



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

---

**TESE Nº 151**

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DA BACIA DO RIO  
ITACAIÚNAS, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS:  
ASSINATURA GEOQUÍMICA DOS BLOCOS CRUSTAIS E  
IMPLICAÇÕES PARA RECURSOS MINERAIS E MEIO  
AMBIENTE**

**Tese apresentada por:**

**GABRIEL NEGREIROS SALOMÃO**

**Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA)**

**Coorientador: Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol (UFPA/ITV)**

---

**BELÉM- PARÁ**

**2020**

**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)**

---

N385m Negreiros Salomão, Gabriel  
Mapeamento geoquímico da bacia do rio Itacaiúnas, Província Mineral de Carajás: Assinatura geoquímica dos blocos crustais e implicações para recursos minerais e meio ambiente / Gabriel Negreiros Salomão. — 2020.  
xxiii, 233 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Coorientador(a): Prof. Dr. Roberto Dall'agnol  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Background geoquímico. 2. Associações multielementares. 3. Estatística multivariada. 4. Compartimentos geoquímicos. 5. Cráton Amazônico. I. Título.

CDD 551.908115

---



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

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DA BACIA DO RIO  
ITACAIÚNAS, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS:  
ASSINATURA GEOQUÍMICA DOS BLOCOS CRUSTAIS E  
IMPLICAÇÕES PARA RECURSOS MINERAIS E MEIO  
AMBIENTE**


**TESE APRESENTADA POR:**


**GABRIEL NEGREIROS SALOMÃO**


**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, Linha de Pesquisa MINERALOGIA E  
GEOQUÍMICA.**


**Data de Aprovação: 26 / 10 / 2020**

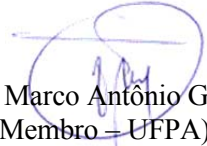
**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
(Orientador – UFPA)

  
Prof. Dr. Candido Augusto V. Moura  
(Membro – UFPA)

  
Dr. Eduardo Duarte Marques  
(Membro – CPRM)

  
Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa  
(Membro – UFPA)

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

“..Controlando a minha maluquez.  
Misturada Com minha lucidez...”  
(Raul Seixas, 1945-1989)

Vai com Deus, Manoel Carvalho.  
Escrevestes uma belíssima história de vida.  
Tive o imenso prazer em ter você em minha vida.  
Por isso, dedico meu trabalho a você, meu sogro.

## AGRADECIMENTOS

Somente Deus me proporcionou esta vitória!

Sou eternamente grato à minha companheira de vida Daniela Carvalho. Enfrentamos muitas barreiras no decorrer do desenvolvimento do meu projeto de doutorado. Juntos superamos todos os obstáculos com excelência.

Deus sabe o quanto sou grato pela família que tenho. Rafael Salomão, Claudete Negreiros e Barbara Heliadora Salomão, recebam o meu mais sincero obrigado por todo amor concedido a mim. Sinto que esta vitória é mais de vocês do que minha, afinal de contas, se não fosse pela educação que vocês me deram, não estaríamos aqui.

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela infraestrutura, pelo excelente quadro de funcionários e pela conceituada equipe docente.

À Cleida Freitas, Joanicy Lopes e aos demais técnicos da Secretaria do PPGG-IG-UFPA por atuarem com eficiência profissional sobre as demandas que lhes apresentava.

À Lúcia de Fátima Imbiriba de Sousa e aos demais técnicos da Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão do IG-UFPA pelos inúmeros serviços oferecidos referentes a pesquisa bibliográfica e orientação para normalização de trabalhos acadêmicos.

Aos grandes amigos e orientadores Rômulo Angélica e Roberto Dall’Agnol. Vocês foram cruciais para a minha formação acadêmica e profissional. Muito obrigado pela parceria que construímos. Trabalhar com vocês foi, e sempre será, uma honra.

Ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) que, por meio do projeto *Background* Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas, possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Aos grandes colegas que fiz durante os dois anos como bolsista DTI-CNPq no Grupo de Geologia Ambiental e Recursos Hídricos (GGARH) do ITVDS: Gabriel Martins, Marco Figueiredo, Adayana Melo, Renato Silva Júnior, Jair Ferreira Júnior, Paulo Pontes, Marcio Sousa, Gessica Silva, Alexandra Tavares, José Tasso Guimarães e Clóvis Maurity. O meu especial agradecimento ao grande amigo Prafulla Kumar Sahoo, pesquisador do ITVDS. “*Life teaches many lessons, however, it is you who will decide what to learn out of that!*”. Muito obrigado pelas excelentes discussões científicas.

Um especial agradecimento aos coautores dos artigos científicos vinculados a esta tese: Carlos Medeiros Filho, Marlene Costa, Pedro Souza Filho, Wilson Nascimento Júnior, Luiz Guilherme, José Siqueira e Xueqiu Wang. Muito obrigado pela extensa colaboração científica.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) pela disponibilização dos dados de geoquímica utilizados nessa tese via plataforma virtual GeoSBG;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil. DTI: 380.418/2018-5 e 380998/2019-0; SWE: 202864/2019-7.

“A minha vida começou a ir para frente, quando entendi que todos os problemas que me cercavam eram de minha responsabilidade. A partir daí a solução ficou simples, bastava eu encontrar um caminho.”

**Guilherme Benchimol**  
**CEO e fundador da XP Investimentos**

## RESUMO

Levantamentos geoquímicos multielementares (LGM) quando aliados a técnicas avançadas de processamento de dados e análises estatísticas robustas, constituem importantes ferramentas para o entendimento do meio físico. Sua aplicação na exploração mineral é consagrada e, nas últimas décadas, tem mostrado notável relevância para estudos ambientais ligados à gestão territorial sustentável, particularmente no estabelecimento de concentrações de *background* geoquímico. A definição de valores de *background* tem sido amplamente utilizada para contrapor argumentos a legislações e regulamentos, que estabelecem limites de concentração para elementos potencialmente tóxicos no meio ambiente, muitas vezes sem levar em conta a complexidade e heterogeneidade espaço-temporal de cada região. No Brasil, grande parte dos LGM foram, e continuam sendo executados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), em diferentes partes do território nacional, porém são ainda escassos na região amazônica. O presente estudo está associado a um grande projeto de mapeamento geoquímico denominado *Background* Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas (BGI) executado pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV). A bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI) é particularmente relevante para estudos geoquímicos, pois ela está inserida na maior província mineral do Brasil, a Província Mineral de Carajás, e por não se saber como se dá a distribuição dos elementos nesta região e qual influência os grandes domínios geológicos exercem sobre ela. O objetivo desta pesquisa é investigar a assinatura geoquímica da BHRI e a influência dos seus grandes domínios geológicos na composição química dos sedimentos de corrente. Para atingir tal objetivo, foram construídos mapas geoquímicos, identificadas associações e processos geoquímicos em sedimentos de corrente, definidos a distribuição espacial e concentrações de *background* para os elementos analisados, levando em consideração as compartimentações geoquímicas e/ou geológicas da área de estudo. Buscando alcançar os objetivos mencionados, foram utilizados os dados geoquímicos de sedimentos de corrente do projeto BGI-ITV na totalidade da BHRI obtidos no ano de 2017, e de dois projetos da CPRM na porção centro-sul da BHRI com amostragem nos anos de 2011-2012. Estes projetos foram concebidos em diferentes escalas e densidade amostral, porém, as técnicas de amostragem e procedimentos analíticos são similares. As coletas de amostras de sedimentos de corrente foram realizadas em cursos d'água de sedimentação ativa, nos níveis superficiais de 0 a 10 cm de profundidade, e de preferência no meio do canal. A preparação das amostras incluiu etapas de secagem, desagregação, quarteamento e peneiramento. Aproximadamente 50 g da fração <0,177 mm foram enviadas um laboratório certificado para análises químicas. Em laboratório, as amostras foram submetidas à digestão com *aqua regia* sendo, em seguida, analisados 51 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce,



Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr) via Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS). Os dados geoquímicos foram submetidos à análise estatística descritiva e a alguns testes estatísticos não-paramétricos. Foram gerados vários gráficos (*boxplots*, histogramas, probabilidade e dispersão) para os principais elementos químicos analisados. Utilizou-se técnicas estatísticas multivariadas (p. ex., matrizes de correlação, análise de agrupamento e análise fatorial) para investigar as principais associações multielementares existentes. Para determinação de valores de *background* geoquímico foram empregados métodos modernos amplamente utilizados na literatura especializada. As informações geoespaciais foram processadas e gerenciadas em um ambiente de sistemas de informações geográficas, onde diferentes técnicas cartográficas e de geoprocessamento foram utilizadas para gerar mapas de distribuição geoquímica. De modo geral, constatou-se que, na escala dos levantamentos geoquímicos conduzidos pelo ITV e pela CPRM, não há evidências conclusivas de contaminação relacionada à atividade humana, e sim fortíssimas evidências de uma marcante contribuição geológica na geoquímica dos sedimentos de corrente da BHRI. Utilizou-se metodologia consistente e replicável para identificar as principais associações multielementares e para a definição de compartimentos geoquímicos de superfície da BHRI. As associações geoquímicas identificadas são controladas pelos domínios geológicos, por litologias específicas em áreas restritas e/ou por fatores biogeoquímicos atuantes na área de estudo. A delimitação de compartimentos geoquímicos revelou forte similaridade com os domínios geológicos simplificados da bacia. Concentrações de *background* geoquímico foram determinadas para a totalidade da BHRI e para seus diferentes domínios geológicos. Dentre os métodos sugeridos para a determinação do *background*, a técnica mediana  $\pm 2$ \*Desvio Absoluto da Mediana mostrou os resultados mais consistentes e realistas. Além disso, considera-se indispensável definir valores de referência com base em compartimentos geoquímicos, ou, até mesmo, na configuração geológica local. Considerar valores de referência uniformes para uma vasta área é inadequado. Os valores de *background* determinados nesta pesquisa poderão auxiliar estudos de impactos ambientais, por meio do monitoramento de concentrações anômalas de elementos potencialmente tóxicos, que excedam as concentrações de *background*. Além de seu interesse científico, os resultados aqui apresentados podem ser úteis para auxiliar pesquisas locais de prospecção geoquímica e na formulação de políticas ambientais em território brasileiro.

**Palavras-chave:** Associações multielementares. *Background* geoquímico. Estatística multivariada. Análise de Dados Composicionais. Compartimentos geoquímicos. Cráton Amazônico.

## ABSTRACT

Multielement geochemical surveys (MGS) when combined with advanced data processing techniques and robust statistical analysis, are important tools for understanding the environment. In the last decades, its application in mineral exploration is well established and, in the last decades, it has shown remarkable relevance for environmental studies linked to sustainable territorial management, particularly in the establishment of geochemical background concentration values. The definition of background values has been widely used to demonstrate the inconsistencies of laws and regulations, which establish concentration limits for potentially toxic elements in the environment, often without taking into account the complex spatio-temporal heterogeneity of each region. In Brazil, many MGS were, and continue to be carried out mostly by the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, Geological Survey of Brazil) in different parts of the national territory, although they are still scarce in the Amazon region. The present study is associated with a large geochemical mapping project called the Geochemical Background of the Itacaiúnas River Basin (GBI) carried out by the Instituto Tecnológico Vale (ITV). The Itacaiúnas River Watershed (IRW) is located in the largest mineral province of Brazil, the Carajás Mineral Province, and it is particularly relevant for geochemical studies, because the distribution of chemical elements in this region and the influence of the great geological domains on that distribution are not known. The purpose of this research is to investigate the influence of large geological domains in the chemical composition and geochemical signature of stream sediments of the IRW. In addition, it is intended to generate geochemical maps, identify the associations and geochemical processes in stream sediments, define geochemical compartments for the whole watershed, and determine background concentrations for the analyzed elements, taking into account the geochemical compartments and/or geological domains of the study area. In order to achieve these objectives, the stream sediment geochemical data from the GBI-ITV project obtained in the whole IRW in 2017, and those from two CPRM projects in the center-south portion of the BHRI with sampling in the years 2011-2012 were used. These projects were conceptualized at different scales and sample density; however, the sampling techniques and analytical procedures are similar. Stream sediment sample collections were carried out in active water stream, at surface levels from 0 to 10 cm deep, and preferably in the middle of the channel. Sample preparation included the following steps: drying, disaggregation, quartering and sieving. Approximately 50 g of the fraction <0.177 mm was sent to accredited laboratory for chemical analysis. In the laboratory, the samples were submitted to digestion with aqua regia, and then 51 elements were analyzed (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li,

Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn and Zr) via Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The geochemical data was submitted to descriptive statistical analysis and some non-parametric statistical tests. Several graphs (e.g., boxplots, histograms, probability and dispersion) were generated for the main chemical elements. Multivariate statistics (e.g., correlation matrices, cluster analysis and factor analysis) were used to investigate the main existing multi-element associations. To determine geochemical background values, modern methods widely used in the specialized literature were employed. Geospatial information was processed and managed in an environment of geographic information systems, in which different cartographic and geoprocessing techniques were used to generate geochemical distribution maps. In general, it was found that, on the scale of geochemical surveys conducted by ITV and CPRM, there is no conclusive evidence of contamination related to human activity, but very strong evidence of a marked geological contribution in the geochemistry of the stream sediments of the IRW. A consistent and replicable methodology was used to identify the main multi-element associations and to define IRW's surface geochemical compartments. The geochemical associations identified are controlled by the geological domains, by specific lithologies in restricted areas and/or by biogeochemical factors acting in the study area. The delimitation of geochemical compartments revealed a strong similarity with the simplified geological domains of the basin. Geochemical background concentrations were determined for the IRW and its geological domains. Among the methods suggested for determining the background, the Median  $\pm$  2\*Median Absolute Deviation showed the most consistent and realistic results. In addition, it is considered essential to define reference values based on geochemical compartments, or even a simple geological setting. The assumption of a single uniform reference value for a wide area is inappropriate. The background values proposed in this research may assist environmental impact studies by monitoring anomalous concentrations of potentially toxic elements, which exceed background concentrations. In addition to its scientific interest, the results presented here can be useful to assist local surveys of geochemical prospecting and in the formulation of environmental policies in the Brazilian territory.

**Keywords:** Multielement associations. Geochemical background. Multivariate statistics. Compositional Data Analysis. Geochemical compartments. Amazonian Craton.



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

## PARECER

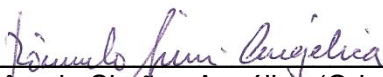
### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de **GABRIEL NEGREIOS SALOMÃO**

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **GABRIEL NEGREIOS SALOMÃO**, orientada pelo Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA) e coorientada pelo Prof. Dr. Roberto Dall’Agnol, composta pelos professores doutores Eduardo Duarte Marques (Membro externo-CPRM), José Augusto Martins Corrêa (Membro interno-UFPA), Marco Antonio Galarza Toro (Membro interno-UFPA), e Candido Augusto Veloso Moura (Membro interno-UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DA BACIA DO RIO ITACAIÚNAS, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS: ASSINATURA GEOQUÍMICA DOS BLOCOS CRUSTAIS E IMPLICAÇÕES PARA RECURSOS MINERAIS E MEIO AMBIENTE**”, emite o seguinte parecer:

O texto apresentado é de boa qualidade e incorpora uma parte inicial em que apresenta os objetivos e a fundamentação teórica, abordando o estado da arte das técnicas estatísticas e de amostragem/análise empregadas e dos trabalhos executados. Os resultados são apresentados na forma de artigos completos sendo dois publicados e um submetido. A apresentação foi clara e concisa e durante a arguição o candidato mostrou pleno domínio das técnicas empregadas e do tema da tese.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado, e, como o candidato concluiu o seu trabalho antes dos 48 meses, e a tese apresenta excelente qualidade, a banca recomenda a aprovação com **DISTINÇÃO**.

Belém, 26 de outubro de 2020.



---

Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (Orientador – UFPA)



---

Prof. Dr. Eduardo Duarte Marques (Membro externo-CPRM)



---

Prof. Dr. Candido Augusto V. Moura (Membro interno-UFPA)



---

Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa (Membro interno-UFPA)



---

Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro (Membro interno-UFPA)