



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

---

**TESE DE DOUTORADO Nº 182**

**PETROGÊNESE DOS GRANITOS MANDA SAIA E  
MARAJOARA: CONTRIBUIÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DA  
NATUREZA DO MAGMATISMO PALEOPROTEROZOICO  
DA PROVÍNCIA CARAJÁS**

**Tese apresentada por:**

**RODRIGO FABIANO SILVA SANTOS**

**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)**

---

S237p Santos, Rodrigo Fabiano Silva.  
Petrogênese dos granitos Manda Saia e Marajoara: contribuições para a definição da natureza do magmatismo paleoproterozoico da Província Carajás / Rodrigo Fabiano Silva Santos. — 2024.  
xix, 128f. : il. color.

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

1. Granito tipo-A. 2. Enclaves. 3. Paleoproterozoico. 4. Província Carajás. 5. Cráton Amazônico. I. Título.

---

CDD 551.098115



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

**PETROGÊNESE DOS GRANITOS MANDA SAIA E  
MARAJOARA: CONTRIBUIÇÕES PARA A DEFINIÇÃO DA  
NATUREZA DO MAGMATISMO PALEOPROTEROZOICO  
DA PROVÍNCIA CARAJÁS**

**TESE APRESENTADA POR**

**RODRIGO FABIANO SILVA SANTOS**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, linha de pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E  
METALOGÊNESE.**

**Data de Aprovação: 13 / 12 / 2024**

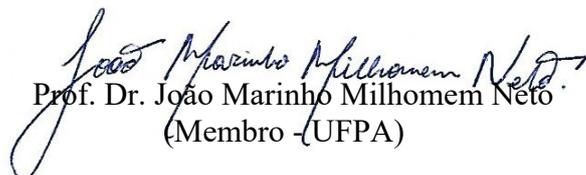
Banca Examinadora:

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

  
Prof.ª Dr.ª Gilmara Regina Lima Feio  
(Membro – UNIFESSPA)

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

  
Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi  
(Membro – USP)

  
Prof. Dr. João Marinho Milhomem Neto  
(Membro – UFPA)

*Dedico este trabalho aos meus pais, Eliana e Otávio, à minha amada esposa, Vanessa, e aos professores e amigos que sempre me apoiaram até esse momento.*

## AGRADECIMENTOS

O autor desta tese expressa seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e em particular:

- Ao Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências da UFPA pelo fornecimento de infraestrutura;
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;
- Ao Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do Instituto de Geociências da UFPA, com destaque para o apoio do Prof. Marco Galarza;
- Ao Laboratório de Microanálises (LM) do Instituto de Geociências da UFPA, em especial à amiga de turma Gisele Marques (técnica administrativa do laboratório) e ao 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;
- Ao orientador Prof. Davis Carvalho de Oliveira, pela oportunidade de realizar minha tese de doutorado, pelos incentivos, principalmente em agosto de 2023 quando fiz o concurso para Santarém, ensinamentos e reflexões tanto dentro quanto fora da geologia nesses mais de 10 anos desde o mestrado; o meu muito obrigado.
- Aos membros do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências da UFPA, pelo suporte técnico-científico e inúmeras discussões; principalmente ao Prof. José de Arimatéia Costa de Almeida na construção do modelo geológico do artigo do Granito Marajoara;
- A secretaria do Programa de Pós-Graduação, Cleida e Joanicy, e Lúcia Imbiriba, da biblioteca do IG, pelo auxílio nas questões administrativas e por toda a atenção.
- A todos os autores dos artigos desta tese;
- A todos os amigos da Sala 3, sem exceções.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas.  
Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura  
para achar as que estão certas”. *Carl Sagan*

## RESUMO

Os granitos Marajoara (GMJ) e Manda Saia (GMS) estão localizados no sudeste do Estado do Pará e representam intrusões circulares com dimensões de *stock* encaixadas em rochas mesoarqueanas do Domínio Rio Maria, na porção centro-sul da Província Carajás. São formados por rochas que afloram sob a forma de extensos lajedos, sobre os quais não foram observados vestígios de deformação no estado sólido (aspecto isotrópico) e frequentemente apresentam enclaves angulosos de suas rochas encaixantes. O GMJ é formado pelas variedades biotita monzogranito equigranular (BMzE) e heterogranular (BMzH), e enclaves porfiríticos (EP) e microgranulares (EM) que são restritos à fácies BMzH. Os conteúdos médios de quartzo e das razões plagioclásio/microclínio variam significativamente, permitindo que estas rochas sejam classificadas como de composição sieno a monzograníticas, e até mesmo granodioríticas no caso dos enclaves microgranulares. São granitos peraluminosos similares aos granitos ferrosos com altas razões  $K_2O+Na_2O/CaO$  e  $FeOt/(FeOt+MgO)$ . São enriquecidos em Rb, Zr, Y, Nb, F e ETR pesados, com as fácies mais evoluídas apresentando baixos conteúdos de Sr e Ba. Nos padrões de ETR, as anomalias negativas de Eu são acentuadas e os ETR pesados mostram um aumento gradual com a diferenciação magmática. Estes granitos incidem no campo dos granitos intraplaca e mostram afinidades geoquímicas com os granitos tipo-A. Suas razões  $FeOt/(FeOt+MgO)$  são compatíveis com aqueles dos típicos granitos tipo-A oxidados (BMzH e EP) e reduzidos (BMzE), enquanto o GMS mostra um caráter moderadamente reduzido. Já os EM mostram afinidade com os granitos magnesianos e da série cálcio-alcalina. De acordo com os dados de química mineral de biotita, o GMS e a fácies BMzH do GMJ incidem no campo das rochas da série magnetita, enquanto as rochas da variedade BMzE são semelhantes às rochas da série ilmenita. As análises U–Pb em zircão (SHRIMP) fornecem idade de cristalização de  $1884 \pm 11$  Ma para o GMJ e  $1866 \pm 10$  Ma para o GMS (LA–SF–ICP–MS). Os dados isotópicos de Lu–Hf indicam  $\epsilon_{Hf(t)}$  entre -11 e -18 e  $Hf-T_{DM}^C$  de 3,2 a 3,6 Ga para o GMJ; e  $\epsilon_{Hf(t)}$  entre -13 e -19 e  $Hf-T_{DM}^C$  de 3,3 a 3,6 Ga para o GMS. As lacunas composicionais entre as diversas variedades que constituem o GMJ sugerem que seus magmas não são cogenéticos. Modelamento geoquímico sugere que o GMJ e o GMS foram gerados a partir de fusão parcial de rochas tonalíticas, com eventual contribuição metassedimentar, a uma taxa de fusão que varia de 16 a 18% e uma assembleia residual composta por plagioclásio, quartzo, biotita, magnetita e ilmenita. A mistura de magmas félsicos e máficos desempenhou um papel importante na colocação. Os enclaves representam magmatismo básico do manto litosférico enriquecido que foi injetado na câmara magmática durante o processo de subducção,

interagindo em graus variados com o magma formador do granito Marajoara. Essa hipótese pode ser reforçada pela ocorrência de um dique composto de diabásio-granito porfirítico de 1,88 Ga na região de Rio Maria. O modelo proposto sugere que o magma granítico inicialmente formou uma câmara magmática, seguida por injeções repetidas de magma máfico, resultando em convecção em pequena escala. Subsequentemente, grandes volumes de magma máfico quente entraram na câmara, levando a processos de mistura. Enclaves microgranulares e porfiríticos foram formados devido à mistura de magmas em áreas onde havia contrastes de temperatura entre magmas félsicos e máficos. Os resultados apresentados neste trabalho destacam a importância da crosta arqueana para a origem dos granitos paleoproterozoicos, cuja colocação em níveis crustais rasos ocorreu através de um sistema alimentador de diques como consequência de tectônica extensional.

**Palavras-chave:** Granito tipo-A; enclaves; paleoproterozoico; Província Carajás; Cráton Amazônico.

## ABSTRACT

The Marajoara (MJG) and Manda Saia (MSG) granites are located in southeastern Pará State, Brazil, and represent circular intrusions with stock dimensions embedded in Mesoarchean rocks of the Rio Maria Domain, in the central-southern portion of the Carajás Province. These rocks outcrop as extensive pavements, exhibiting no solid-state deformation features (isotropic aspect) and frequently containing angular enclaves of the surrounding host rocks. The MJG comprises equigranular biotite monzogranite (eBMzG) and heterogranular (hBMzG) varieties, as well as porphyritic (pME) and microgranular enclaves (ME) restricted to the hBMzG facies. Quartz content and plagioclase/microcline ratios vary significantly, allowing these rocks to be classified from syenogranitic to monzogranitic, and even granodioritic in the case of microgranular enclaves. They are peraluminous granites, similar to ferroan granites with high  $K_2O+Na_2O/CaO$  and  $FeOt/(FeOt+MgO)$  ratios, enriched in Rb, Zr, Y, Nb, F, and heavy REEs, with more evolved facies displaying low Sr and Ba contents. In REE patterns, negative Eu anomalies are prominent, and heavy REEs show a gradual increase with magmatic differentiation. These granites fall within the intraplate granite field and exhibit geochemical affinities with A-type granites. Their  $FeOt/(FeOt+MgO)$  ratios align with typical oxidized (hBMzG and pME) and reduced (eBMzG) A-type granites, while the MSG displays a moderately reduced character. The ME, however, show affinity with magnesian and calc-alkaline series granites. According to biotite mineral chemistry, MSG and the hBMzG facies of MJG fall within the magnetite series field, while eBMzG rocks are similar to ilmenite series rocks. SHRIMP zircon U–Pb analyses provide crystallization ages of  $1884 \pm 11$  Ma for MJG and  $1866 \pm 10$  Ma for MSG (LA–SF–ICP–MS). Lu–Hf isotopic data indicate  $\epsilon_{Hf(t)}$  between -11 and -18 and  $Hf-T_{DM}^C$  from 3.2 to 3.6 Ga for MJG; and  $\epsilon_{Hf(t)}$  between -13 and -19 and  $Hf-T_{DM}^C$  from 3.3 to 3.6 Ga for MSG. The compositional gaps among the various MJG varieties suggest that their magmas are not cogenetic. Geochemical modeling suggests that MJG and MSG were generated by partial melting of tonalitic rocks, with occasional metasedimentary contributions, at a melting rate ranging from 16 to 18%, with a residual assemblage of plagioclase, quartz, biotite, magnetite, and ilmenite. Felsic and mafic magma mixing played an important role in the emplacement. The enclaves represent enriched lithospheric mantle-derived magmatism injected into the magma chamber during the subduction process, interacting to varying degrees with the magma forming the Marajoara granite. This hypothesis may be reinforced by the occurrence of a 1.88 Ga diabase–porphyritic granite composite dyke in the Rio Maria region. The proposed model suggests that the granitic magma initially formed a

magma chamber, followed by repeated mafic magma injections, resulting in small-scale convection. Subsequently, large volumes of hot mafic magma entered the chamber, leading to mixing processes. Microgranular and porphyritic enclaves were formed due to magma mixing in areas where there were temperature contrasts between felsic and mafic magmas. The results presented in this study highlight the importance of the Archean crust in the origin of Paleoproterozoic granites, which were emplaced in shallow crustal levels through a dyke feeder system as a result of extensional tectonics.

**Keywords:** A-type granite; enclaves; paleoproterozoic; Carajás Province; Amazonian Craton.