



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

---

**TESE DE DOUTORADO N° 127**

**GEOQUÍMICA ELEMENTAL, MINERALOGIA E ISÓTOPOS  
DE Sr, Nd E Pb EM SEDIMENTOS DE FUNDO NO BAIXO  
CURSO DO RIO AMAZONAS E TRIBUTÁRIOS:  
CONSIDERAÇÕES SOBRE PROVENIÊNCIA E MISTURA DE  
SEDIMENTOS**

**Tese apresentada por:**

**MARCOS JOSÉ RAMALHO TEÓDULO**

**Orientador: Prof. Jean Michel Lafon (UFPA)**

**Coorientador: Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)**

---

**BELÉM - PARÁ**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPa

---

Teódulo, Marcos José Ramalho, 1971 -

Geoquímica elemental, mineralogia e isótopos de Sr, Nd E Pb em sedimentos de fundo no baixo curso do Rio Amazonas e tributários: considerações sobre proveniência e mistura de sedimentos / Marcos José Ramalho Teódulo. – 2017.

xxiv, 209 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Jean Michel Lafon

Coorientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2017.

1. Sedimentos (Geologia) – Amazonas, Rio. 2. Geoquímica. 3. Mineralogia. 4. Isótopos. I. Título.

CDD 22. ed.: 551.30409811

---



**Universidade Federal do Pará**

**Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**GEOQUÍMICA ELEMENTAL, MINERALOGIA E ISÓTOPOS  
DE Sr, Nd E Pb EM SEDIMENTOS DE FUNDO NO BAIXO  
CURSO DO RIO AMAZONAS E TRIBUTÁRIOS:  
CONSIDERAÇÕES SOBRE PROVENIÊNCIA E MISTURA DE  
SEDIMENTOS**

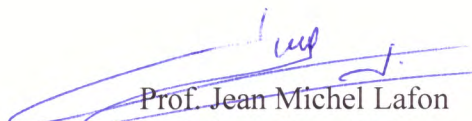
**TESE APRESENTADA POR:**

**MARCOS JOSÉ RAMALHO TEÓDULO**

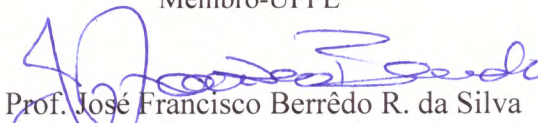
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

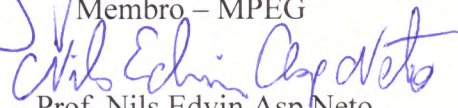
**Data de Aprovação: 22 / 09 / 2017**

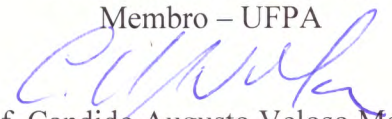
**Banca Examinadora:**

  
Prof. Jean Michel Lafon  
Orientador – UFPA

  
Prof. Virgínio Henrique de Miranda L. Neumann  
Membro-UFPE

  
Prof. José Francisco Berrêdo R. da Silva  
Membro – MPEG

  
Prof. Nils Edvin Asp Neto  
Membro – UFPA

  
Prof. Candido Augusto Veloso Moura  
Membro – UFPA

*Aos meus queridos pais Edmar e Lielery,  
a minha amada Esposa Jana e minhas  
filhas Sophie & Zoe Teódulo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através da concessão das bolsas de pesquisas, desde de minha graduação (Programa de Iniciação à Pesquisa Científica-PIBIC/CNPq), durante o meu Mestrado (Msc em Geociências) na UFPE e no meu Doutorado em Geoquímica e Geologia Isotópica no IG/UFPA.

Ao Laboratório de Geologia Isotópica PARA-ISO, pela realização das minhas análises isotópicas. Ao querido e estimado orientador, Prof. Dr. Jean-Michel Lafon, pela orientação, suporte financeiro no desenvolvimento da pesquisa, pelas inúmeras sugestões e detalhadas revisões do texto. Ao Prof. Dr. José Augusto Corrêa, meu primeiro contato na UFPA, pela grande contribuição no desenvolvimento da pesquisa, inúmeras sugestões e conselhos e discussões.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Pedro Walfir, pela coorientação, suporte financeiro na execução das etapas de campo e valiosas sugestões na execução da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rômulo Simões Angêlica pela realização das análises de DRX, auxílio na interpretação dos difratogramas, indicação dos textos científicos, ensinado o cálculo de área e demais sugestões para o andamento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Marco Antônio Galara Toro pelas valiosas contribuições na discussão do texto, indicações de textos científicos, realização das análises isotópicas, momentos de descontração e amizade.

Ao colega João Marinho Milhomen pelas inúmeras discussões científicas e auxílio no esclarecimento do cálculo das idades modelos Nd-T<sub>DM</sub>. Aos demais colegas de Pós-Graduação, Lucio Cardoso Medeiros, Filho, Natasha Coral, Simone Pereira de Oliveira, Flávio Semblano, pelas trocas de informação, artigos científicos, momentos de descontração e lazer. Ao colega Ellery Silva pela grande ajuda com a impressão, elaboração da ficha catalográfica e entrega dos volumes da tese junto a biblioteca do IG/UFPA.

A minha amada esposa Jana e filhas Sophie e Zoe Teódulo, pela inestimável fonte de inspiração e apoio na execução desta pesquisa. Ao meu sogro Lothar e sogra Úrsula Kunz, pela imensa ajuda na educação e tutela de minhas amadas filhas, permitindo a minha ausência pelo longo período de tempo.

Aos meus queridos irmãos e Irmã, Mácio, Irineu e Viviane Teódulo pelo inestimável incentivo, carinho, apoio intelectual e financeiro, logístico, possibilitando da melhor maneira possível as minhas viagens e permanência no Brasil.

A Dr<sup>a</sup>. Elma Oliveira pela valiosa ajuda nas etapas laboratoriais. Aos Técnicos do Laboratório de Geologia Isotópica PARÁ-ISO. Jeferson da Silva Barbosa, Paulo Bahia e Izanete Melo pela grande ajuda na execução das etapas laboratoriais e análises isotópicas.

Ao gentil, prestativo e amável Natalino Valente Moreira de Siqueira, químico responsável pelo Laboratório de Análises Químicas-IG/UFPA, pela valiosa ajuda e contribuição na execução desta pesquisa. A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para execução e êxito na realização desta pesquisa.

## RESUMO

Este estudo examina as texturas e composições mineralógicas, os teores de elementos maiores, traços e as assinaturas isotópicas de Sr ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ), Nd ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) e Pb ( $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) em 37 amostras de sedimentos de fundo em rios da bacia amazônica, incluído o baixo curso do rio Amazonas e alguns de seus afluentes (e.g. rios Tapajós, Xingu, Jari, Paru) além do rio Pará e a desembocadura do rio Tocantins. O objetivo é investigar as variações composicionais, avaliar a influência do rio Amazonas nos sedimentos de fundo depositados no baixo curso dos tributários estudados e identificar as potenciais áreas fontes dos sedimentos. As amostras foram coletadas com draga de Petersen. As características granulométricas e mineralógicas foram determinadas por difração a laser e por difração de raios X, respectivamente. As análises geoquímicas de elementos maiores e traços foram efetuadas em laboratórios comerciais por ICP-OES e ICP-MS. As assinaturas isotópicas de Sr, Pb e Nd foram determinadas com espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) Thermo-Finnigan, modelo Neptune e espectrômetros de massa por termo-ionização (TIMS) Finnigan, modelo MAT-262 e Thermo-Finnigan, modelo Triton Plus. As amostras de sedimentos de fundo dos rios estudados exibem percentuais muito variáveis de areia, silte e argila. Essa heterogeneidade da composição textural retrata condições hidrodinâmicas de alta e muito alta energia, características de sedimentos inconsolidados de canais ativos, transportados em fluxo turbulento. Apesar dessa diversidade de composições texturais, os sedimentos de fundo do rio Amazonas, não apresentam variações significativas nas concentrações dos elementos maiores e traços. Ao contrário, as significativas variações químicas nos sedimentos de fundo dos tributários estudados (rios Tapajós, Xingu e Paru) revelam que as características texturais exercem um papel importante no controle das composições químicas destes sedimentos. Os sedimentos de fundo dos rios Amazonas e Pará e dos sedimentos da zona de confluência dos rios Xingu e Paru com o rio Amazonas revelam imaturidade mineralógica, com assembleia de argilo minerais dominada por esmectita e illita, e conteúdo menor de caulinita. Os sedimentos de fundo dos tributários como os rios Tapajós, Xingu e Jari e do rio Tocantins mostram grande maturidade mineralógica, dominada por quartzo e caulinita. Os índices de alterações químicas (CIAs) indicam condições diferenciadas de intemperismo nas fontes dos sedimentos de fundo. Evidências, mineralógicas, geoquímicas e isotópicas permitiram identificar a influência do rio Amazonas nos sedimentos de fundo do baixo curso do rio Xingu. Essa influência foi quantificada no diagrama isotópico  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com curva de mistura entre dois

componentes (Rio Amazonas – rio Xingu). Foi estimado um percentual da ordem de 30% de participação dos sedimentos do rio Amazonas nos sedimentos do rio Xingu até uma distância de cerca de 35 km rio adentro. Os dados mineralógicos e geoquímicos, as baixas razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e os valores de  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  pouco negativos confirmam a dominância de sedimentos de fundo do rio Amazonas no trecho do baixo curso do rio Paru investigado neste trabalho. A similaridade das composições isotópicas Sr-Nd-Pb das amostras do rio Amazonas, da zona de confluência do rio Xingu e das amostras do rio Pará ( $0,7129 < ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7203$ ;  $-11,58 < \epsilon_{\text{Nd}(0)} < -7,39$ ;  $18,86 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 19,29$ ;  $15,68 < ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 15,74$ ;  $38,75 < ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 39,31$ ) com os sedimentos em suspensão dos rios Solimões e Amazonas e os sedimentos de fundo do estuário do rio Amazonas, indica que não houve contribuições significativas dos tributários cratônicos ao longo do baixo curso do rio Amazonas, como apontado em estudos prévios. As assinaturas geoquímicas dos sedimentos de fundo do baixo curso do rio Amazonas e do rio Pará confirmam que, como no caso dos sedimentos em suspensão, os sedimentos de fundo também são essencialmente originados dos Andes. Por outro lado, os dados geoquímicos dos tributários cratônicos (rios Tapajós, Xingu e Jari) indicam que os sedimentos de fundo foram derivados de fontes heterogêneas com composições predominantemente félsicas e que foram submetidos a importante reciclagem durante o transporte. As composições isotópicas de Sr-Nd-Pb dos sedimentos de fundo dos rios tributários indicam que estes sedimentos foram derivados essencialmente da erosão de rochas das respectivas províncias e domínios geocronológicos/geotectônicos da porção oriental do Cráton Amazônico atravessados por estes rios: Domínios Iriri-Xingu e Bacajá e Província Carajás (rio Xingu); Províncias Tapajós e Juruena (rio Tapajós); Bloco Amapá e Domínio Carecuru (rio Jari). Para os sedimentos de fundo do rio Tocantins as fontes principais apontadas pelos dados isotópicos são as unidades metassedimentares da Faixa Araguaia. O estudo mostrou o potencial das assinaturas isotópicas de Pb, Sr e, sobretudo Nd em sedimentos de fundo, junto com características mineralógicas e geoquímicas, para mensurar a influência do rio Amazonas nos tributários do seu baixo curso bem como para evidenciar processos de mistura entre diferentes sistemas fluviais e identificar as possíveis fontes de sedimentos.

Palavras-chave: Sedimentos de Fundo. Isótopos Radiogênicos Sr-Nd-Pb. Proveniência e Mistura de Sedimentos. Bacia Amazônica.



## ABSTRACT

We investigate texture, clay mineral compositions, major and trace element geochemistry together with isotopic signatures of Sr ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ), Nd ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) and Pb ( $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) in 37 samples of recent bottom sediment from lowland Amazon River and tributaries (e.g the Tapajós, Xingu, Jari, Paru rivers), including the Pará River and Tocantins River mouth. The aim of the study is to evaluate the influence of the Amazon river on the bottom sediments deposited in the lower course from the studied tributaries and to identify the potential sediments sources. Samples were collected with a Petersen dredger. The granulometric and mineralogical characteristics were determined by laser diffraction and by X-ray diffraction, respectively. The geochemical analyzes of major and trace elements were carried out by ICP-OES and ICP-MS in commercial laboratories. Isotopic signatures of Sr, Nd and Pb were determined with Thermo-Finnigan Neptune inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) and Finnigan MAT-262 and Thermo-Fischer Triton Plus thermo-ionization mass spectrometers (TIMS). The bottom sediment samples from the studied rivers show variable percentages of sand, silt and clay contents. This heterogeneity of the textural composition depicts hydrodynamic conditions of high and very high energy, characteristics of unconsolidated sediments of active channels, transported in turbulent flow. Despite this diversity of textural compositions, the bottom sediments of the Amazon River do not show significant variations of major and trace element contents. By contrast, the significant chemical variations in the bottom sediments of the tributaries (Tapajós, Xingu and Paru rivers) suggest that the texture play an important role in the control of the chemical compositions of these sediments. The bottom sediments of the Amazonas and Pará rivers and the sediments of the confluence zones of the Xingu and Paru rivers with the Amazon river reveal mineralogical immaturity, with a clay mineral assemblage dominated by smectite, illite and smaller kaolinite content. Conversely, the bottom sediments from the tributaries such as the Tapajós, Xingu, Jari rivers and from the Tocantins river show high mineralogical maturity, with mineral associations dominated by quartz and kaolinite. Chemical Indexes Alterations (CIAs) indicate different weathering conditions in the bottom sediment sources. Mineralogical and geochemical evidences and isotopic signatures allowed to identify the influence of the Amazon River on the bottom sediments from Xingu River lower course. This influence was quantified in the  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic diagram for two components mixture (Amazon River - Xingu River). A percentage of around 30 % of the sediment of the Amazon River was estimated in the sediments of the Xingu River at least ~ 35 km upstream.

Mineralogical and geochemical data, low  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios and low negative  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$  values confirm the dominance of the bottom sediments from the Amazon River in the lower course of Paru River investigated in this work. The similarity of the Sr-Nd-Pb isotopic composition of the samples from the Amazon River, and from the confluence zone of the Xingu River and the Pará River ( $0.7129 < ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7203$ ;  $-11.58 < \epsilon_{\text{Nd}(0)} < -7.39$ ;  $18.86 < ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 19.29$ ;  $15.68 < ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 15.74$ ;  $38.75 < ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 39.31$ ) with the suspended sediments of the Solimões and Amazonas rivers and the bottom sediments of the Amazon River estuary, indicates that there were no significant contributions of the cratonic tributaries along the low stream of the Amazon river, as pointed out in previous studies. The geochemical signatures of bottom sediments of the lower Amazon River and Pará River confirm that, like suspended sediments, the bottom sediments also originate essentially from the Andes. On the other hand, the geochemical data from the cratonic tributaries (Tapajós, Xingu and Jari rivers) indicate that the bottom sediments were derived from heterogeneous sources with predominantly felsic compositions and that were exposed to important recycling during transportation. The Sr-Nd-Pb isotopic compositions indicate that these sediments were derived essentially from the erosion of rocks from the respective geochronological/geotectonic domains and provinces of the eastern portion of the Amazonian Craton crossed by these rivers: Irixi-Xingu and Bacajá domains and Carajás Province (Xingu River); Tapajós and Juruena Provinces (Tapajós River); Amapá Block and Carecuru Domain (Jari River). For the Tocantins river bottom sediments, the main sources indicated by the isotopic data are the metasedimentary units from the Araguaia Fold Belt. The study showed the potential of the isotopic signatures Pb, Sr and, above all, Nd in bottom sediments, along with mineralogical and geochemical characteristics, to measure the influence of the Amazon river on their lowland tributaries, as well as to show mixing processes between different fluvial systems and to identify sediment sources.

**Keywords:** Bottom Sediments. Sr-Nd-Pb Radiogenic Isotopes. Sediment Mixing and Provenance. Amazon Basin.



PARECER

**SOBRE A DEFESA PÚBLICA DE Tese DE DOUTORADO DE MARCOS JOSÉ RAMALHO TEÓDULO**

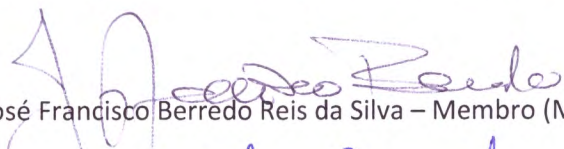
A banca examinadora da tese de doutorado de **MARCOS JOSÉ RAMALHO TEÓDULO** orientado pelo Prof. Dr. Jean Michel Lafon (UFPA), composta pelos professores doutores Virginio Henrique de Miranda Lopes Neumann (UFPE), José Francisco Berredo Reis da Silva (MPEG), Nils Edvin Asp Neto (UFPA) e Candido Augusto Veloso Moura (UFPA), após apresentação de sua tese intitulada “**GEOQUÍMICA ELEMENTAL, MINERALOGIA E ISÓTOPOS DE Sr, Nd e Pb EM SEDIMENTOS DE FUNDO NO BAIXO CURSO DO RIO AMAZONAS E TRIBUTÁRIOS: CONSIDERAÇÕES SOBRE PROVENIÊNCIA E MISTURA DE SEDIMENTOS**” emite o seguinte parecer:

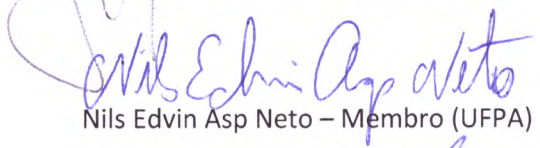
O candidato realizou a sua apresentação de forma clara, organizada e segura. Durante a arguição demonstrou domínio da temática abordada e respondeu com segurança as perguntas que lhe foram formuladas pela banca. A tese, que foi apresentada na forma tradicional, representa uma importante contribuição para o entendimento do transporte e mistura de sedimentos no baixo Amazonas, e atende plenamente os requisitos para a obtenção do título de doutor. Assim, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado de Marcos José Ramalho Teódulo.

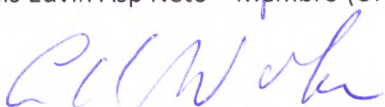
Belém, 22 de setembro de 2017.

  
Jean Michel Lafon (Orientador – UFPA)

  
Virginio Henrique de Miranda Lopes Neumann – Membro (UFPE)

  
José Francisco Berredo Reis da Silva – Membro (MPEG)

  
Nils Edvin Asp Neto – Membro (UFPA)

  
Candido Augusto Veloso Moura – Membro (UFPA)