupo Rio Fresco (Domínio Rio Maria) e pela Formação Águas Claras (Domínio Carajás) — provavelmente também de idade arqueana — (Macambira e Lafon, 1995), e cortados por granitos anorogênicos paleoproterozoicos do tipo-A e diques associados (Dall’Agnol et al., 2005).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados aerogeofísicos utilizados neste trabalho são oriundos do Projeto Aerogeofísico Conceição do Araguaia, cedidos à Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa) pelo Serviço Geológico do Brasil. O levantamento na área de estudo foi realizado no período de 14 de fevereiro de 2012 a 1º de julho de 2012 e teve como características:

- intervalo entre as medições: 0,1s para a magnetometria e 1,0s para a espectrometria;
- linhas de voo espaçadas em 500 m com direção N-S;
- linhas de controle com espaçamento de 10 km e direção E-W;
- área total de 61.797 km<sup>2</sup>;
- magnetômetro de bombeamento ótico de vapor de céσιο e gamaespectrômetro de 256 canais espectrais, junto ao sistema de navegação GPS com recepção de 12 canais com correção diferencial “realtime”.

O processamento dos dados aerogeofísicos foi realizado em três etapas principais: pré-processamento, interpolação e geração de produtos para interpretação. Durante todas as etapas de trabalho, foi utilizado o programa computacional Oasis Montaj, versão 8.3 (Geosoft). Na fase de pré-processamento, o banco de dados geofísicos foi avaliado a fim de realizar possíveis correções. Para os dados aeromagnetométricos, aplicaram-se os métodos de “Diferença Quarta” e “Parâmetro P” (Blum, 1999). A interpolação em malha regular foi realizada utilizando algoritmo bidirecional, com tamanho de célula definido para 125 m (um quarto do espaçamento da linha de voo), o qual apresentou os melhores resultados para magnetometria e gamaespectrometria.

Os dados de gamaespectrometria interpolados foram os canais de K%, eTh, eU e Contagem Total. Já o canal de magnetometria interpolado refere-se ao Campo Magnético Anômalo (CMA), do qual, posteriormente, foram obtidos os outros produtos magnéticos, sendo eles: amplitude do sinal analítico, primeira derivada vertical e gradiente horizontal total. A interpretação qualitativa e o realce das imagens foram realizados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizando o *software* ArcGis 10.2.2, e os principais domínios aerogeofísicos foram classificados visualmente.

Cerca de 200 amostras de mão oriundas da porção sul do Domínio Rio Maria foram cedidas pela empresa de mineração Terrativa Minerais S.A (Figura 1). A descrição macroscópica dessas amostras permitiu identificar os principais grupos, a distribuição dos litotipos que afloram naquela região e traçar estratégias para a futura etapa de campo. O trabalho de mapeamento geológico foi realizado entre os dias 20 e 23 de março de 2013, e consistiu em coleta sistemática de amostras para estudos petrográficos e descrição de afloramentos em seus aspectos litológicos e estruturais, enfatizando-se as relações de contato. Durante essa fase, interpretações a partir de imagens de satélite (Landsat 7 e TM), mosaicos de radar (Shuttle RADAR Topography Mission – SRTM) e de cartas aeroradiométricas e aeromagnetométricas foram integradas com os dados de campo, objetivando definir os principais *trends* estruturais e contatos geológicos.

O estudo petrográfico envolveu a identificação e a descrição sistemática dos minerais, o estudo das texturas magnéticas, deformacionais e de alteração, além da obtenção de composições modais utilizando um contador eletrônico de pontos de alta precisão da marca Headledge, acoplado a um microscópio ZEISS Axion 40, com média de contagem de 2.000 pontos em 20 amostras representativas dos principais grupos de rochas granitoides estudados, sendo 12 amostras de rochas tonalíticas-trochjemiticas, quatro de leucomonzogranitos e quatro de leucogranodioritos. Posteriormente, os dados modais obtidos foram plotados nos diagramas Q-A-P (Le Maitre, 2002) e Q-(A + P)-M.

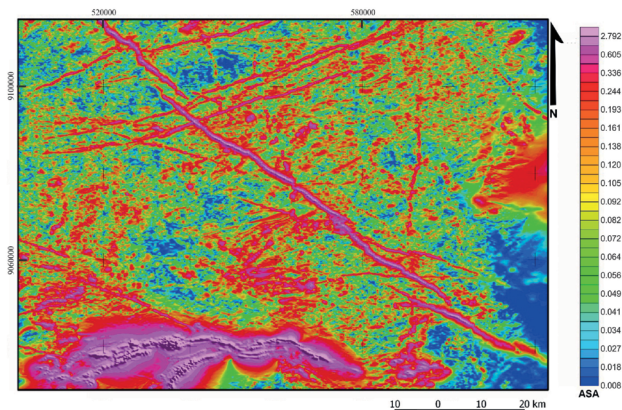
Neste trabalho, foram realizadas 19 análises químicas em rocha total de amostras representativas dos principais grupos de granitoides aflorantes na área de estudo. A preparação das amostras foi feita na Oficina de Preparação de Amostras (OPA), pertencente ao IG/UFPA. Nessa fase, as amostras foram trituradas, pulverizadas e quarteadas, visando obter boa representatividade do material. As análises foram realizadas no Laboratório ACME Analytical Laboratories S.A (Vancouver, Canadá). Os elementos maiores e menores foram obtidos por ICP-ES e os traços, incluindo terras raras, por Inductively Coupled Plasma — Mass Spectrometry (ICP-MS). Os dados obtidos permitiram discriminar e classificar com maior precisão os granitoides estudados, bem

como compará-los com rochas similares pertencentes ao Domínio Rio Maria.

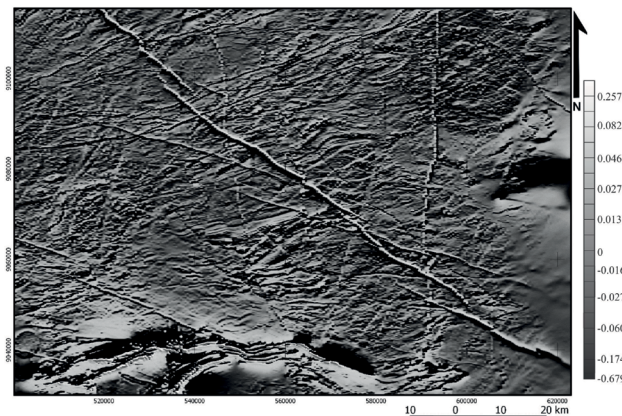
## DADOS AEROGEOFÍSICOS

### Produtos aeromagnetométricos

A análise integrada das imagens de amplitude do sinal analítico do campo magnético anômalo (Figura 2) e da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Figura 3) permitiu gerar o mapa de alinhamentos magnéticos (Figura 4), no qual se observam os principais *trends* e a intensidade (1ª ordem, para as mais altas, e 2ª ordem, para as mais baixas respostas magnéticas) dos alinhamentos magnéticos da área estudada. Baseado nos *trends* direcionais, foi possível observar quatro grupos



**Figura 2.** Imagem de Amplitude do Sinal Analítico das anomalias da área de estudo.



**Figura 3.** Imagem da Primeira Derivada Vertical das anomalias da área de estudo.

de alinhamentos preferenciais na área selecionada para o estudo (Figura 4):

- grupo 1: são os mais expressivos na área, mostram direção entre 40 e 80° Az e ocorrem predominantemente nas porções norte e nordeste. Por vezes, representam domínios estreitos e muito alongados, associados aos alinhamentos de 1ª ordem;
- grupo 2: consiste em alinhamentos na direção 80–110° Az, os quais são destacados principalmente na porção centro-sul da área;
- grupo 3: representam alinhamentos com direção entre 130 e 170° Az e são marcados por uma grande estrutura de 1ª ordem, estreita e muito alongada (~135 km), com direção NW-SE que corta toda a área;
- grupo 4: ocorre de forma muito restrita, com direção N-S e localizada na porção centro-leste da área.

### Produtos aerogamaespectrométricos

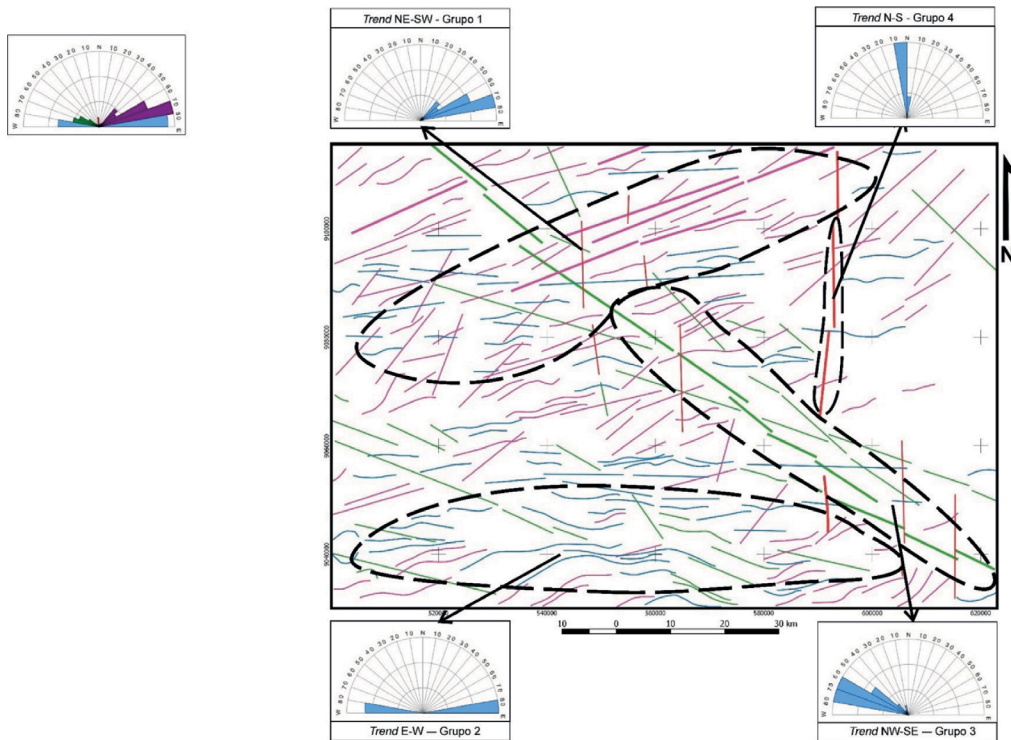
Na análise integrada dos canais radiométricos (Figura 5), é possível observar os seguintes padrões da área estudada:

- a porção noroeste da área é dominada por fortes anomalias positivas com direções NE-SW;
- uma forte anomalia positiva com formato circular com dimensões aproximadas de 20 × 25 km na porção nordeste da área;
- baixa anomalia positiva na porção sul da área, com formato de direção E-W;
- no extremo leste, observam-se respostas radiométricas com intensidade que varia de baixa a moderada;
- a porção central é dominada por anomalias com direções NW-SE e resposta radiométrica moderada;
- anomalias com formato dentrítico e dispersas na área, sendo visível no canal do K e nas imagens ternárias.

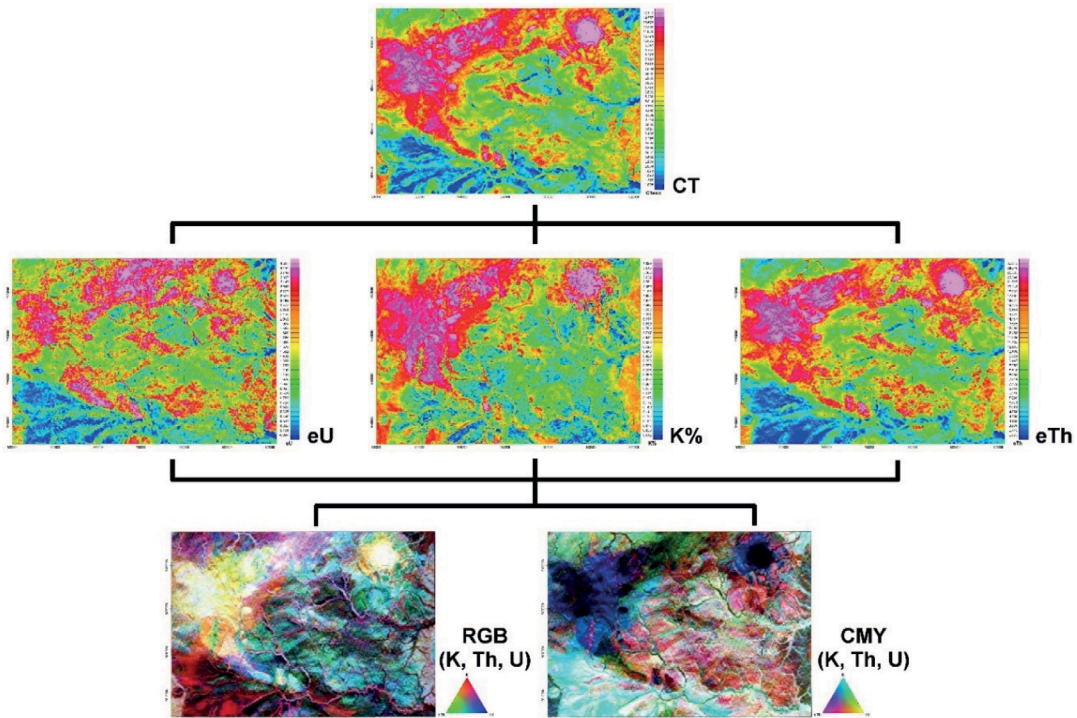
A classificação dos dados gamaespectrométricos (Figura 6) foi realizada a partir de uma classificação visual, usando como base os mapas de composição ternária RGB e CMY, além dos canais individuais K, Th e U. Os teores dos radioelementos foram divididos em três níveis de concentração: alto, médio e baixo. As combinações de níveis de concentração dos três elementos resultaram em 15 classes com coloração distinta nas imagens ternárias RBG e CMY.

### Produtos aerogeofísicos integrados

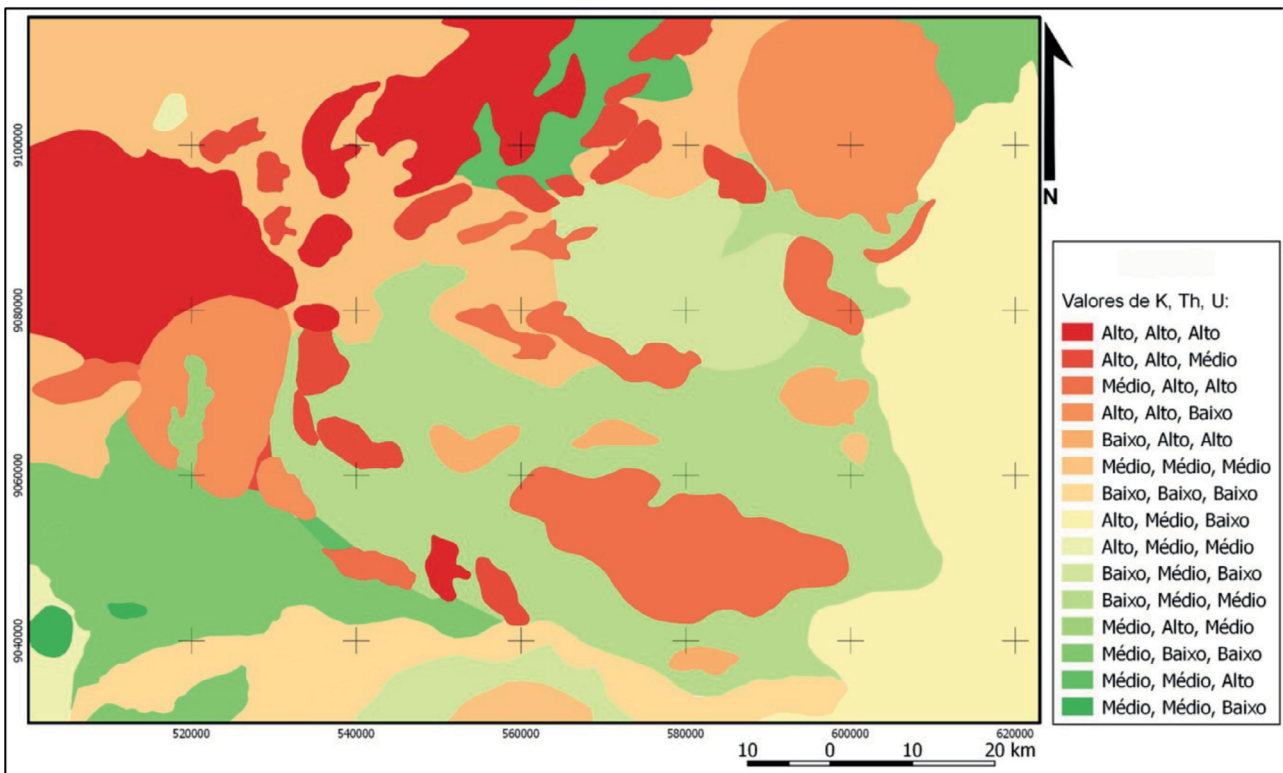
Visando definir com maior precisão os contatos entre as unidades litogeofísicas, imagens SRTM foram integradas com os dados gamaespectrométricos e magnetométricos (Figura 7). Composições ternárias, quando sobrepostas a modelos digitais de terreno (Figura 7), tornam-se uma excelente ferramenta para análise de limites litológicos, uma vez que os dados de concentração dos três elementos associados ao relevo podem



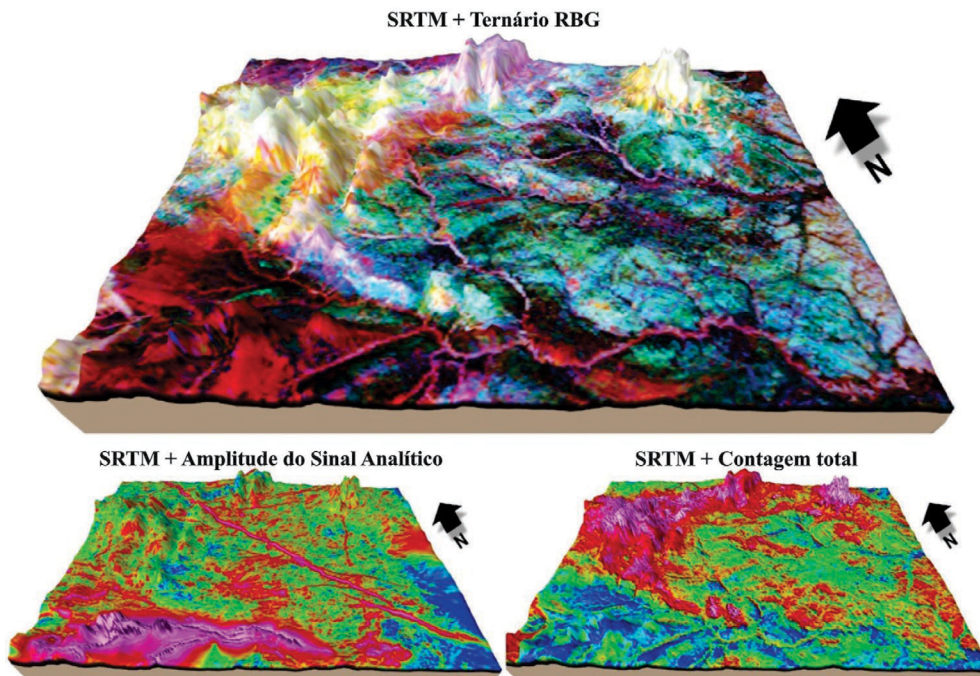
**Figura 4.** Mapa de alinhamentos magnéticos e rosetas com os *trends* preferenciais. Em roxo, alinhamentos retilíneos e curvilíneos na direção preferencial NE/SW; em azul, verde e vermelho, nas direções preferenciais E-W, NW-SE e N-S, respectivamente. A espessura do traço representa a ordem do alinhamento, sendo os mais espessos de primeira ordem e os mais delgados de segunda ordem.



**Figura 5.** Imagens de contagem dos canais radiométricos derivados da aerogamaespectrometria utilizados neste trabalho.



**Figura 6.** Mapa de classificação gamaespectrométrica, exibindo as 15 classes obtidas com base nos valores de K, Th e U visualmente interpretadas dos mapas de composição ternária RGB e CMY, além dos canais individuais do K, do Th e do U.



SRTM: Shuttle RADAR Topography Mission.

**Figura 7.** Produtos de aerogeofísica integrados com modelo digital de terreno da área de estudo.

refletir assinaturas de unidades geológicas, sendo facilmente distinguidos e úteis na confecção de mapas geológicos.

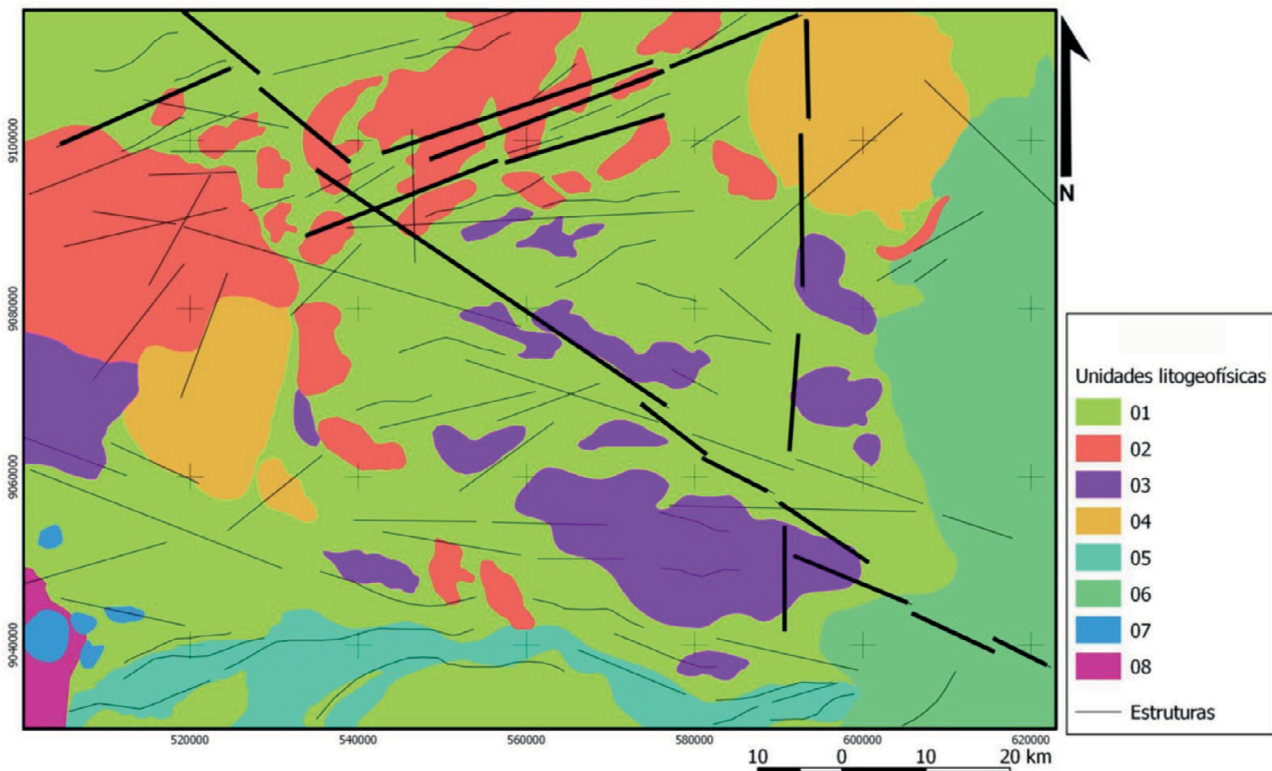
A integração dos dados gamaespectrométricos com magnetométricos permitiu a confecção do mapa litogeofísico (Figura 8), o qual ilustra domínios com assinaturas gamaespectrométricas e magnetométricas semelhantes, além de estruturas magnéticas alinhadas. As 15 classes obtidas a partir da classificação gamaespectrométrica visual (Figura 6) são interpretadas juntamente com os domínios magnéticos (Figura 2), com o intuito de limitar as unidades litogeofísicas (Figura 8). Os alinhamentos magnéticos mais representativos de 1ª e 2ª ordens (Figura 4) são representados no mapa litogeofísico, e podem refletir estruturas e/ou corpos com alta suscetibilidade magnética.

Com base na integração dos dados aerogeofísicos e topográficos, foi possível definir oito unidades litogeofísicas:

- Unidade 1: dominante na área estudada, sendo caracterizada por relevo arrasado e respostas radiométricas baixas a moderadas. Associam-se às classes gamaespectrométricas 6, 10, 11, 13 e 14 com os domínios magnéticos 1 e 2;
- Unidade 2: constituída de anomalias radiométricas altamente positivas de dimensões variadas, que ocorrem na porção norte e oeste da área em relevo acidentado.

As anomalias na porção oeste apresentam orientação NE-SW preponderante;

- Unidade 3: caracterizada por anomalias radiométricas positivas moderadas, com formas elipsioidais, sendo o maior eixo na direção NW-SE, ocorrendo na parte central da área, constituindo relevo arrasado;
- Unidade 4: formada por três anomalias de forma circular com altos valores radiométricos e relevo acidentado;
- Unidade 5: localizada na parte sul da área, sendo caracterizado por forte anomalia magnética orientada na direção E-W e baixas contagens radiométricas. O relevo dessa unidade é fortemente acidentado;
- Unidade 6: recobre boa parte leste da área, de norte a sul. Assinalada com variação de médio a baixo para concentrações de potássio, tório e urânio. Possui baixas cotas topográficas e seus limites magnéticos são bem delimitados;
- Unidade 7: presente na porção sudoeste da área, sendo representada por pequenos corpos circulares com diâmetro que varia de 2 a 5 km. São marcados pelo relevo arrasado e pelos baixos valores radiométricos e magnéticos, contrastando fortemente com a região circunvizinha;
- Unidade 8: localizada no extremo sudoeste da área, apresentando moderados valores radiométricos para os



**Figura 8.** Mapa litogeofísico com as informações extraídas da magnetometria e da gamaespectrometria integradas.



canais de potássio, tório e urânio. Seus limites são bem definidos em imagens ternárias (Figuras 5 e 7).

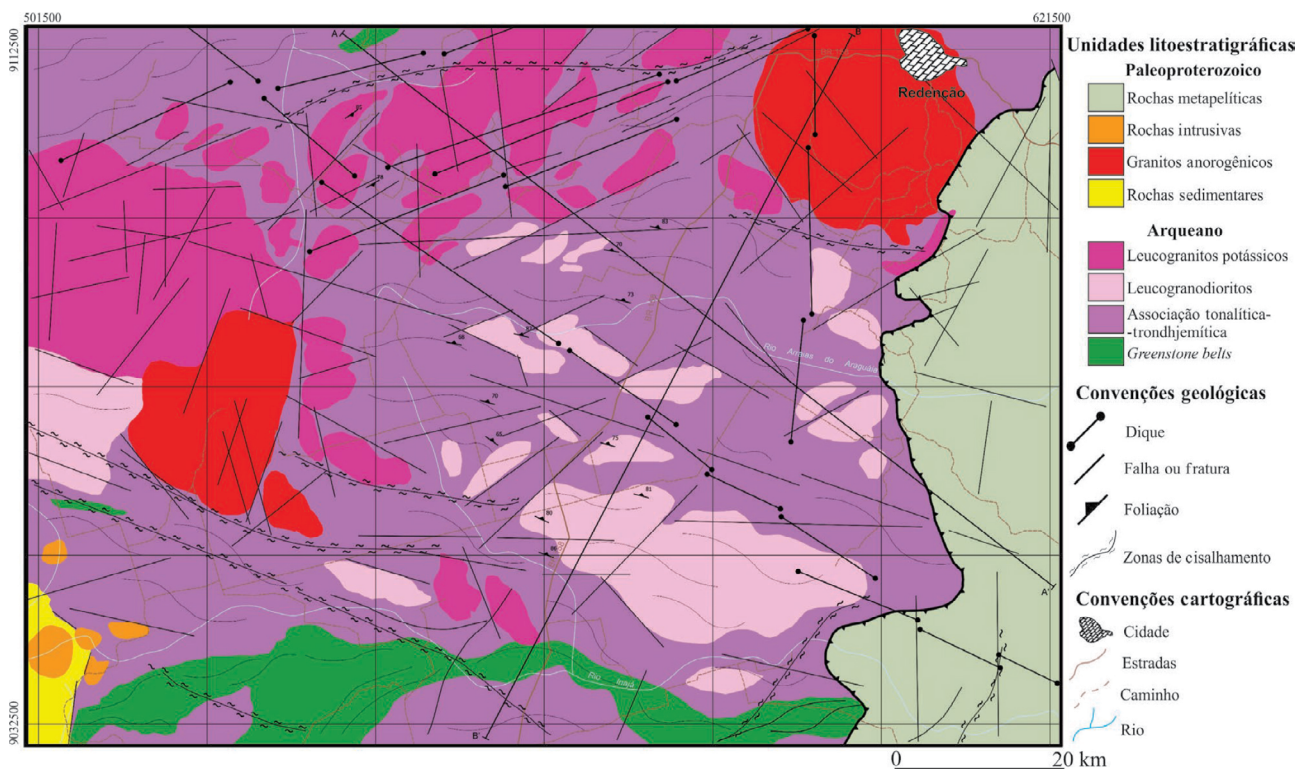
## GEOLOGIA DA ÁREA

### Mapa geológico e caracterização aerogeofísica das unidades

A integração das informações obtidas a partir dos dados aerogeofísicos, radar e de campo permitiu a confecção do mapa e do perfil geológico exibido na Figura 9. Trabalhos anteriores revelam que a área estudada é dominada por um núcleo mesoarqueano (3,0 – 2,86 Ga; Rolando e Macambira, 2002) bem preservado e composto do *greenstone belt* Serra do Inajá (3,05 – 2,90 Ga) e de granitoides de composições TTGs, leucogranodioríticas e leucograníticas (Neves e Vale, 1999; Oliveira, 2014; Rocha, 2014; Pacheco Jr., 2015). Essas rochas são localmente cobertas por sedimentos do Grupo Rio Fresco e cortadas por granitos anorogênicos paleoproterozoicos do tipo-A e diques associados (Dall’Agnol et al., 2005; Vasquez et al., 2008). Na porção leste da área, as rochas arqueanas são cobertas por seqüências metassedimentares de idade neoproterozoica da Faixa Araguaia.

Com base nas análises feitas neste trabalho, observa-se que os limites do *greenstone belt* Serra do Inajá, aflorante na porção sul da área, são facilmente reconhecidos a partir das respostas magnéticas e das feições acidentadas de relevo (Figuras 2, 7 e 9). Essas rochas correspondem à unidade litogeofísica 05, sendo caracterizadas por forte anomalia magnética orientada na direção E-W (domínio magnético 3) e baixas respostas radiométricas. O comportamento fortemente magnético deve-se à dominância de rochas de composição metaultramáfica (serpentinitos, metaperidotitos, esteatitos, actinolitos e clorititos) e metamáfica (quartzos monzodioritos a monzogabros e metandesitos), além de formações ferríferas bandadas, que compõem essa seqüência (Vasquez et al., 2008).

No extremo sudeste da área, uma anomalia radiométrica moderada, relacionada à unidade litogeofísica 8, pode representar metassedimentos arqueanos associados ao Grupo Rio Fresco, conforme o mapa geológico de Vasquez et al. (2008). Nessa mesma porção, há ocorrência de corpos circulares circunscritos em relevo arrasado e com baixas contagens gamaespectrométricas e magnetométricas relacionados à unidade litogeofísica 7, contrastando fortemente com a região circunvizinha. Essas rochas não foram mapeadas em trabalhos anteriores e podem



**Figura 9.** Mapa geológico proposto para a porção sul do Domínio Rio Maria, obtido por meio da integração dos dados multifontes apresentados neste trabalho.

representar complexos alcalinos, caldeiras de vulcão ou até mesmo astroblemas.

O granito paleoproterozoico Redenção, e outros corpos anorogênicos localizados na porção oeste da área de estudo, apresenta assinatura aerogeofísica compatível com a unidade litogeofísica 4, e suas áreas de ocorrência coincidem com anomalias circulares com altos valores radiométricos e relevo acidentado.

A interpretação dos dados aeromagnéticos associados com informações geológicas de campo nos permitiu identificar a ocorrência de três populações de enxames de diques, os quais foram considerados em imagens aeromagnetométricas como alinhamentos de 1ª ordem:

- diques NE-SW: relacionam-se aos alinhamentos magnéticos do grupo 1 — sendo os mais expressivos na área —, mostram direção entre 40 e 80° Az e ocorrem nas porções norte e nordeste, representando domínios estreitos e muito alongados;
- diques NW-SE: são marcados por grande estrutura com dezenas de quilômetros, seccionando toda a área de trabalho e associada ao grupo de alinhamentos magnéticos 3;
- diques N-S: ocorrem de forma muito restrita, localizados na porção centro-leste da área, associados ao grupo de alinhamentos magnéticos 4.

A área de ocorrência da Faixa Araguaia é nitidamente marcada por meio das imagens aeromagnéticas. Além disso, apresenta contagem radiométrica baixa a moderada no canal do potássio e baixas cotas topográficas.

## GRANITOGÊNESE ARQUEANA NA PORÇÃO SUL DO DOMÍNIO RIO MARIA

A parte sul do Domínio Rio é constituída predominantemente de granitoides de composição tonalítica-trondhjemítica, ocupando as porções mais arrasadas do relevo, e de modo subordinado por rochas leucomonzograníticas-granodioríticas, as quais normalmente sustentam as serras e os morros presentes na área, além de um extenso dique gabroico de orientação NW-SE (Figuras 2 e 3), concordante com o *trend* estrutural da área deste estudo.

### Aspectos geológicos da associação tonalítica-trondhjemítica

Os granitoides tonalíticos-trondhjemíticos ocorrem na forma de um extenso batólito com baixa contagem radiométrica nas imagens aerogamaespectrométricas, correspondendo à unidade litogeofísica 1. Uma das suas feições típicas é o bandamento composicional de ocorrência muito regular definido por bandas com espessuras variáveis entre 3 e 15 cm, formadas predominantemente por minerais félsicos, alternadas por

bandas enriquecidas em minerais máficos. Na maioria das vezes, essas rochas mostram-se muito deformadas, porém a textura magmática primária da rocha se encontra preservada em afloramentos fora das zonas de cisalhamento, podendo-se observar a textura equigranular desses granitoides e a presença de plagioclásio zonado com formas euédricas e de quartzo intersticial, com ligeira deformação intracristalina. O bandamento composicional dispõe-se predominantemente na direção NW-SE e mergulhos que variam de 60° a subverticais para NE. Por vezes, os bandamentos acham-se localmente deslocados por bandas de cisalhamento dúctil de espessura centimétrica. As lineações mineral e de estiramento, quando presentes, são sempre sub-horizontais e marcadas pelo alongamento dos cristais de quartzo. As zonas de cisalhamento são localmente preenchidas por rochas pegmatoides, aplito ou quartzo, sendo verticais ou subverticais com sentido de deslocamento sub-horizontal. Essas feições ocorrem tanto de modo isolado quanto em pares conjugados formando ângulos variáveis (de 20 a 90°). Enclaves máficos de composição quartzo-diorítica são normalmente encontrados alongados e concordantes com o plano de foliação da rocha.

Rolando e Macambira (2003) obtiveram idades de 2.948 ± 7 Ma, 2.981 ± 8 Ma e 2.988 ± 5 Ma para tonalitos dessa região e associaram tais rochas ao Tonalito Arco Verde.

### Aspectos geológicos dos leucomonzogranitos-granodioritos

As rochas leucomonzograníticas-granodioríticas constituem um conjunto de plútons e *stocks* coalescentes que produzem alta contagem radiométrica em imagens gamaespectrométricas correlacionáveis à unidade litogeofísica 2, sendo facilmente delimitados de suas rochas encaixantes. Afloram predominantemente em serras, morros e encostas localizadas na porção norte da área de estudo (Figura 7).

Em geral, na maioria dos afloramentos essas rochas apresentam caráter aparentemente isotrópico. No entanto, em zonas com maior deformação é possível observar uma foliação NW-SE e mergulhos de alto ângulo a verticais, sendo maior nas proximidades dos contatos com as encaixantes. A foliação é marcada por estruturas de fluxo e xistosidade, ambas de caráter não penetrativo, bem como, mais localmente, por bandamento magmático.

As rochas leucomonzograníticas ocorrem associadas aos leucogranodioritos, porém não é possível determinar a relação temporal entre ambas. No entanto é evidente, em vários afloramentos, a relação de intrusão dessas rochas nas encaixantes de composições tonalíticas-trondhjemíticas. Diques máficos de orientação NW-SE seccionam as rochas leucograníticas.

Duas amostras de leucogranitos, localizadas na borda sudeste dos plútons estudados (Figura 1), foram datadas por Rolando e Macambira (2003) e produziram idades

de  $2.881 \pm 2$  Ma (com idade de xenocristais de 2.930 e 2.960 Ma) e  $2.875 \pm 11$  Ma (com idade de xenocristais de 2.900 e 2.980 Ma).

## Petrografia

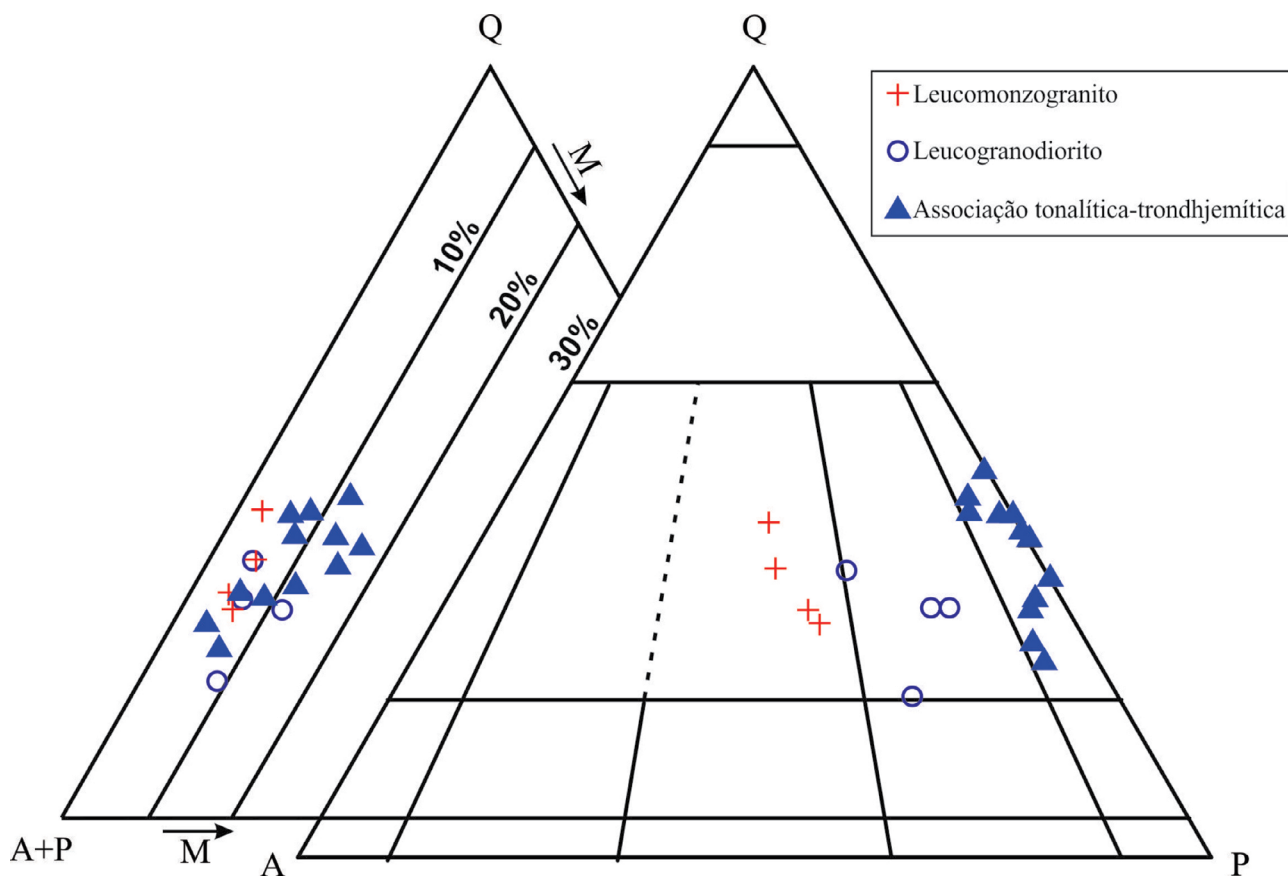
As rochas da área de estudo foram separadas segundo suas similaridades composicionais, evidenciando a composição modal e os aspectos texturais delas. Com exceção dos tonalitos, os granitoides analisados apresentam conteúdos de minerais máficos inferiores a 10%, sendo classificados como rochas hololeucocráticas (Le Maitre, 2002). Tais rochas apresentam variações nas razões plagioclásio/feldspato alcalino, possibilitando a classificação delas em tonalitos/trondhjemitos, leucomonzogranitos e leucogranodioritos (Figura 10).

### Tonalitos/trondhjemitos

Essas rochas são petrograficamente uniformes e, em amostra de mão, caracterizam-se por exibir coloração cinza-clara a escura e textura fanerítica, equigranular ou heterogranular,

com granulação média, eventualmente grossa ou fina. Em rochas afetadas por cisalhamento, são comumente observados porfiroclastos ovalados de plagioclásio em matriz fina, fortemente foliada. A quantidade de matriz recristalizada permite classificá-las em protomilonitos e milonitos. Os níveis félsicos do bandamento composicional são constituídos de plagioclásio e quartzo. Já as bandas máficas são formadas por biotita e acessórios.

Essas rochas são classificadas como tonalitos ou trondhjemitos (Le Maitre, 2002), sendo esse último litotipo dominante no universo das amostras estudadas. O conteúdo de máficos varia entre 16 e 3,5%. Essas rochas são compostas de oligoclásio, quartzo e biotita, como minerais principais; zircão, allanita, apatita, magnetita, epidoto e titanita, como fases acessórias primárias; e muscovita, clorita, epidoto (substituindo plagioclásio), hematita, goethita, pirita e calcopirita. Apatita, zircão, magnetita e allanita são fases precoces, sendo seguidas por plagioclásios hipidiomórficos e geralmente apresentando-se fortemente saussuritizados e zonados. A biotita inicia sua cristalização após o plagioclásio e mostra equilíbrio com epidoto euédrico. A formação do quartzo inicia após ou simultaneamente à cristalização



**Figura 10.** Diagramas Q-A-P e Q-(A + P)-M para os granitoides arqueanos da porção sul do Domínio Rio Maria.

da associação epidoto + biotita, sendo a titanita e o álcali-feldspato os últimos minerais originados na sequência de cristalização dos tonalitos/trondhjemitos estudados.

#### *Leucomonzogranitos-granodioritos*

Os leucomonzogranitos e os leucogranodioritos ocupam domínios bem definidos no diagrama Q-A-P (Le Maitre et al., 2002; Figura 10), não havendo campos de superposição de suas rochas. Os primeiros são constituídos de monzogranitos equigranulares médios de coloração rosada com tons de cinza, baixo grau de anisotropia e aspecto maciço em amostra de mão. Já os leucogranodioritos apresentam maior grau de anisotropia e textura equigranular grossa ou aspecto porfírico.

O diagrama Q-(A + P)-M mostra que os granitos de ambos os grupos são hololeucocráticos (minerais máficos

< 10%). A mineralogia deles é similar, apresentando biotita, como a principal fase ferromagnésiana, titanita, allanita, epidoto, apatita, zircão e magnetita, representando os minerais acessórios; e clorita, muscovita, carbonato e epidoto, representando os minerais secundários dessas rochas. Outra analogia petrográfica dessas rochas se refere à ocorrência de epidoto automórfico, interpretado como de origem magmática.

#### **Geoquímica**

##### *Tonalitos/trondhjemitos*

As composições químicas de amostras representativas dos granitoides arqueanos aflorantes na porção sul do Domínio Rio Maria são exibidas na Tabela 1, e o comportamento dos elementos maiores *versus* SiO<sub>2</sub> pode ser visualizado nos

**Tabela 1.** Composição química de amostras representativas dos granitoides arqueanos da porção sul do Domínio Rio Maria.

Elementos	Associação tonalítica-trondhjemítica								
	Amostras								
	KVRAS 24	851545-13	KVRAS 4	KVRAS 7	KVRAS 11	MP-19	KVRAS 10	KVRAS 19	Média
SiO <sub>2</sub>	68,52	68,52	69,74	69,77	70,79	70,81	71,34	71,36	70,11
TiO <sub>2</sub>	0,37	0,32	0,36	0,41	0,26	0,24	0,21	0,31	0,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,69	15,98	14,81	14,94	15,46	15,03	15,84	15,31	15,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	3,41	3,14	3,26	3,56	2,82	2,63	1,81*	2,54	3,05
MnO	0,05	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04
MgO	1,08	0,88	1,40	1,47	0,85	0,66	0,56	0,68	0,95
CaO	3,18	3,34	3,28	3,30	3,27	3,13	2,93	2,71	3,14
Na <sub>2</sub> O	4,79	5,01	3,91	3,99	4,92	4,45	5,30	5,03	4,68
K <sub>2</sub> O	1,94	1,16	1,92	1,64	1,02	1,53	1,22	1,66	1,51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,11	0,11	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09
PF	0,60	1,20	0,90	0,60	0,20	1,10	0,50	0,10	0,65
Total	99,74	99,71	98,83	99,81	99,71	99,69	99,81	99,82	99,64
Ba	609	297	821*	414	525	707*	516	304	444,17
Sr	505	470	307	207	516	460	485	373	415,33
Rb	99*	50	64	74	49	70	35*	86	65,63
Zr	194	157	133	126	112	132	95	151	137,44
Y	11	4	7	5	3	2	3	7	4,29
Nb	8	3	5	6	3	4	2	7	4,23
La	58,50	12,00	36,70	32,50	17,60	15,80	10,60	24,30	21,36
Ce	93,50	19,80	60,20	51,00	27,30	24,50	16,80	40,10	34,24
Pr	10,71	2,39	6,66	5,99	3,00	2,32	1,88	4,29	3,79
Nd	34,50	9,40	20,50	21,00	10,30	7,70	7,00	14,60	12,93
Sm	4,34	1,55	2,58	3,21	1,60	0,90	1,17	2,36	1,91
Eu	0,70	0,59	0,72	0,73	0,46	0,69	0,41	0,64	0,61
Gd	2,96	1,52	1,64	2,25	1,02	0,61	1,06	1,71	1,40
Tb	0,38	0,18	0,23	0,25	0,10	0,07	0,11	0,23	0,17
Dy	1,72	0,79	1,24	1,10	0,50	0,29	0,72	1,36	0,86
Ho	0,31	0,16	0,20	0,19	0,09	0,05	0,10	0,22	0,14

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Elementos	Associação tonalítica-trondhjemítica								
	Amostras								
	KVRAS 24	851545-13	KVRAS 4	KVRAS 7	KVRAS 11	MP-19	KVRAS 10	KVRAS 19	Média
Er	0,93	0,36	0,62	0,44	0,12	0,14	0,28	0,68	0,38
Tm	0,14	0,05	0,10	0,06	0,02	0,02	0,04	0,09	0,05
Yb	0,85	0,32	0,61	0,41	0,14	0,14	0,23	0,62	0,35
Lu	0,14	0,06	0,08	0,06	0,02	0,02	0,03	0,11	0,05
A/CNK	1,00	1,03	1,02	1,04	1,02	1,02	1,03	1,02	1,03
#Mg	0,39	0,36	0,46	0,45	0,37	0,33	0,38	0,35	0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> +MgO+MnO+TiO <sub>2</sub>	4,91	4,39	5,06	5,49	3,96	3,56	2,60	3,56	4,09
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0,41	0,23	0,49	0,41	0,21	0,34	0,23	0,33	0,32
Sr/Y	47,21	114,54	46,50	38,35	198,46	287,63	186,50	52,51	97,72
(La/Yb) <sub>N</sub>	49,37	26,90	43,16	56,86	90,17	80,95	33,06	28,11	51,32
Eu/Eu*	0,56	1,16	1,00	0,79	1,03	2,69	1,10	0,93	1,24
Elementos	Leucogranodioritos								
	Amostras								
	KVRAS 27	KVRAS 29	MP-07	PPA-20	KVRAS 2 <sup>a</sup>	KVRAS 5	KVRAS 28	Média	
SiO <sub>2</sub>	67,41	68,05	70,14	70,61	71,03	71,72	73,13	70,30	
TiO <sub>2</sub>	0,43	0,39	0,29	0,23	0,33	0,20	0,18	0,29	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,03	15,63	14,94	15,24	14,76	15,29	14,26	15,16	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	3,75	3,13	2,82	2,39	2,70	1,77	1,88	2,63	
MnO	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	
MgO	1,08	1,07	0,89	0,55	0,70	0,47	0,39	0,74	
CaO	3,35	2,50	3,05	2,62	2,28	2,28	1,90	2,57	
Na <sub>2</sub> O	4,65	4,20	4,26	4,84	3,82	4,87	4,07	4,39	
K <sub>2</sub> O	2,17	3,72	2,36	2,25	3,97*	2,70	3,31	2,75	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,17	0,09	0,09	0,10	0,06	0,05	0,10	
LOI	0,60	0,80	0,80	0,80	0,00	0,40	0,50	0,65	
Total	99,67	99,69	99,68	99,65	99,73	99,78	99,69	99,69	
Ba	1.201	1.031	820	875	1.139	693	1.421	1.081,17	
Sr	673*	404	414	536	428	420	279*	440	
Rb	122	103	90	62*	124	105	97	107	
Zr	146	215	102	109	152	102	138	138	
Y	10	6	10	3	7	1	4	6	
Nb	7	5	7	3	8	5	2	5	
La	45,20	73,10	25,00	19,60	39,80	22,00	49,60	39,19	
Ce	73,80	115,90	46,70	36,40	66,60	29,60	70,40	62,77	
Pr	8,37	13,01	5,13	4,11	7,26	2,68	7,88	6,92	
Nd	28,60	42,50	18,50	13,60	24,70	7,50	25,30	22,96	
Sm	3,74	5,16	3,15	1,94	3,62	0,67	3,14	3,06	
Eu	0,99	0,82	0,69	0,52	0,85	0,43	0,80	0,73	
Gd	2,45	2,81	2,81	1,28	2,22	0,46	2,08	2,02	
Tb	0,30	0,28	0,36	0,14	0,25	0,05	0,17	0,22	
Dy	1,75	1,12	1,94	0,68	1,31	0,18	0,74	1,10	
Ho	0,28	0,17	0,35	0,09	0,23	0,03	0,11	0,18	
Er	0,78	0,54	0,95	0,33	0,71	0,12	0,27	0,53	
Tm	0,14	0,08	0,14	0,05	0,09	0,01	0,03	0,08	
Yb	0,77	0,51	0,87	0,27	0,54	0,14	0,27	0,48	
Lu	0,12	0,08	0,12	0,05	0,09	0,03	0,05	0,08	
A/CNK	1,00	1,01	0,99	1,01	1,00	1,01	1,04	1,01	
#Mg	0,36	0,40	0,39	0,31	0,34	0,35	0,29	0,35	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> +MgO+MnO+TiO <sub>2</sub>	5,31	4,62	4,04	3,20	3,77	2,46	2,47	3,70	

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Elementos	Leucogranodioritos							
	Amostras							
	KVRAS 27	KVRAS 29	MP-07	PPA-20	KVRAS 2 <sup>a</sup>	KVRAS 5	KVRAS 28	Média
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0,47	0,89	0,55	0,46	1,04	0,55	0,81	0,68
Sr/Y	68,01	68,49	41,42	162,48	65,88	299,71	77,61	111,94
(La/Yb) <sub>N</sub>	42,11	102,81	20,61	52,07	52,87	112,72	131,77	73,57
Eu/Eu*	0,94	0,60	0,69	0,95	0,85	2,24	0,90	1,02
Elementos	Leucomonzogranitos							
	Amostras							
	851207- 6A	KVRAS 17	MP-17*	851208-02	Média			
SiO <sub>2</sub>	73,11	73,77	74,21	75,08	74,04			
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,13	0,09	0,12	0,12			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,27	13,70	13,65	12,92	13,64			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1,43	1,67	1,31	1,54	1,49			
MnO	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03			
MgO	0,26	0,36	0,18*	0,26	0,29			
CaO	1,28	1,15	0,85	0,55	0,96			
Na <sub>2</sub> O	3,46	3,42	3,86	3,28	3,51			
K <sub>2</sub> O	5,18	4,73	4,78	5,32	5,00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02			
LOI	0,60	0,80	0,80	0,70	0,73			
Total	99,76	99,78	99,80	99,82	99,79			
Ba	970	734	304	479	622			
Sr	184	218	84	176	166			
Rb	213	220	287	279	250			
Zr	146	81	98	107	108			
Y	13	20	51	15	25			
Nb	7	9	20	13	12			
La	112,60	32,20	34,40	54,20	58,35			
Ce	160,50	24,90	60,70	97,20	85,83			
Pr	20,59	4,58	8,25	10,73	11,04			
Nd	64,60	15,80	28,60	34,60	35,90			
Sm	8,15	2,56	6,01	4,94	5,42			
Eu	0,67	0,76	0,47	0,41	0,58			
Gd	4,56	2,76	6,56	3,27	4,29			
Tb	0,55	0,39	1,16	0,43	0,63			
Dy	2,69	2,38	6,82	2,48	3,59			
Ho	0,45	0,58	1,48	0,49	0,75			
Er	1,20	1,56	4,31	1,49	2,14			
Tm	0,18	0,24	0,69	0,24	0,34			
Yb	1,13	1,34	4,40	1,53	2,10			
Lu	0,19	0,22	0,66	0,24	0,33			
A/CNK	1,05	1,07	1,04	1,06	1,06			
#Mg	0,27	0,30	0,21	0,25	0,26			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> +MgO+MnO+TiO <sub>2</sub>	1,84	2,19	1,62	1,95	1,90			
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1,50	1,38	1,24	1,62	1,44			
Sr/Y	13,69	10,70	1,64	12,13	9,54			
(La/Yb) <sub>N</sub>	71,48	17,24	5,61	25,41	29,93			
Eu/Eu*	0,31	0,87	0,23	0,29	0,42			

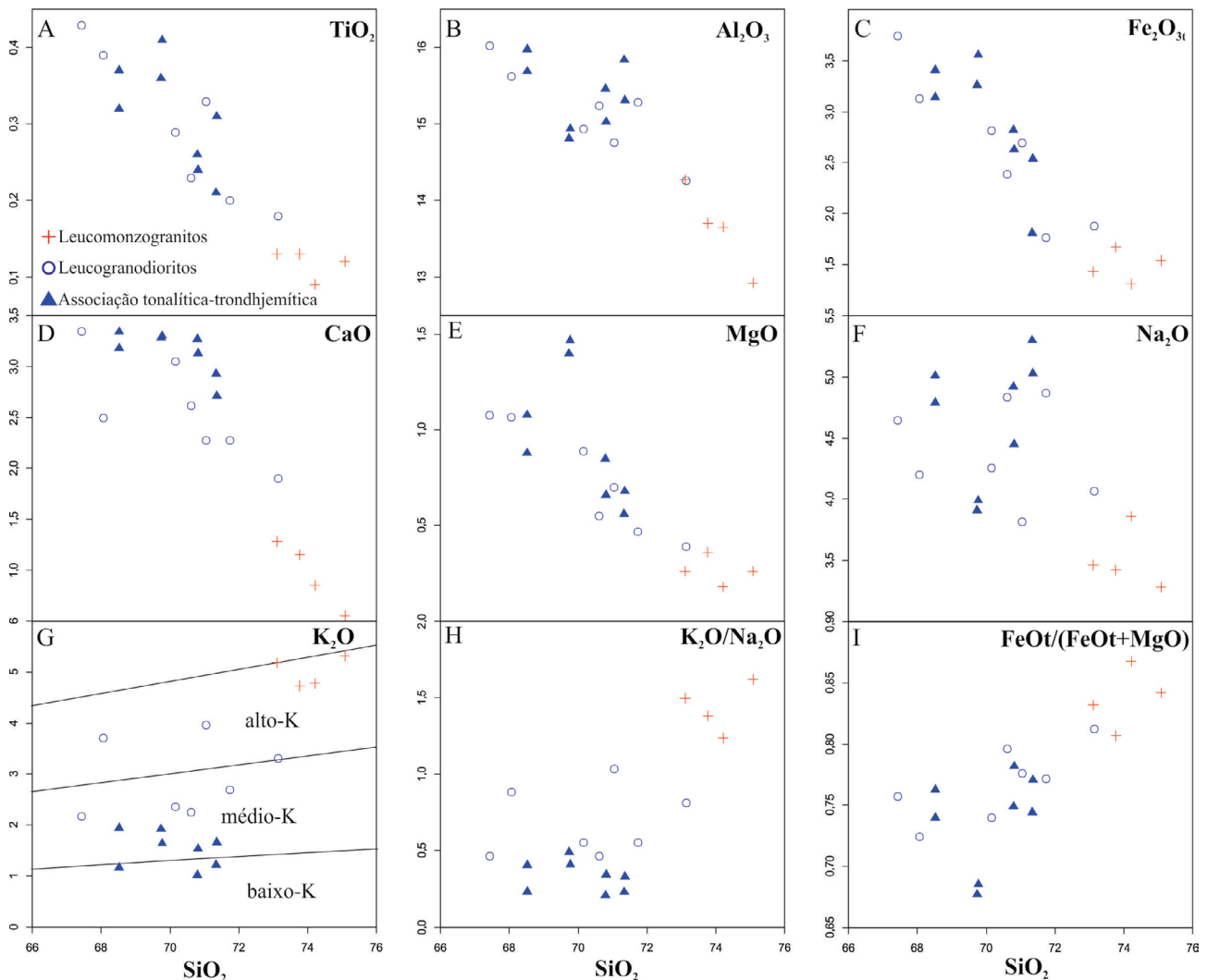
Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>: ferro total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; PF: perda ao fogo; A/CNK: razão molecular (Al/Ca + Na + K); Mg#: razão molecular Mg/(Mg + Fe); La<sub>N</sub>, Yb<sub>N</sub>, Eu<sub>N</sub>: valor dos elementos terras raras normalizados pelo condrito de Evensen et al. (1978); Eu/Eu\*: anomalia de európio calculada por meio da equação [Eu/(Eu\*)] = [(Eu<sub>N</sub>)/((Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>)/2)]; LOI: Loss on Ignition; \*valor anômalo.

diagramas de Harker da Figura 11. O conteúdo de  $\text{SiO}_2$  das associações tonalíticas-trondhjemíticas varia entre 68,52 e 71,36%. De modo geral, os óxidos  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  mostram correlação negativa. Já  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  exibem teores variáveis com o aumento de  $\text{SiO}_2$ . Os conteúdos de  $\text{CaO}$  oscilam entre 2,71 e 3,34% (média de 3,14%), enquanto os de  $\text{K}_2\text{O}$  não ultrapassam 2%. Já os valores de #Mg se concentram entre 0,33 e 0,46%. As razões  $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$  e  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  são menores que 0,8 e 0,5, respectivamente, e consideradas baixas para granitoides. O caráter leucocrático dessas rochas é atestado pelos baixos valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$  ( $\leq 5,5\%$  com média de 4,09).

As associações TTGs estudadas pertencem às séries cálcico-alcálicas médio- $\text{K}_2\text{O}$  (Figura 11G) e apresentam conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$  para  $\text{SiO}_2 = 70\%$ , sendo, desse modo, classificadas como TTG alta alumina (Barker e Arth, 1976).

Os diagramas clássicos para discriminação de granitoides arqueanos são exibidos na Figura 12, os quais mostram que a maioria das amostras é peraluminosa (Figuras 12A e 12F) e incide no domínio dos tonalitos (Figura 12B) na classificação de Debon e Le Fort (1983), plota no campo dos granodioritos no diagrama R1-R2 (De La Roche et al., 1980; Figura 12C), e no limite entre os campos dos tonalitos e trondhjemitos (definidos por Barker, 1979; Figura 12D), no diagrama de O'Connor (1965). As amostras tendem a acompanhar o final do *trend* das séries trondhjemíticas (Figura 12E) propostas por Barker e Arth (1976).

As associações tonalíticas-trondhjemíticas apresentam baixos teores de elementos de alto campo de força — Nb (2 – 8 ppm), Ta (0,1 – 2,9 ppm), Zr (95 – 254 ppm), Y (2 – 10 ppm), Hf (3 – 5 ppm) — e quantidades variáveis de elementos litófilos de raio iônico grande, com baixo



**Figura 11.** Diagrama de Harker (wt. %) para os granitoides arqueanos da porção sul do Domínio Rio Maria.

Rb (35 – 99 ppm) e valores moderadamente elevados de Sr (207 – 516 ppm) e Ba (297 – 821 ppm) (Figura 13; Tabela 1).

Em linhas gerais, os padrões dos elementos terras raras (ETR) da associação tonalítica-trondhjemitica revelam enriquecimento dos elementos terras raras leves (ELTL) em relação aos elementos terras raras pesados (ETRP) e ausência de anomalia pronunciada de európio, com exceção das amostras KVRAS-24 e MP-19, as quais apresentam anomalia negativa ( $Eu/Eu^* = 0,56$ ) e fortemente positiva ( $Eu/Eu^* = 2,69$ ), respectivamente (Figuras 14A e 14B). Um padrão côncavo dos ETRP, particularmente entre Dy e Er, é observado nas amostras KVRAS-19, KVRAS-24, KVRAS-10 e MP-19.

Com base nas razões  $La/Yb$  e  $Sr/Y$ , é possível discriminar dois grupos:

- tonalitos-trondhjemitos com moderadas razões  $La/Yb$  e  $Sr/Y$ , que compreendem a maioria das rochas analisadas,

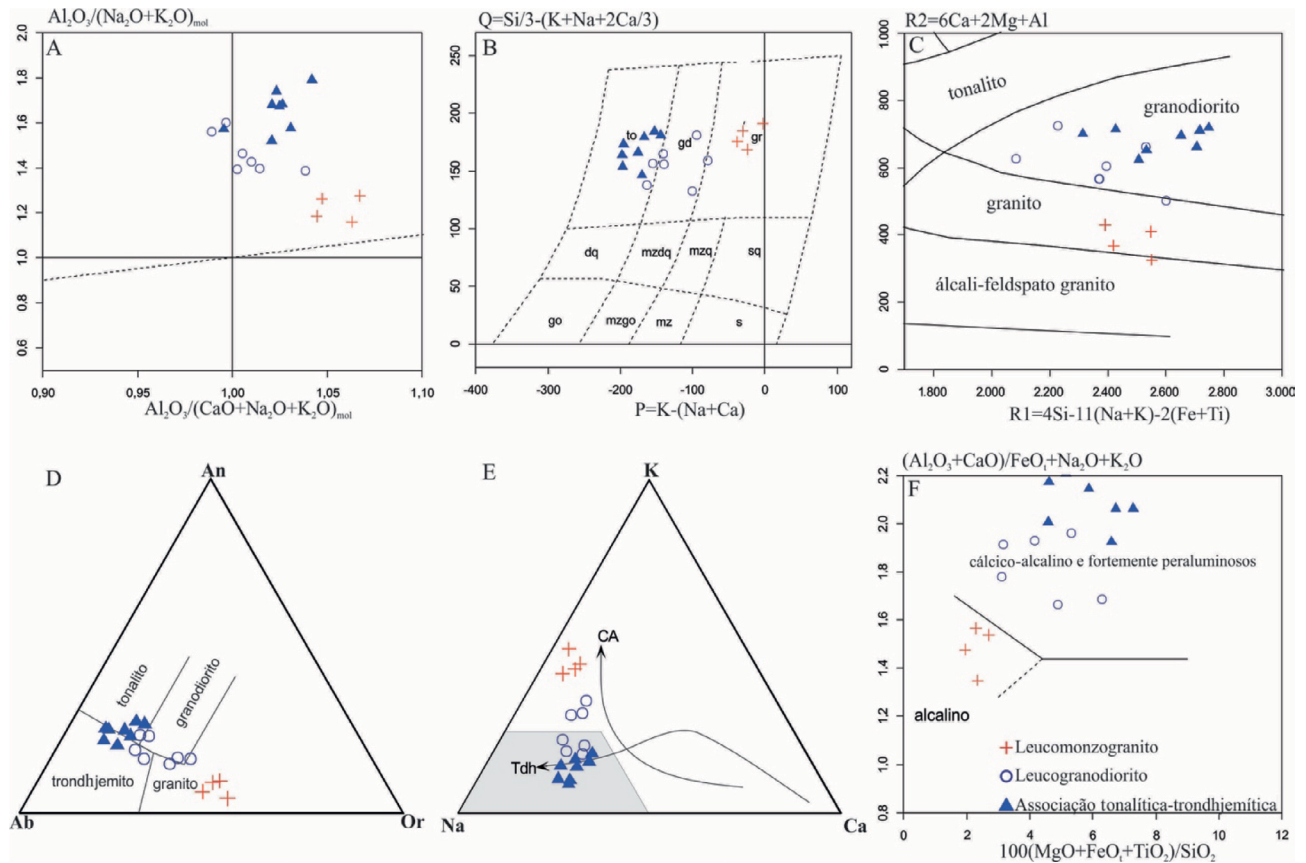
valores de  $La/Yb$  que variam entre 37 e 79 e valores de  $Sr/Y$  entre 38 e 186 (Figura 14A);

- tonalitos-trondhjemitos com altas razões  $La/Yb$  e  $Sr/Y$ . Esse grupo é representado pelas amostras KVRAS-11 e MP-19, as quais exibem razões  $La/Yb$  de 125 e 112 e razões  $Sr/Y$  de 198 e 287, respectivamente (Figura 14B).

Os diagramas  $(La/Yb)_N$  versus  $Yb_N$  e  $La/Yb$  versus  $Sr/Y$  (Martin, 1986) distinguem claramente os domínios desses grupos (Figura 15).

### Leucogranodioritos

As rochas desse grupo possuem teores de  $SiO_2$  que variam entre 67,4 e 73,1%. Os elementos  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  e  $MgO$  são correlacionados negativamente com a  $SiO_2$ , e o contrário é



to: tonalito; gd: granodiorito; gr: granito; dq: quartzo-diorito; mzdq: quartzo-monozodiorito; mzq: quartzo-monozonito; sq: quartzo-diorito; go: gabro; mazgo: monzogabro; mz: monzonito; s: sienito; CA: calcioalcalinas; Tdh: trondhjemiticas.

**Figura 12.** Diagramas geoquímicos discriminantes para granitoides arqueanos, mostrando a distribuição de amostras representativas dos granitoides da porção sul do Domínio Rio Maria. (A) Diagrama  $[Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)]mol$  versus  $[Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)]mol$  (Shand, 1950); (B) Diagrama P-Q de Debon e Le Fort (1983); (C) Diagrama R1-R2 (R1-R2 são parâmetros catiônicos de De La Roche et al., 1980); (D) diagrama utilizando feldspatos normativos de O'Connor (1965); (E) Diagrama K-Na-Ca (*trends* para séries calcioalcalinas (CA) e trondhjemiticas (Tdh) definidas por Barker e Arth, 1976); (F) Diagrama de Sylvester (1994).

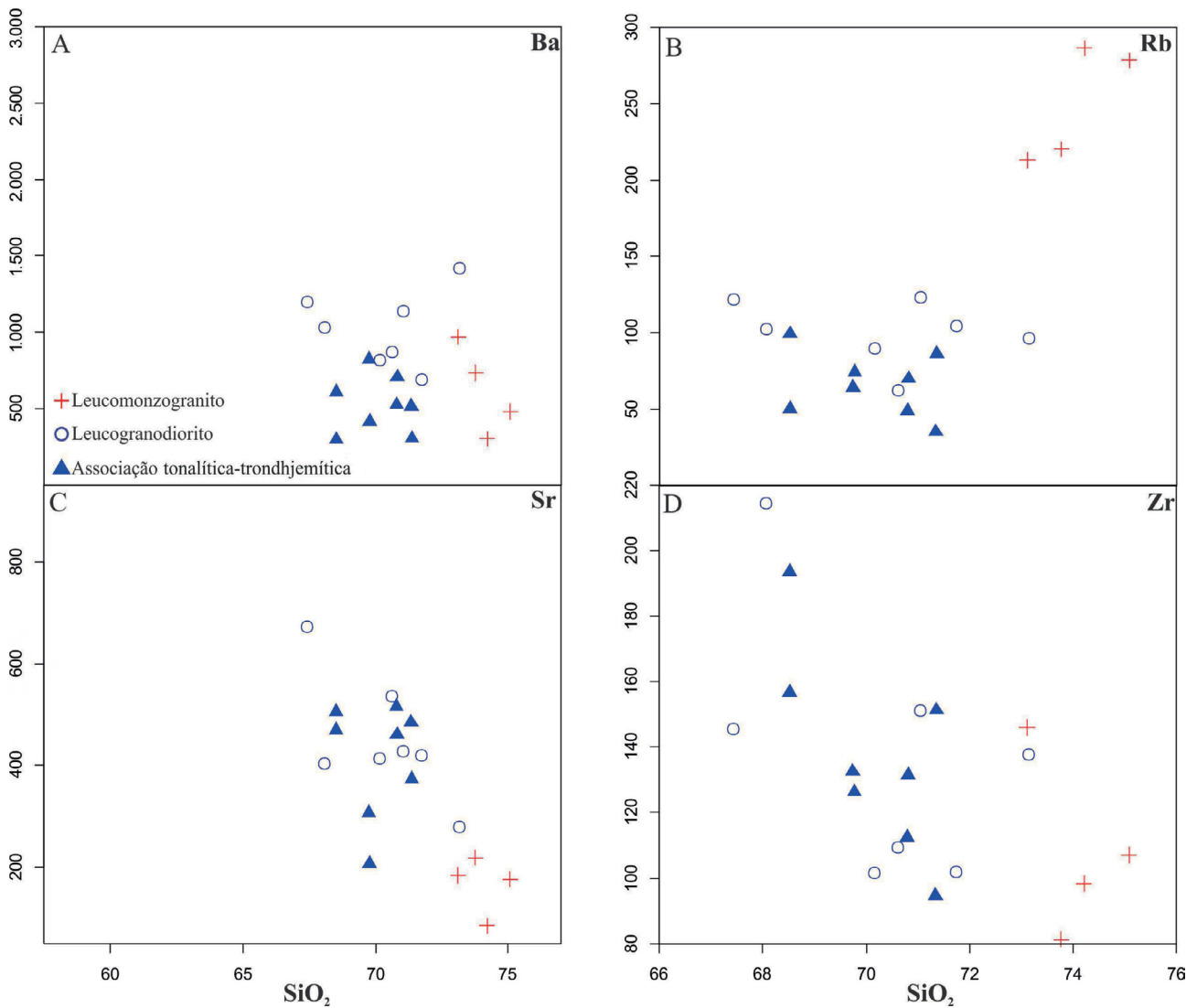


observado para o  $K_2O$ . No caso do  $Na_2O$ , há dispersão dos seus conteúdos com o crescimento de  $SiO_2$  (Figura 11; Tabela 1).

Os teores de  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$  e  $Al_2O_3$  são mais baixos e as razões  $FeO_t/(FeO_t + MgO)$  são ligeiramente maiores quando comparadas com aquelas das associações tonalíticas-trondhjemíticas. A diferença mais marcante entre essas rochas, em termos de elementos maiores, relaciona-se aos teores de  $CaO$  e  $K_2O$ . Os leucogranodioritos apresentam teores de  $CaO$  mais baixos, concentrados entre 1,9 e 3,3% (média de 2,6%), ao passo que seus conteúdos de  $K_2O$  são mais elevados (2,2 – 3,9%), e isso reflete nas razões mais altas de  $K_2O/Na_2O$  (geralmente  $> 0,5$ ).

No diagrama de Sylvester (1989), os leucogranodioritos incidem no campo dos granitos calcioalcalinos (Figura 11F).

Em função do seu caráter mais leucocrático ( $Fe_2O_3 + MgO + MnO + TiO_2 < 5,3$ , com média de 3,7%) e dos conteúdos mais elevados de  $K_2O$  associados aos conteúdos relativamente mais baixos de  $CaO$ , eles plotam abaixo e à esquerda das amostras das associações tonalíticas-trondhjemíticas. Os leucogranodioritos apresentam razão  $A/CNK$  próxima a 1, sendo ligeiramente peraluminosos (Figura 11A), e conforme a proposta de De La Roche (1980) e Debon e Le Fort (1983) são classificados como granodioritos nos diagramas R1-R2 (Figura 11C) e P-Q (Figura 11B), respectivamente. No diagrama Ab-Na-Or de O'Connor (1965), as amostras caem nas fronteiras do campo dos granodioritos com os demais granitoides (Figura 11D) e seguem o *trend* calcioalcalino (Figura 11E) proposto por Barker e Arth (1976).



**Figura 13.** Diagramas de Harker para elementos-traço, mostrando a distribuição de amostras representativas dos granitoides arqueanos da porção sul do Domínio Rio Maria.

Os leucogranodioritos são enriquecidos em Ba (693–1.421 ppm com valor médio de 1.081 ppm) e Rb (média = 107 ppm) e mostram conteúdos similares de Sr (média de 440 ppm) e de elementos de alto campo de força (Zr, Y, Yb e Nb; Figura 13; Tabela 1) em comparação aos tonalitos-trondhjemitos.

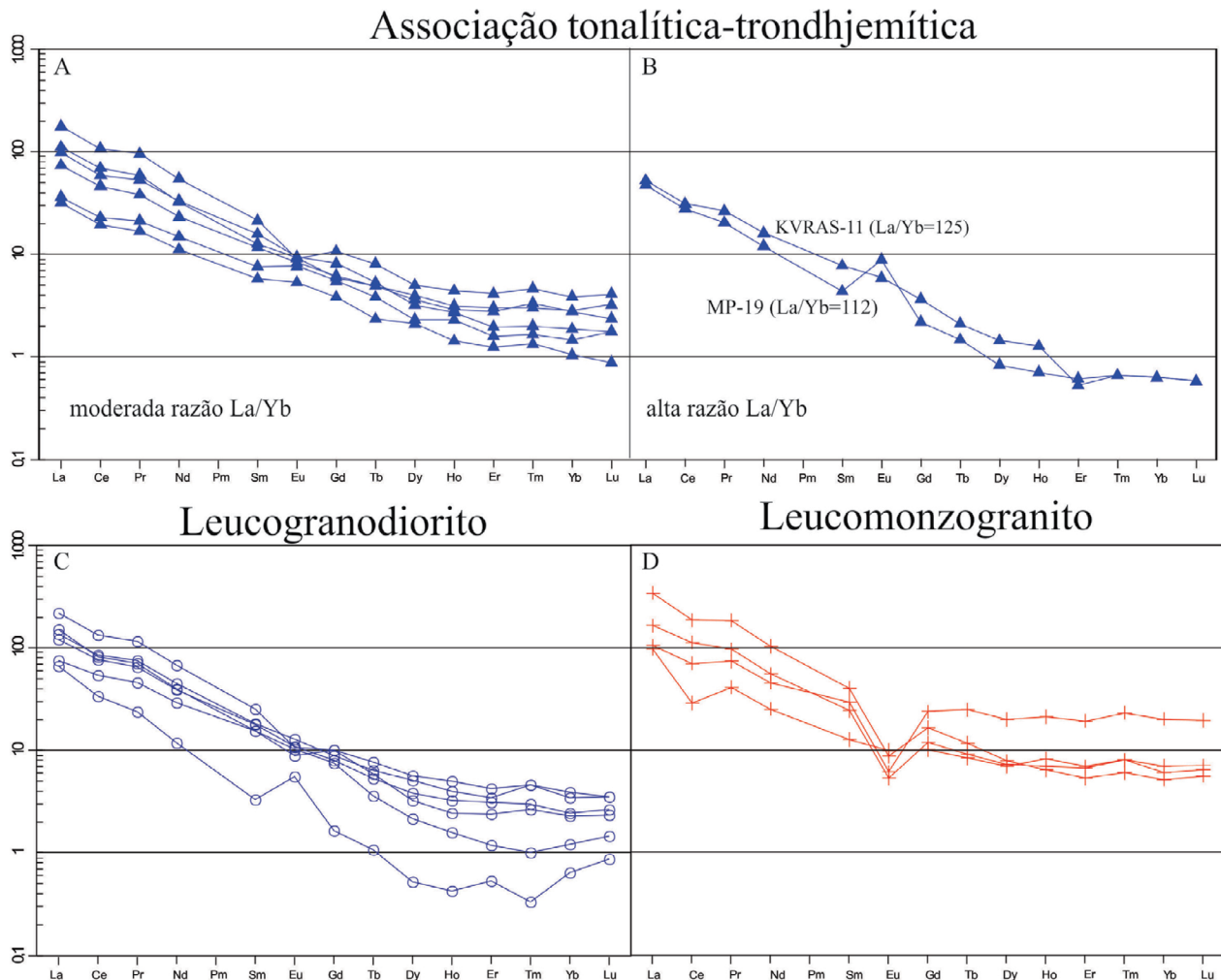
O padrão dominante de ETR dos leucogranodioritos mostra enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP, sem anomalia de Eu significativa (0,6 – 0,9%). Salvo a amostra KVRAS-05, que mostra forte anomalia positiva, no valor de 2,24 e padrão fortemente fracionado dos demais terras raras (Figura 14C). O comportamento côncavo entre Dy e Er é observado na maioria das amostras.

#### Leucomonzogranitos

Os leucomonzogranitos apresentam os maiores teores de  $\text{SiO}_2$  (73,11 – 75,08%) e  $\text{K}_2\text{O}$  (4,73 – 5,32%) e os mais baixos

conteúdos de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO e  $\text{Na}_2\text{O}$ , comparados aos outros granitoides estudados (Figura 11; Tabela 1). Uma característica marcante dessas rochas é a alta concentração de  $\text{K}_2\text{O}$  (> 4,7%), associada com baixo conteúdo de MgO (normalmente < 0,3 e #Mg geralmente < 0,3), moderado a alto  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (> 13%) e moderados teores de CaO (média de 0,96%) e  $\text{Na}_2\text{O}$  (média = 3,51%). As razões  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  variam entre 1,24 e 1,62 e as  $\text{FeOt}/\text{FeOt} + \text{MgO}$  são maiores que 0,8 e tendem a aumentar proporcionalmente com a  $\text{SiO}_2$  (Figura 11I).

Esses granitos são ligeiramente peraluminosos (Shand, 1950) e incidem no campo das séries calcioalcalinas alto-K (Figura 11G; campos de Peccerillo e Taylor, 1976). No diagrama triangular K-Na-Ca (Barker e Arth, 1976; Martin, 1994), as amostras seguem o *trend* calcio-alcalino, mostrando enriquecimento em potássio (Figura 12E). Elas plotam no campo dos granitos no diagrama Ab-An-Or (Figura 11D), assim como nos diagramas P-Q (Debon e Le Fort, 1983) e R1-R2 (De la Roche et al., 1980).



**Figura 14.** Padrões dos elementos terras raras normalizados por meio do condrito de Evensen et al. (1978) para (A, B) as associações tonalíticas-trondhjemíticas, (C) os leucogranodioritos e (D) os leucomonzogranitos da porção sul do Domínio Rio Maria.

No diagrama de Sylvester (1989), os leucomonzogranitos são classificados como alcalinos (Figura 12F). Todavia, essas rochas são empobrecidas em elementos de alto campo de força (Zr, Y, Nb e Yb) quando comparadas com os típicos granitos alcalinos (por exemplo, granitos com alto-HFSE do Cráton Yilgarn — Champion e Sheraton, 1997 — e granitos do tipo-A — Dall’Agnol et al., 2005).

O conteúdo de Ba dessas rochas é similar àqueles dos tonalitos-trondhjemitos e menor em relação aos leucogranodioritos, variando entre 304 e 970 ppm. Já os teores de Sr são mais baixos (< 218 ppm). Os valores de Rb são superiores a 213 ppm, sendo maiores que os demais granitoides estudados (Figura 13). Os ETR (Figura 14D) mostram um padrão de enriquecimento de ETRL e moderado fracionamento dos ETRP (razões  $La_N/Yb_N$  entre 5 e 71), com moderada a pronunciada anomalia negativa de Eu ( $0,23 < Eu/Eu^* < 0,87$ ).

## DISCUSSÃO

### Comparações das rochas estudadas com as séries granitoides do Domínio Rio Maria

*Comparações dos granitoides tonalíticos-trondhjemiticos com as Suítes TTGs do Domínio Rio Maria*

Suítes TTGs representam as unidades mais volumosas do Domínio Rio Maria (Almeida et al., 2011), sendo homogêneas

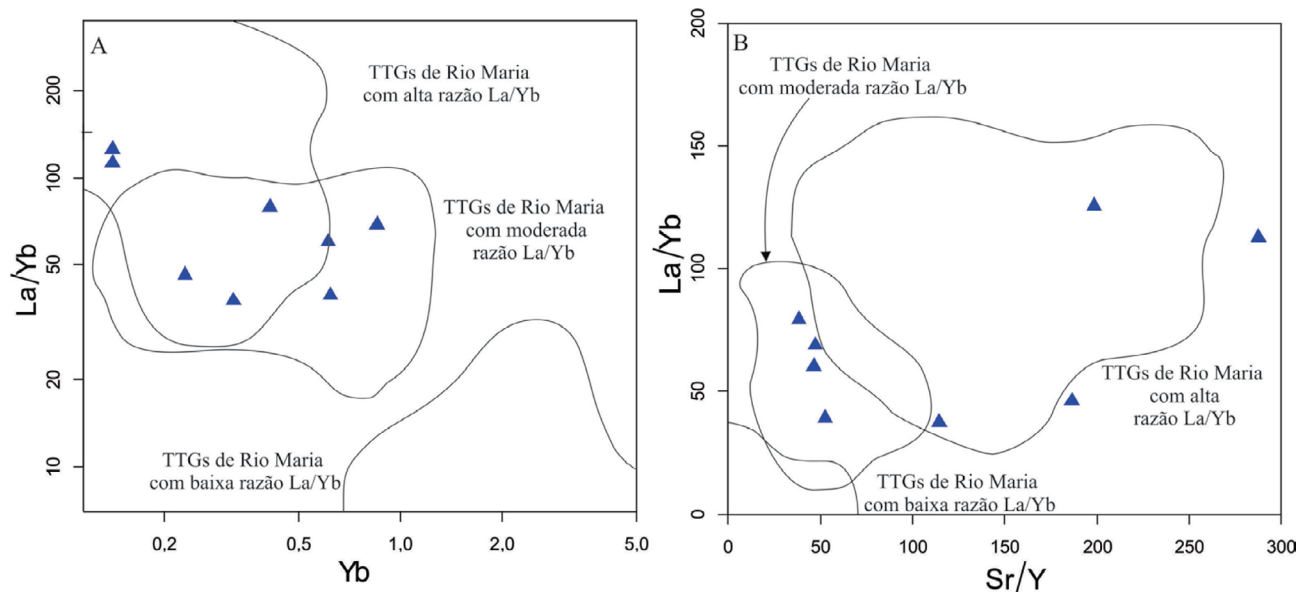
ao longo de todo o terreno e compostas essencialmente de tonalitos e trondhjemitos com raros granodioritos, mostrando típico bandamento composicional.

Almeida et al. (2011) reconheceram cinco suítes TTGs nesse terreno:

- Tonalito Arco Verde (~2,98 – 2,93 Ga);
- Trondhjemitos Mogno (~2,96 Ga);
- Complexo Tonalítico Caracol (~2,94 Ga);
- Tonalito Mariazinha (~2,92 Ga);
- Trondhjemitos Água Fria (~2,87 Ga).

Assim como as associações tonalíticas-trondhjemiticas estudadas neste trabalho, o Tonalito Arco Verde e o Trondhjemitos Mogno apresentam dimensões batolíticas, ao passo que o Complexo Tonalítico Caracol, o Tonalito Mariazinha e o Trondhjemitos Água Fria são expostos em áreas menores. O *trend* estrutural preferencial NW-SE dos granitoides da porção sul do Domínio Rio Maria também é observado no Complexo Tonalítico Caracol e nos trondhjemitos Mogno e Água Fria. Já os padrões estruturais dos tonalitos Arco Verde e Mariazinha são E-W e NE-SW, respectivamente.

As rochas estudadas foram comparadas com as diferentes séries de granitoides do Domínio Rio Maria nos diagramas K/Na versus #Mg e Eu/Eu\*,  $TiO_2$  versus Ba e no diagrama ternário  $CaO \times Rb/20 \times 5x(K_2O/Na_2O)$ , exibidos na Figura 16. Nesses diagramas, notam-se fortes similaridades geoquímicas entre as associações tonalíticas-trondhjemiticas estudadas com as Suítes TTGs de Rio Maria.



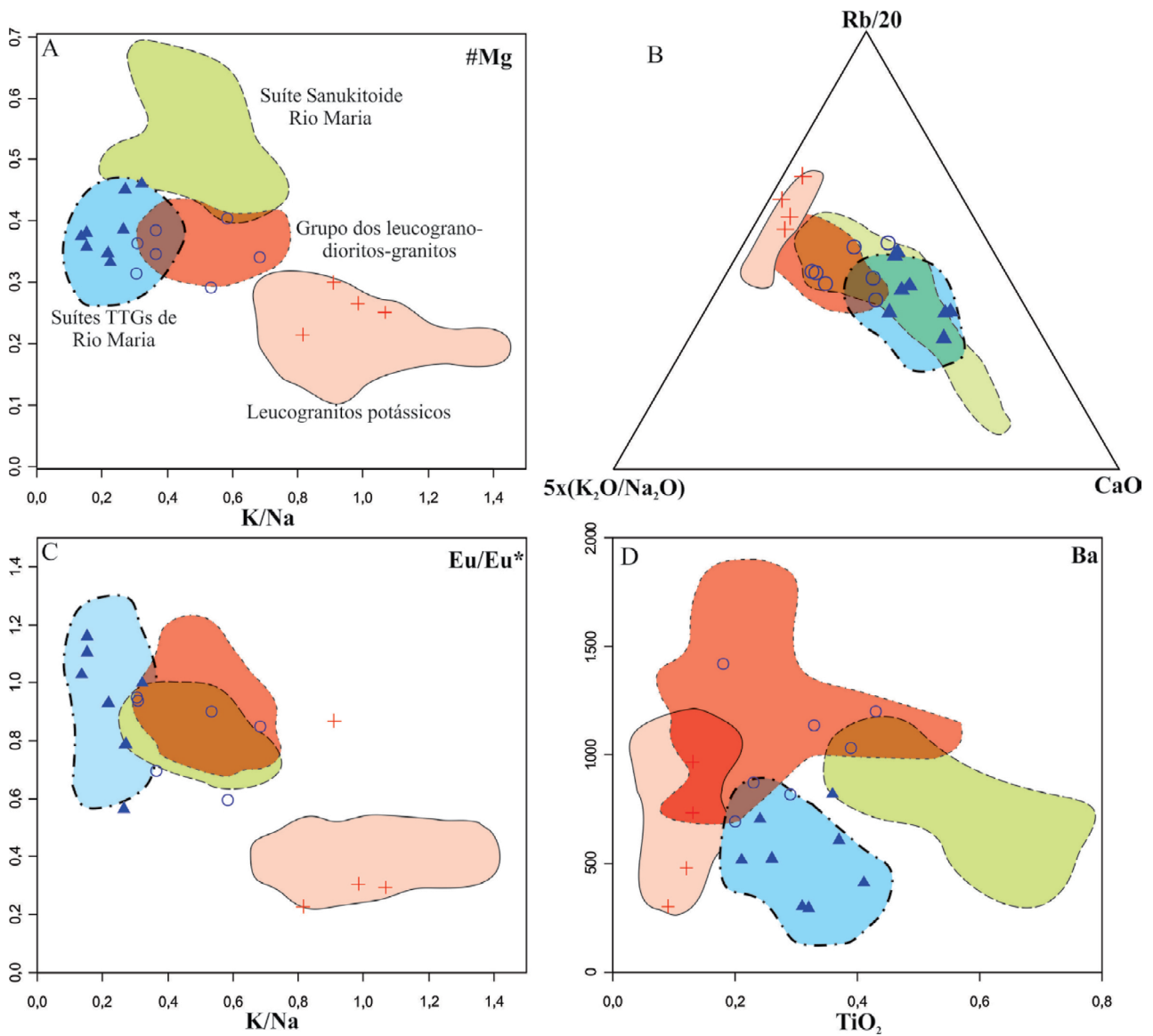
**Figura 15.** Diagramas (A) La/Yb versus Yb e (B) La/Yb versus Sr/Y utilizados para discriminar grupos de TTGs com alta e moderada razões La/Yb. Os campos das rochas com altas, moderadas e baixas razões pertencentes às Suítes TTGs de Rio Maria (Almeida et al., 2011) estão inseridos nos diagramas para comparação.

Baseado nas razões La/Yb e Sr/Y das Suítes TTGs do Domínio Rio Maria, Almeida et al. (2011) distinguiram os grupos de TTGs com altas, moderadas e baixas razões La/Yb e Sr/Y. Os padrões dos ETR dos granitoides tonalíticos-trondhjemiticos da porção sul do Domínio Rio Maria são análogos àqueles dos grupos com alta e moderada razão La/Yb. Almeida et al. (2011) sugerem que os TTGs do grupo com alta razão La/Yb foram originados a partir da fusão de uma fonte de composição máfica com granada e anfibólio residual, em condições de pressão relativamente elevada ( $\geq 1,5$  GPa), e aqueles TTGs com valor moderado da razão La/Yb derivaram de magmas gerados em condições intermediárias de pressão ( $\sim 1,0 - 1,5$  GPa) no campo de estabilidade da

granada. O padrão côncavo dos ETRP também é visto em algumas amostras das Suítes TTGs de Rio Maria, e é interpretado como indicador de fracionamento do anfibólio, uma vez que os ETR são compatíveis com ele em magmas félsicos e os coeficientes de partição dos ETR em anfibólio são mais altos entre Dy e Er (Rollinson, 1993), onde há a inflexão.

#### *Comparações dos leucogranitoides com as suítes de leucogranitos do Domínio Rio Maria*

Com base em dados petrográficos e geoquímicos, Almeida et al. (2013) distinguiram três suítes de leucogranitos arqueanos no Domínio Rio Maria:



**Figura 16.** Diagramas (A) K/Na versus #Mg, (B) CaO  $\times$  Rb/20  $\times$  5x(K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O), (C) K/Na versus Eu/Eu\* e (D) TiO<sub>2</sub> versus Ba usados para discriminar as séries granitoides arqueanas do Domínio Rio Maria (Almeida et al., 2011; 2013; 2017).

- leucogranitos potássicos (granitos Xinguara e Mata Surrão), compostos predominantemente de biotita-monzogranitos com alto conteúdo de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e Rb, mostrando enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP e moderada a pronunciada anomalia de európio;
- leucogranodioritos e leucomonzogranitos enriquecidos em Ba e Sr com fracionamento de ETRP em relação aos ETRL e geralmente desprovidos de anomalia significativa de Eu;
- anfibólio-biotita monzogranitos com afinidade geoquímica associada às rochas sanukitoides.

Os leucomonzogranitos estudados neste trabalho mostram fortes similaridades petrográficas e geoquímica com os leucogranitos potássicos dos tipos Mata Surrão e Xinguara (Figura 16). Almeida et al. (2013) sugeriram que os leucogranitos potássicos do Domínio Rio Maria são semelhantes aos granitos baixo-CaO do Cráton Yilgarn e aos granitos calcioalcalinos CA2 (Sylvester, 1994), e admitem que seus magmas foram produzidos a partir da fusão parcial de TTGs. Já os leucogranodioritos são análogos aos leucomonzogranitos-granodioritos ricos em Ba e Sr (Figura 16), os quais mostram notáveis similaridades geoquímicas com os granitos alto-CaO (TTGs transicionais) do Cráton Yilgarn e com os granitos calcioalcalinos CA1 (Almeida et al., 2017). Almeida et al. (2010) propuseram que essas rochas poderiam ser derivadas da mistura de magmas graníticos ricos em Ba e Sr com líquidos trondhjemíticos. Já Almeida et al. (2013) assumem que a interação entre a crosta TTG e fluidos mantélicos enriquecidos em K, Ba e Sr seria uma hipótese viável para explicar a gênese dos leucomonzogranitos-granodioritos ricos em Ba e Sr. Leucogranitos afins de rochas sanukitoides não foram identificados na porção sul do Domínio Rio Maria.

## CONCLUSÕES

Os limites das unidades litológicas, que constavam em mapas geológicos anteriores da porção sul do Domínio Rio Maria, foram redefinidos com base na utilização de dados aerogeofísicos de maior resolução integrados com outros sensores e dados de campo. Além disso, a integração dos dados multifontes permitiu determinar a assinatura aerogeofísica das unidades geológicas, identificar populações de enxames de diques com direções NE-SW, NW-SE e N-S, reconhecer os padrões estruturais NE-SW, NW-SE e N-S e E-W, presentes na área, e mapear pequenas ocorrências de composição máfica, BIFs e plútons circunscritos.

Os dados geológicos, petrográficos, geoquímicos e geocronológicos das associações tonalíticas-trondhjemíticas descritas neste trabalho sugerem que essas rochas são pertencentes ao primeiro evento magmático que constituiu o Tonalito Arco Verde ( $2,96 \pm 0,02$  Ga). Por outro lado, ao

contrário do padrão estrutural E-W do Tonalito Arco Verde da área de Pau D'Arco (Figura 1), os *trends* estruturais NW-SE são marcantes nos granitoides da porção do Domínio Rio Maria. As razões La/Yb e Sr/Y permitem propor que as rochas tonalíticas-trondhjemíticas estudadas foram originadas a partir da fusão de uma fonte de composição máfica, em condições de pressão acima de 1,0 GPa, apresentando granada residual e, em algumas amostras, anfibólio, diagnosticado por meio do padrão côncavo dos ETRP delas.

O magmatismo granítico *stricto sensu* arqueano ( $\sim 2,87$  Ga), registrado na porção sul do Domínio Rio Maria, sucedeu a geração dos granitoides tonalíticos-trondhjemíticos, sendo representado pelos leucomonzogranitos e leucogranodioritos. Os primeiros exibem fortes analogias petrográficas e geoquímica com os leucogranitos potássicos do Domínio Rio Maria e com os granitos baixo-CaO do Cráton Yilgarn, e granitos calcioalcalinos do tipo CA2 e seus magmas provavelmente foram produzidos a partir da fusão parcial de TTGs. Os leucogranodioritos registram as mesmas características petrográficas, geoquímicas e geocronológicas em relação aos leucomonzogranitos-granodioritos ricos em Ba e Sr do Domínio Rio Maria, e mostram também afinidades geoquímicas com os granitos alto-CaO ou TTGs transicionais do Cráton Yilgarn e com os granitos calcioalcalinos CA1. Duas hipóteses têm sido admitidas para a gênese dessas rochas no Domínio Rio Maria:

- mistura entre magmas graníticos com afinidade sanukitoide enriquecidos em Ba e Sr com líquidos trondhjemíticos;
- interação entre crosta TTG com fluidos mantélicos enriquecidos em K, Ba e Sr.

Rochas sanukitoides são volumetricamente importantes nas áreas de Xinguara, Rio Maria, Bannach e Mata Geral do Domínio Rio Maria, constituindo extensos batólitos e plútons. O magmatismo sanukitoide teve papel fundamental na gênese dos leucograníticos do Domínio Rio Maria, sendo o evento responsável pelo aquecimento da crosta, ocasionando a fusão parcial de rochas TTGs e a origem desses magmas graníticos. Desse modo, a ausência de rochas sanukitoides na porção sul do Domínio Rio Maria sugere diferenças na evolução tectônica e na petrogênese dos leucogranitoides dessa região em relação às demais áreas do Domínio Rio Maria.

A integração dos dados multifontes permite assumir que a granitogênese arqueana do Domínio Rio Maria se estende por pelo menos 80 km a sul da cidade de Redenção, e as séries granitoides aflorantes nessa porção são análogas àquelas presentes na região de Pau D'Arco, Rio Maria, Bannach e Xinguara.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao geólogo Raimundo Pacheco Junior e à geóloga Silmara Nascimento o suporte na fase de mapeamento

geológico. À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, especificamente ao professor doutor Roberto Ventura Santos e Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, a cessão dos dados aerogeofísicos do Projeto Conceição do Araguaia. Agradecimentos especiais a doutora Lúcia Travassos da Rosa Costa, Cintia Maria Gaia da Silva, Bruce Chiba e Jorge Amaral, por ofertar o treinamento de tratamento de dados aerogeofísicos. À Terrativa Minerais, o fornecimento das amostras estudadas na primeira fase da pesquisa. Este trabalho é uma contribuição ao Projeto Vale/FAPESPA (Edital 01/2010, ICAAF: 053/2011) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geociências da Amazônia (INCT – CNPq/MCT/FAPESPA – Proc. 573733/2008-2).

## REFERÊNCIAS

- Almeida, J. A. C., Dall'Agnol, R., Dias, S. B., Althoff, F. J. (2010). Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: Evidence from the Rio Maria domain. *Lithos*, 120(3-4), 235-257. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.026>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.10.008>
- 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(1-2), 201-221. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.03.004>
- Almeida, J. A. C., Dall'Agnol, R., Rocha, M. C. (2017). Tonalite-trondhjemite and leucogranodiorite-granite suites from the Rio Maria domain, Carajás province, Brazil: Implications for discrimination and origin of the archean Na-granitoids. *The Canadian Mineralogist*, 55(3), 437-456. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600068>
- Althoff, F. J., Barbey, P., Boullier, A. M. (2000). 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research*, 104(3-4), 187-206. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00103-0)
- Barbosa, J. P. O. (2004). *Geologia Estrutural, Geoquímica, Petrografia e Geocronologia de granitóides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás*. Dissertação (Mestrado). Belém: Universidade Federal do Pará, 96 p. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/393>>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Barker, F. (1979). Trondhjemites: definition, environment and hypotheses of origin. In: F. Barker (Ed.), *Trondhjemites, dacites and related rocks*. Amsterdã: Elsevier, p. 1-12.
- Barker, F., Arth, J. G. (1976). Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemite-basalt suites. *Geology*, 4(10), 596-600. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4<596:GOTLAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4<596:GOTLAA>2.0.CO;2)
- Barros, C. E. M., Macambira, M. J. B., Barbey, P., Scheller, T. (2004). Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4), 531-538.
- Blum, M. L. B. (1999). *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 229 p. Disponível em: <<http://mw.eco.br/ig/posg/dout/tese030/index.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2020.
- Champion, D. C., Sheraton, J. W. (1997). Geochemistry and Nd isotope systematics of Archean granites of the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. *Precambrian Research*, 83(1-3), 109-132. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00007-7)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.01.007>
- Dall'Agnol, R., Cunha, I. R. V., Guimarães, F. V., Oliveira, D. C., Teixeira, M. F. B., Feio, G. R. L., Lamarão, C. N. (2017). Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, 277, 3-32. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.032>
- 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. *XIII Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG, 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: R. Dall'Agnol, L. T. Rosa-Costa, E. L. Klein (Eds.), *Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton*. Abstracts, Volume and Field Trips Guide. Belém: PRONEX-UFPA/SBG, p. 97-150.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N. P., Rämö, O. T., Moura, C. A. V., Macambira, M. J. B., Oliveira, D. C. (2005). Petrogenesis of the Paleoproterozoic Rapakivi A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, 80(1-4), 101-129. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.058>
- De La Roche, A., Leterrier, J., Grandclaude, P., Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses - its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1-4), 183-210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
- Debon, F., Le Fort, P. (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 73(3), 135-149. <https://doi.org/10.1017/S0263593300010117>
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., O'niions, R. K. (1978). Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8), 1199-1212. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90114-X)
- Feio, G. R. L., Dall'Agnol, R. (2012). Geochemistry and petrogenesis of the Mesoarchean granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás Province, Brazil: Implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, 154, 33-52. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.022>
- Feio, G. R. L., Dall'Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Santos, J. O. S., Althoff, F. J. (2013). Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implication for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, 227, 157-185. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.007>
- 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. Belém. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais*, 9(3), 533-564.
- Gibbs, A. K., Wirth, K. R., Hirata, W. K., Olszewski Jr., W. J. (1986). Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2), 201-211.
- Huhn, S. R. B., Santos, A. B. S., Amaral, A. F., Ledsham, E. J., Gouveia, J. L., Martins, L. B. P., Montalvão, R. M. G., Costa, V. G. (1988). O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria - Sul do Pará. *XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 3, p. 1438-1453. Belém: SBG.
- Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*. 2ª ed. Londres: Cambridge University Press, 193 p.
- Leite, A. A. S. (2001). *Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos Granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico*. Tese (Doutorado). Belém: Instituto de Geociências, UFPA, 330 p. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/8160>>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- 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(4), 447-458.
- Macambira, M. J. B., Lafon, J. M. (1995). Geocronologia da Província Mineral de Carajás; Síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7, 263-287.
- Machado, N., Lindenmayer, Z. G., Krogh, T. E., Lindenmayer, D. (1991). U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49(3-4), 329-354. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90040-H](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90040-H)
- Martin, H. (1986). Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14(9), 753-756. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2)
- Martin, H. (1994). The Archean grey gneisses and the gneisses of continental crust. In: K. C. Condie (Ed.), *Developments in Precambrian Geology*, v. 11. Amsterdã: Elsevier, p. 205-259. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(08\)70224-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70224-X)
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0352-9>

- Neves, A. P., Vale, A. G. (1999). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Folha SC.22- X-A Redenção. Estado do Pará e Tocantins. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM.
- O'Connor, J. T. (1965). A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar rations. *US Geological Survey Professional Papers*, 525-B, B79-B84.
- Oliveira, D. C., Santos, P. J. L., Gabriel, E. O., Rodrigues, D. S., Faresin, A. C., Silva, M. L. T., Sousa, S. D., Santos, R. V., Silva, A. C., Souza, M. C., Santos, R. D., Macambira, M. J. B. (2010). Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás - Província Mineral de Carajás. *XLV Congresso Brasileiro de Geologia*. Belém: SBG, CD-ROM.
- Oliveira, M. A., Dall'Agnol, R., Althoff, F. J., Leite, A. A. S. (2009). Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal South American Earth Science*, 27(2-3), 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.07.003>
- Oliveira, V. E. S. (2014). *Geologia, Petrologia Magnética e Geoquímica dos LeucoGranitoides da porção Sudoeste de Redenção-PA*. Trabalho de Conclusão de Curso. Marabá: Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.
- Pacheco Jr., R. (2015). *Geologia, Geologia, Petrografia e Dados de Comportamento Magnético de Um Extenso Dique Aflorante na Região Sudoeste de Redenção – PA, Porção Sul do Domínio Rio Maria*. Trabalho de Conclusão de Curso. Marabá: Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.
- Peccerillo, A., Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Pimentel, M. M., Machado, N. (1994). Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. *XXXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 1, 390-391. Camboriú: SBG.
- Rio Doce Geologia e Mineração (DOCEGEO). (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Companhia Vale do Rio Doce, Sociedade Brasileira de Geologia. Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*. Belém: CVRD/SBG, p. 11-59. Disponível em: <[http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/1988-BELEM/1988Prov%C3%ADncia%20Mineral%20de%20Caraj%C3%A1s.pdf](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/1988-BELEM/1988Prov%C3%ADncia%20Mineral%20de%20Caraj%C3%A1s.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Rocha, K. P. P. (2014). *Geologia, Petrologia Magnética e Geoquímica dos Tonalitos e Trondhjemitos da porção Sudoeste de Redenção-PA*. Trabalho de Conclusão de Curso. Marabá: Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.
- 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 e Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Terra*, 9, 597-633.
- Rolando, A. P., Macambira, M. J. B. (2002). Geocronologia dos Granitoides arqueanos da região da Serra do Inajá, novas evidências sobre a formação da crosta continental no sudeste do Cráton Amazônico, SSE, Pará. *XLI Congresso Brasileiro de Geologia*. João Pessoa: SBG, p. 525.
- Rolando, A. P., Macambira, M. J. B. (2003). Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. *4<sup>th</sup> South American Symposium on Isotope Geology*. Salvador, CD-ROM.
- Rollinson, H. (1993). *Using Geochemical Data*. Londres: Longman, 352 p.
- Santos, J. O. S. (2003). Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves (Eds.), *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 169-226.
- Santos, J. O. S., Hartmann, L. A., Gaudette, H. E., Groves, D. I., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R. (2000). A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4), 453-488. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70755-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70755-3)
- Santos, P. A., Teixeira, M. F. B., Dall'Agnol, R., Guimarães, F. V. (2013). Geologia, petrografia e geoquímica da associação Tonalito-Trondhjemitos-Granodiorito (TTG) do extremo leste do subdomínio de transição, Província Carajás e Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Terra*, 8(3), 257-290.
- Santos, P. J. L., Oliveira, D. C. (2014). Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Terra*, 9, 635-659.



- 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 Province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 20(4), 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.11.001>
- Shand, S. J. (1950). *Eruptive rocks: their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits, with a chapter on meteorites*. 4<sup>th</sup> ed. Londres: J. Wiley, 488 p.
- Silva, A. C., Dall'Agnol, R., Guimarães, F. V., Oliveira, D. C. (2014). Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemíticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Séries Ciências Naturais*, 9(1), 13-45.
- Souza, S. Z., Dall'Agnol, R., Althoff, F. J., Leite, A. A. S., Barros, C. E. M. (1996). Carajás mineral province: geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archean evolution of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane and the Carajás block. In: *Simposium Arch. Terr. South America Platform*. Brasília: SBG, p. 31-32.
- Souza, Z. S., Potrel, H., Lafon, J. M., Althoff, F. J., Pimentel, M. M., Dall'Agnol, R., Oliveira, C. G. (2001). Nd, Pb and Sr isotopes of the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): Implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, 109(3-4), 293-315. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00164-4)
- Sylvester, P. J. (1989). Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology*, 97(3), 261-280. Disponível em: <[www.jstor.org/stable/30068745](http://www.jstor.org/stable/30068745)>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- Sylvester, P. J. (1994). Archean granite plutons. In: K. C. Condie (ed.), *Developments in Precambrian Geology*, v. 11. Amsterdã: Elsevier, p. 261-314. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(08\)70225-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70225-1)
- Tassinari, C. C. G., Macambira, M. (2004). A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida*. São Paulo: Beca, p. 471-486.
- 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*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.