



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURA DE ÁGUAS ENTRE O SISTEMA BARREIRAS E  
PIRABAS COM BASE NA ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E  
HIDROGEOQUÍMICA EM ANANINDEUA, BELÉM E BACKGROUNDS EM  
BENEVIDES E CAPANEMA, PARÁ**

**Dissertação apresentada por:  
OLAVO BILAC QUARESMA DE OLIVEIRA FILHO  
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro**

---

**BELÉM  
2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

O48i Oliveira Filho, Olavo Bilac Quaresma

Investigação de mistura de águas entre o sistema Barreiras e Pirabas com base na assinatura isotópica de Estrôncio (Sr) e hidrogeoquímica em Ananindeua, Belém e backgrounds em Benevides e Capanema, Pará / Olavo Bilac Quaresma de Oliveira Filho; Orientador: Marco Antonio Galarza Toro – 2012  
xvi, 82 f.: il.

Dissertação (mestrado em geoquímica e petrologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2012.

1. Hidrologia. 2. Isótopos de Sr. 3. Hidrogeoquímica. 4. Aquífero Barreiras. 5. Aquífero Pirabas. 6. Pará. I. Galarza Toro, Marco Antonio, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22° ed.: 551.48098115

---



**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Geociências**

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

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURA DE ÁGUAS ENTRE O  
SISTEMA BARREIRAS E PIRABAS COM BASE NA  
ASSINATURA ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO (Sr) E  
HIDROGEOQUÍMICA EM ANANINDEUA, BELÉM E  
BACKGROUNDS EM BENEVIDES E CAPANEMA, PARÁ**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR**

**OLAVO BILAC QUARESMA DE OLIVEIRA FILHO**

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

Data de Aprovação: 31/05/2012

**Banca Examinadora:**

**Prof. MARCO ANTONIO GALARZA TORO  
(Orientador – UFPA)**

**Prof. DANIEL MARCOS BONOTTO  
(Membro – UNESP)**

**Prof. CANDIDO AUGUSTO VELOSO MOURA  
(Membro - UFPA)**

Dedico este trabalho a toda minha família, que me deu apoio quando mais precisei, e a todas as outras pessoas que me apoiaram nesses anos de luta, em especial a minha amada Giselle Santiago.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao longo do trajeto de criação e desenvolvimento do Mestrado.

Sinceros Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pelo custeio de diárias e ajuda de custo para as campanhas de coleta de amostras, sem o referido auxílio, tornar-se-ia impossível a aquisição de dados da aludida dissertação.

Muitos e elogiosos agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro, por está sempre ao meu lado no trabalho, nos bons momentos e nos difíceis, também. Por não ser um trabalho apoiado por projetos de pesquisa, seu poder de auxílio foi fundamental para desenvolvimento do trabalho, configurando-se figura ímpar dentro do Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica.

Agradeço a Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências, sobretudo ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARÁ-ISO) pela infra-estrutura disponibilizada e atenção conferida durante o processo de obtenção de dados.

Agradeço ao Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa, pela cessão dos laboratórios de Cromatografia, Hidroquímica e Análises Químicas para análises de cunho hidrogeoquímico, bem como utilização de reagentes, materiais e corpo técnico para obtenção de dados e desenvolvimento da respectiva dissertação.

A minha querida amiga Graziela Jones, pelo apoio irrestrito nas campanhas de coletas, pelo carinho e compreensão em momentos chaves do trabalho.

A equipe do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), composta pelo MSc. Wilson Rocha, MSc. Diogo Santos, pelo auxílio fundamental na confecção dos mapas nessa dissertação.

Finalmente, agradeço ao Sr. Gilmar, Gerente de Operações do Setor COSANPA (Unidade BR) e para a Srt<sup>a</sup>. Evelyn, Técnica em Saneamento (Unidade SAAEB), bem como todos os síndicos dos condomínios e amigos que fiz ao longo desta jornada, que sem o apoio do mesmo seria inviável a aquisição de dados no trabalho.

“A satisfação está no esforço e não apenas na realização final”

*Mahatma Gandhi*

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados”

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

Até a década de 70 acreditava-se que a região nordeste do Pará, assim como outras áreas de idade cenozóica no Brasil, fosse estável, sem indícios de tectonismo recente. Entretanto, investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificaram feições e estruturas tectônicas que caracterizaram o processo neotectônico do nordeste do Pará. Concomitante ao exposto, estudos em águas foram realizados na Região Metropolitana de Belém e demonstram a vulnerabilidade de aquíferos mais profundos por processos neotectônicos, sugerindo misturas entre os aquíferos Barreiras e Pirabas. Resultados obtidos a partir da variação sazonal revelam aquíferos de características hidrogeoquímicas distintas, destacando-se os parâmetros pH (4,27 a 6,19 no Barreiras; 7,00 a 8,02 no Pirabas), Condutividade Elétrica (11,1 a 92,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no Barreiras; 222 a 406  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no Pirabas), Sólidos Totais Dissolvidos (10 a 87 mg/l no Barreiras; 105 a 181 mg/l no Pirabas),  $\text{Cl}^-$  (0,18 a 0,42 meq/l no Barreiras; 0,05 a 0,12 meq/l no Pirabas),  $\text{Na}^+$  (0,24 a 0,50 meq/l no Barreiras; 0,05 a 0,18 meq/l no Pirabas),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,001 a 0,061 meq/l no Barreiras; 0,68 a 0,128 meq/l no Pirabas),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,01 a 0,33 meq/l no Barreiras; 1,78 a 2,53 meq/l no Pirabas) e  $\text{Sr}^{2+}$  (0,0002 a 0,0066 meq/l no Barreiras; 0,016 a 0,023 meq/l no Pirabas), todos com notável variação entre os sistemas aquíferos abordados. Os resultados das análises a partir da matriz de correlação entre os sistemas aquíferos (Barreiras e Pirabas) nos períodos seco e chuvoso mostraram índices de correlação ( $r$ ) acima de 0,8 em vários parâmetros estudados, evidenciando uma relação direta de contribuição entre os aquíferos. Com relação às fácies hidrogeoquímicas são divididas em 2 tipos: 1) aquífero Barreiras, período seco, as amostras comportam-se como águas do tipo  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$ , subdivididas nos tipos  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Na}^+$ ; enquanto no período chuvoso temos águas do tipo  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ - $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$ , salientado-se a menor estabilidade deste aquífero sendo sua fácies tipicamente de *input* de água meteórica, alterando o tipo da água conforme o ciclo hidrológico e 2) aquífero Pirabas, tanto no período seco quanto no chuvoso comportou-se como água do tipo  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ , mostrando grande estabilidade da fácies hidrogeoquímica. O diagrama de composição do tipo Schöller para os aquíferos Barreiras e Pirabas, a partir do modelamento hidrogeoquímico a 10%, indica mistura das amostras desses aquíferos. As análises isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mostram, de forma geral, que as águas do aquífero Barreiras são mais radiogênicas (continental) que as do aquífero Pirabas (marinha). Destaca-se que no período chuvoso, em geral, há homogeneização nas razões isotópicas obtidas (abaixo de 0,71), corroboradas pela razão isotópica da água da chuva (0,705316), sugerindo misturas entre os sistemas aquíferos estudados. A partir dos diagramas de dispersão

de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -STD é possível observar o tipo de processo que controla o sistema aquífero (no caso do Barreiras apresenta-se o intemperismo dos silicatos, enquanto no Pirabas apresenta-se a dissolução da calcita). Os resultados da análise discriminante utilizando os parâmetros isotópicos e hidrogeoquímicos ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Cl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-K<sup>+</sup>-Mg<sup>2+</sup>) sugerem uma excelente discriminação das amostras do Barreiras e Pirabas no período chuvoso, assim como as análises de PCA utilizando  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-K<sup>+</sup> indicam misturas entre os sistemas aquíferos no período chuvoso. A combinação dos resultados isotópicos e parâmetros hidrogeoquímicos no período seco e chuvoso com base na assinatura isotópica do Sr, estatística multivariada, diagrama de Schöller e análises de correlação sugerem processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, corroborando com os estudos estruturais. Os mesmos que indicam a mobilidade das águas desses aquíferos em misturar-se, principalmente pelas feições neotectônicas existentes na Região Metropolitana de Belém.

Palavras-Chave: Hidrologia. Isótopos de Sr. Hidrogeoquímica. Aquífero Barreiras. Aquífero Pirabas. Pará.



## ABSTRACT

Until the 70's was believed that the northeastern region of Para, as well as other areas of Cenozoic age in Brazil was stable, without evidence of recent tectonics. However, field investigations and remote sensing analysis identified features and tectonic structures that characterize the neotectonic process this region. Concomitant with the above studies were performed in water in the metropolitan area of Belem and demonstrate the vulnerability of aquifers deeper by neotectonic processes, suggesting mixing between Barreiras and Pirabas aquifers. Results obtained from the seasonal variation reveal distinct hydrogeochemical characteristics, the parameters pH (4,27 to 6,19 in Barreiras; 7,00 to 8,02 in Pirabas), Electrical Conductivity (11,1 to 92,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  in Barreiras; 222-406  $\mu\text{S}/\text{cm}$  in Pirabas), Total Dissolved Solids (10-87 mg/l in Barreiras, 105-181 mg/l in Pirabas),  $\text{Cl}^-$  (0,18 to 0,42 meq/l in Barreiras; 0,05 to 0,12 meq/l in Pirabas),  $\text{Na}^+$  (0,24 to 0,50 meq/l in Barreiras; 0,05 to 0,18 meq/l in Pirabas),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,001 to 0,061 meq/l in Barreiras; from 0,68 to 0,128 meq/l in Pirabas),  $\text{Ca}^{2+}$  (0,01 to 0,33 meq/l in Barreiras; 1,78 to 2,53 meq/l in Pirabas) and  $\text{Sr}^{2+}$  (0,0002 to 0,0066 meq/l in Barreiras; 0,016 to 0,023 meq/l in Pirabas), all data with considerable variation between the aquifer systems. The analysis results from the correlation matrix between the aquifer systems in dry and wet periods showed correlation coefficients ( $r$ ) above 0,8 on various parameters studied, suggesting a direct contribution from the aquifers. Regarding the hydrogeochemical facies are divided in two types: 1) Barreiras aquifer, dry period, the samples behave as water-type  $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ , divided in two types  $\text{Cl-Na-Ca-SO}_4$  and  $\text{Cl-Fe-Na}$ ; while it have water during the rainy season of the type  $\text{Cl-Na-Ca-SO}_4\text{-Cl}$  and  $\text{Cl-Na-Ca}$ , pointed to lower stability of this aquifer and its facie typically input of meteoric water, changing the type of water as the water cycle and 2) Pirabas aquifer, both in the dry season and the rainy behaved like water type  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , showing great stability of hydrogeochemistry facie. The diagram Schöller type composition for Barreiras and Pirabas aquifers, from 10% hydrogeochemistry modeling indicates mixture of these samples aquifers. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic show in general the waters of Barreiras aquifer are more radiogenic (continental) that the aquifer Pirabas (Navy). It's noteworthy that during the rainy season in general there is homogeneity in the isotopic ratios obtained (below 0,71), corroborated by the isotope ratio of rainwater (0,705316), suggesting mixing between aquifers studied. As the scatter plots of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -STD is possible to see the type of process that controls the aquifer (in the Barreiras case shows the weathering of the silicate, while in Pirabas shows the dissolution of the calcite). The results of discriminant analysis using isotopic and hydrogeochemical parameters

( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{K}^+$ - $\text{Mg}^{2+}$ ) suggest an excellent breakdown of Barreiras and Pirabas samples during the rainy season, as well as analyzes using PCA ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{K}^+$ ) indicate mixtures between the aquifer systems in the rainy season. The combined results of isotopic and hydrogeochemical parameters in dry and rainy season based on the Sr isotopic signature, multivariate statistics, Schöller diagram and correlation analyzes suggest mixing processes, especially in the rainy season between Barreiras and Pirabas aquifers, corroborating structural studies. They indicate the mobility of water in these aquifers mix, mainly by neotectonic features existing in the metropolitan region of Belém.

Keywords: Hydrology. Sr Isotopes. Hydrogeochemistry. Barreiras Aquifer. Pirabas Aquifer. Pará.