



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 643**

**VARIAÇÃO SAZONAL ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO E  
HIDROGEOQUÍMICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS  
BARREIRAS E MARAJÓ NA BORDA LESTE DA BACIA DO  
MARAJÓ**

Apresentado por:

**FRANCISCO ÁUREO NORONHA FILHO**  
**Orientador: Dr. Marco Antonio Galarza Toro (UFPA)**

---

**BELÉM-PARÁ  
2023**

**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)**

---

N852v Noronha Filho, Francisco Áureo.  
Variação sazonal isotópica de estrôncio e hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó na borda leste da Bacia do Marajó / Francisco Áureo Noronha Filho. — 2023.  
xvii, 88 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e  
Geoquímica, Belém, 2023.

1. Razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . 2. Mistura de águas subterrâneas. 3.  
Hidrogeoquímica. 4. Isótopos de estrôncio. 5. Hidrogeologia. I.  
Título.

CDD 551.908115

---



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

**VARIAÇÃO SAZONAL ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO E  
HIDROGEOQUÍMICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS  
BARREIRAS E MARAJÓ NA BORDA LESTE DA BACIA DO  
MARAJÓ**

**Dissertação apresentada por**

**FRANCISCO ÁUREO NORONHA FILHO**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA e PETROLOGIA e Linha de Pesquisa Geocronologia e Geoquímica  
Isotópica.**

**Data de Aprovação: 13 / 11 / 2023**

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro**  
(Orientador – UFPA)

**Prof. Dr. Jean Michel Lafon**  
(Membro – UFPA)

**Prof. Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva**  
(Membro – MPEG)

*Dedico este trabalho à minha mãe, à minha  
família e aos meus amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Com imensa alegria finalizo esta etapa da minha carreira acadêmica. E tenho muito a agradecer por ter chegado ao fim desta jornada. Sou grato ao Senhor pela sua imensa misericórdia e graça que me alcança todos os dias. Motivo pelo qual cheguei até aqui e pelo qual agradeço pela conquista desta vitória.

Agradeço à minha família, especialmente à minha mãe e aos meus avós maternos que tanto me ajudaram para que eu chegasse até aqui. Agradeço também a meus irmãos Fábio e Fernanda e minha cunhada Rejany.

Sou imensamente grato ao prezado orientador Dr. Marco Antonio Galarza Toro pela oportunidade única de ter me aceitado para orientação e ingresso no PPGG. Agradeço também ao ex-aluno Thiago Luiz Dias Gomes cujo trabalho foi precursor deste projeto de mestrado. Agradeço ao Laboratório de Geologia Isotópica (pela infraestrutura), ao Laboratório de Hidroquímica, ao PPGG (pela ajuda financeira nas coletas de amostras sazonais e à CAPES (pela bolsa de mestrado).

Agradeço também ao Dr. José Augusto Corrêa, à Dra. Aline Meiguins, ao Dr. Afonso Nogueira e à Dra. Andressa Nogueira pelas valiosas contribuições e orientações que muito me ajudaram neste trabalho. Agradeço muito a minha colega de mestrado e doutoranda Laura Garzon pela imensa contribuição a este trabalho que me auxiliou no entendimento da Formação Marajó e micropaleontologia.

Agradeço também à Dra. Clara Sena (UiO), à doutoranda Aurora Garcia (UiO), à Dra. Elizabeth Alve (UiO) e à doutoranda Thaise Freitas (UiO) por todo apoio na Universidade de Oslo (UiO) durante intercâmbio na Noruega que também muito contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço a todos os meus colegas da sala 07 que me acolheram e muito me ajudaram com as dúvidas acerca da geologia e por todo o apoio.

Ademais, agradeço a todo apoio e estrutura do IG e do PPGG que me permitiram chegar até aqui.

*“O importante é não deixar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir. Não se pode deixar de nos maravilhar ao contemplar os mistérios da eternidade, da vida, da estrutura maravilhosa da realidade. Tenta apenas compreender um pouco deste mistério todos os dias.”*

Albert Einstein

## RESUMO

Os dois principais sistemas aquíferos utilizados para consumo e abastecimento na região metropolitana de Belém-PA (RMB) são os aquíferos Barreiras e o Marajó, anteriormente denominado Pirabas. Dentro do contexto geológico regional, a interpretação da existência da Borda Leste da Bacia do Marajó e Formação Marajó na RMB trouxe discussões interessantes que podem contribuir para um maior detalhamento e entendimento da hidrogeologia local. Bem como auxiliar na interpretação e integração de trabalhos similares desenvolvidos anteriormente. Uma vez que os trabalhos anteriores demonstraram comportamentos distintos da geoquímica isotópica do estrôncio. Desta maneira, este trabalho aborda este tema reunindo informações anteriores e atuais e discutindo novas proposições. Para tanto, realizou-se a caracterização hidrogeoquímica e caracterização geoquímica isotópica do estrôncio dos aquíferos Barreiras e Marajó nos municípios Benevides, Marituba e Santa Izabel. Cujo objetivo principal foi o de compreender a dinâmica sazonal de interação entre os sistemas aquíferos Barreiras e Marajó, identificando os processos de recarga da água meteórica e as proporções de mistura entre o aquífero Barreiras e o Marajó. As amostras de água subterrânea foram coletadas em 15 poços, sendo 09 do aquífero Barreiras e 06 do aquífero Marajó nos municípios de Marituba, Benevides e Santa Izabel do Pará na RMB. A amostragem ocorreu durante no ano de 2013, bimestralmente, abrangendo o ciclo hidrológico anual e a sazonalidade dos períodos mais chuvoso (dezembro- maio) e menos chuvoso (junho-novembro). As análises da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nas amostras de água subterrânea foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica do Instituto de Geociências (PARÁ-ISO) utilizando o Espectrômetro de Massas com Plasma Indutivamente acoplado Multicoletor de Alta Resolução (MC-ICP-MS, Neptune) de acordo com a metodologia proposta por Bordalo *et al.* em 2007. As análises hidroquímicas foram reproduzidas de acordo com as metodologias padrões para análises de água da Associação Americana de Saúde Pública, APHA de 1995 e da Agência Nacional de Águas de 2011 no Laboratório de Hidroquímica do Instituto de Geociências. Para o ferro total a determinação foi por meio da espectrofotometria. O método de Grasshoff de 1964 foi utilizado para análise da sílica. Por meio da cromatografia líquida foram determinados principais cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) com utilização do cromatógrafo de íons DIONEX DX-120. O aquífero

Barreiras apresentou altas concentrações de nitrato associadas aos aquíferos livres, pH ácido e fácies cloretada sódica com razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mais radiogênica no período menos chuvoso similar às rochas continentais e menos radiogênicas similar às águas meteóricas no período mais chuvoso sugerindo influência dos processos de recarga. O aquífero Marajó apresentou comportamento confinado, pH neutro e fácies bicarbonatada cálcica com algumas diferenças na assinatura dos íons comparado ao aquífero Pirabas. As razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  do aquífero Marajó foram menos radiogênicas e similares aos macrofósseis carbonáticos da Formação Pirabas. Também apresentou pequenas variações nas razões isotópicas em ambos os períodos sazonais que sugerem uma proporção de mistura maior com o aquífero Barreiras no período mais chuvoso. Os resultados da modelagem estimam que há uma maior contribuição da água meteórica no período mais chuvoso no aquífero Barreiras. Assim como há uma maior proporção de mistura com o aquífero Barreiras no aquífero Marajó no período mais chuvoso. A utilização da geoquímica isotópica do estrôncio e da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  associada à hidrogeoquímica para modelagem de mistura de água mostrou-se uma ferramenta eficaz ao apresentarem resultados que concordam um com o outro.

**Palavras-chave:** razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ; mistura de águas subterrâneas; hidrogeoquímica; isótopos de estrôncio.

## ABSTRACT

The two main aquifer systems used for consumption and supply in the metropolitan region of Belém-PA (RMB) are the Barreiras and Marajó aquifers, the latter was previously called Pirabas. Within the regional geological context, the interpretation of the existence of the Eastern Edge of the Marajó Basin and the Marajó Formation in the RMB brought interesting discussions that can contribute to greater detail and understanding of the local hydrogeology. As well as assisting in the interpretation and integration of similar works previously developed. Since previous work has demonstrated distinct behaviors of strontium isotopic geochemistry. In this way, this work addresses this topic by bringing together previous and current information and discussing new propositions. To this end, hydrogeochemical characterization and isotopic geochemical characterization of strontium were carried out in the Barreiras and Marajó aquifers in the municipalities of Benevides, Marituba and Santa Izabel. The main objective was to understand the seasonal dynamics of interaction between the Barreiras and Marajó aquifer systems, identifying the meteoric water recharge processes and the mixing proportions between the Barreiras and Marajó aquifers. Groundwater samples were collected in 15 wells, 09 from the Barreiras aquifer and 06 from the Marajó aquifer in the municipalities of Marituba, Benevides and Santa Izabel do Pará in the RMB. Sampling took place during 2013, bimonthly, covering the annual hydrological cycle and the seasonality of the rainiest (December-May) and least rainy (June-November) periods. The analyzes of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic ratio in groundwater samples were carried out at the Isotopic Geology Laboratory of the Institute of Geosciences (PARÁ-ISO) using the High Resolution Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICP-MS, Neptune) according to the methodology proposed by Bordalo *et al.* in 2007. The hydrochemical analyzes were reproduced in accordance with the standard methodologies for water analysis of the American Public Health Association, APHA of 1995 and the National Water Agency of 2011 in the Hydrochemistry Laboratory of the Institute of Geosciences. For total iron, the determination was through spectrophotometry. The 1964 Grasshoff method was used for silica analysis. Using liquid chromatography, the main cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ) and anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) were determined using the DIONEX DX-120 ion chromatograph. The Barreiras aquifer presented high concentrations of nitrate associated with free aquifers, acidic pH and sodium chloride facies with an  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic ratio that is more radiogenic in the less rainy period,

similar to continental rocks and less radiogenic, similar to meteoric waters in the rainier period, suggesting the influence of the processes recharge. The Marajó aquifer presented confined behavior, neutral pH and calcium bicarbonate facies with some differences in the ion signature compared to the Pirabas aquifer. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of the Marajó aquifer were less radiogenic and similar to macrofossils from the Pirabas Formation. It also showed small variations in isotopic ratios in both seasonal periods, which suggest a greater mixing ratio with the Barreiras aquifer in the rainiest period. The modeling results estimate that there is a greater contribution of meteoric water in the rainiest period in the Barreiras aquifer. Just as there is a greater proportion of mixing with the Barreiras aquifer in the Marajó aquifer in the rainiest period. The use of strontium isotopic geochemistry and the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio associated with hydrogeochemistry for water mixing modeling proved to be an effective tool by presenting results that agree with each other.

Keywords: ratio  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ; mixing of groundwater; hydrogeochemistry; strontium isotopes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Mapa da Geologia das Unidades Litoestratigráficas: Coberturas Cenozoicas Superficiais da Região Metropolitana de Belém-PA, Brasil .....	1
Figura 02 - Mapa de localização da área de estudo .....	3
Figura 03 - Mapa de localização dos pontos de coleta de água subterrânea .....	7
Figura 04 - Mapa de localização da bacia do Marajó .....	13
Figura 05 - Unidades Litoestratigráficas na bacia do Marajó e Plataforma Bragantina .....	14
Figura 06 - Estruturas paleógenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Sequência Pirabas- Barreiras .....	24
Figura 07 - Estruturas quaternárias: Surgimento de várias estruturas romboédricas transtensivas controladas por falhas transcorrentes dextrais E-W, normais NW-SE reativadas, transcorrentes dextrais NE-SW e falhas normais N- S .....	25
Figura 08 - Diagrama de <i>Piper</i> dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período menos chuvoso .....	29
Figura 09 - Diagrama de <i>Piper</i> dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso .....	29
Figura 10 - Diagrama de <i>Durov</i> dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período menos chuvoso .....	30
Figura 11 - Diagrama de <i>Durov</i> dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso .....	30
Figura 12 - Gráfico da variação sazonal e espacial do pH nas águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras e Marajó .....	31
Figura 13 - Gráfico da variação sazonal e espacial da condutividade nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	32
Figura 14 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de STD nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	34
Figura 15 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de ferro total nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	35
Figura 16 - Gráfico da variação sazonal e espacial da concentração de sílica nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	36

Figura 17 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de bicarbonato nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	37
Figura 18 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cloreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	38
Figura 19 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cloreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	39
Figura 20 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de sulfato nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	41
Figura 21 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de sódio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	42
Figura 22 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de magnésio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	43
Figura 23 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de potássio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	44
Figura 24 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cálcio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	46
Figura 25 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de estrôncio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	47
Figura 26 - Gráfico da variação sazonal das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras e membros finais da rocha da Formação Barreiras, água meteórica e macro fósil da Formação Pirabas .....	49
Figura 27 - Gráfico <i>Box-Plot</i> da variação das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras .....	50
Figura 28 - Gráfico <i>Box-Plot</i> da variação sazonal das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas águas subterrâneas no aquíferos Marajó .....	51
Figura 29 - Diagrama de mistura da razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ contra o inverso da concentração de estrôncio ( $1/\text{Sr}$ ) dos aquíferos Marajó, Barreiras e Pirabas nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso .....	52
Figura 30 - Variação sazonal e espacial da razão isotópica do estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) nas águas subterrâneas de aquíferos rasos e profundos no Nordeste do Pará .....	54
Figura 31 - Gráfico da análise discriminante dos aquíferos Barreiras, Marajó, Pirabas, <i>Background</i> do Pirabas e água meteórica .....	57

Figura 32 - Gráfico da análise de componentes principais com os pontos plotados e agrupados em cada aquífero Barreiras, Marajó, Pirabas, Background do Pirabas e água meteórica .....	60
Figura 33 - Gráfico da análise de componentes principais com as variáveis plotadas .....	61
Figura 34 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Barreiras a partir da recarga das águas meteóricas nos períodos menos e mais chuvoso .....	62
Figura 35 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó a partir da recarga do aquífero Barreiras nos períodos menos e mais chuvoso .....	63
Figura 36 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó a partir da mistura com o aquífero Barreiras no período menos chuvoso .....	63
Figura 37 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó, a partir da mistura com o aquífero Barreiras no período mais chuvoso .....	64
Figura 38 - Diagrama de Schoeller dos aquíferos Marajó e Barreiras no período menos chuvoso .....	65
Figura 39 - Diagrama de Schoeller dos aquíferos Marajó e Barreiras no período mais chuvoso .....	66

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 - Informações demográficas e territoriais municipais da área de estudo .....	3
Tabela 02 - Assinatura isotópica de diversos materiais e ambientes geológicos, segundo diversos autores .....	22
Tabela 03 - Parâmetros químicos e físico-químicos dos aquíferos Barreiras e Marajó no período menos chuvoso .....	27
Tabela 04 - Parâmetros químicos e físico-químicos dos aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso .....	28
Tabela 05 - Concentrações de estrôncio em mg/L e razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nos aquíferos Barreiras e Marajó nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso .....	48
Tabela 06 - Matriz de correlação de <i>Spearman</i> do aquífero Barreiras nos períodos menos e mais chuvoso .....	55
Tabela 07 - Matriz de correlação de <i>Spearman</i> do aquíferos Marajó nos períodos menos e mais chuvoso .....	56
Tabela 08 - Classificação da Análise Discriminante dos aquíferos Barreiras, Marajó, Pirabas e água meteórica nos períodos menos e mais chuvoso .....	58
Tabela 09 - Parâmetros resultantes da Análise de Componentes Principais .....	60
Tabela 10 - Contribuição do coeficiente de correlação de cada variável da Análise de Componentes Principais nas duas principais componentes .....	61
Tabela 11 - Proporção de mistura de águas nos aquíferos Barreiras e Marajó .....	62
Tabela 12 - Membros finais e resultados da modelagem hidrogeoquímica de mistura dos aquíferos Barreiras e Marajó .....	66

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 ÁREA DE ESTUDO .....	2
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>6</b>
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.2 AMOSTRAGEM .....	6
3.3 ANÁLISE ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO .....	7
3.4 ANÁLISES HIDROGEOQUÍMICAS .....	8
<b>3.4.1 Parâmetros Físico-Químicos</b> .....	<b>8</b>
<b>3.4.2 Análises Hidroquímicas</b> .....	<b>8</b>
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	8
3.6 GEOPROCESSAMENTO .....	9
3.6 MODELAGEM DE MISTURA ENTRE OS AQUÍFEROS .....	9
<b>3.6.1 Modelagem De Mistura Utilizando A Geoquímica Isotópica Do Sr</b> .....	<b>9</b>
<b>3.6.2 Modelagem De Mistura Utilizando A Hidrogeoquímica</b> .....	<b>11</b>
<b>4. GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	<b>13</b>
4.1 BACIA DO MARAJÓ .....	13
4.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS .....	13
<b>4.2.1 Formação Marajó</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2.2 Formação Pirabas</b> .....	<b>15</b>
<b>4.2.3 Formação Barreiras</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2.4 Unidade Pós-Barreiras</b> .....	<b>17</b>
4.3 HIDROGEOLOGIA .....	17
<b>4.3.1 Sistema Aquífero Barreiras</b> .....	<b>18</b>

4.3.2 Sistema Aquífero Marajó .....	19
4.4 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO E SUA IMPORTÂNCIA NA IDENTIFICAÇÃO DE MISTURAS EM ÁGUAS .....	20
4.5 CONFIGURAÇÃO NEOTECTÔNICA .....	23
4.5.1 Mioceno-Plioceno .....	23
4.5.2 Plioceno-Holoceno .....	24
<b>5. RESULTADOS</b> .....	26
5.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA .....	26
5.1.1 Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	31
5.1.2 Condutividade Elétrica .....	32
5.1.3 Sólidos Totais Dissolvidos (STD) .....	33
5.1.4 Ferro Total .....	34
5.1.5 Sílica .....	36
5.1.6 Bicarbonato .....	37
5.1.7 Cloreto .....	38
5.1.8 Nitrato .....	39
5.1.9 Sulfato .....	40
5.1.10 Sódio .....	41
5.1.11 Magnésio .....	42
5.1.12 Potássio .....	44
5.1.13 Cálcio .....	45
5.2 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO .....	46
5.2.1 Estrôncio (Sr) .....	46
5.2.2 Razão Isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	48
5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	55
5.3.1 Correlação de <i>Spearman</i> .....	55
5.3.2 Análise Discriminante .....	57
5.3.3 Análise de Componentes Principais .....	59
5.4 MODELAGEM DE MISTURA ENTRE OS AQUÍFEROS .....	62
5.4.1 Modelagem Utilizando Geoquímica Isotópica do Estrôncio .....	62
5.4.2 Modelagem Utilizando Hidrogeoquímica .....	65
5.5 DISCUSSÃO .....	67
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	72
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

**APÊNDICE A** ..... 79

# 1 INTRODUÇÃO

Os traçadores geoquímicos de proveniência e mistura de águas subterrâneas como os isótopos de estrôncio são um método bem estabelecido (Négrei *et al.* 2004). Este estudo é similar aos outros desenvolvidos na região nordeste do Pará. Bordalo *et al.* (2007) realizou o trabalho pioneiro a utilizar a razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em água subterrânea na zona costeira da Plataforma Bragantina, cujos resultados evidenciaram contribuições marinha e continentais.

Na região metropolitana de Belém, na borda leste da Bacia do Marajó (Fig. 1), anteriormente denominada Plataforma Pará (Nogueira *et al.* 2021), a primeira pesquisa com hidrogeoquímica e a razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  apontou a interação das águas entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas (aqui considerado Marajó), principalmente no período mais chuvoso (Oliveira Filho & Galarza 2013).

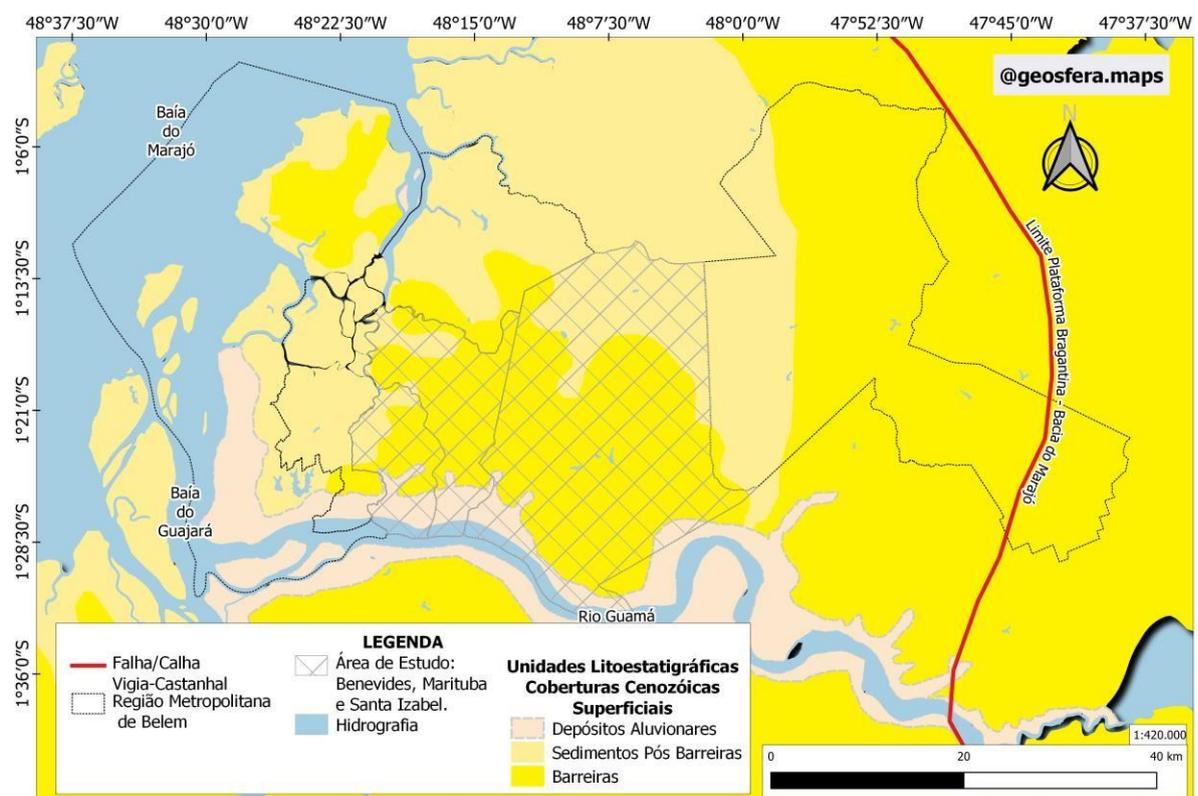


Figura 01 - Mapa da Geologia das Unidades Litoestratigráficas: Coberturas Cenozoicas Superficiais da Região Metropolitana de Belém-PA, Brasil.

Semelhantemente, Silva & Galarza (2017) encontraram no período mais chuvoso indícios de mistura de águas entre os sistemas aquíferos rasos e profundos no limite entre a Plataforma Bragantina e a Borda Leste da Bacia do Marajó. Já Oliveira (2019) realizou estudo na Plataforma Bragantina e os resultados isotópicos têm um padrão diferenciado dos anteriores sugerindo a hipótese de que não ocorra misturas entre os aquíferos nesta área. Assim surge a

necessidade de compreender as diferenças entre os padrões de comportamento da interação e mistura de águas entre os aquíferos citados.

Baseado em diferenças litoestratigráficas Nogueira *et al.* (2021) reinterpretou a anteriormente denominada Formação Pirabas na borda leste da bacia do Marajó como Formação Marajó e restringiu a ocorrência da Formação Pirabas à Plataforma Bragantina. Baseado em dados geofísicos, Santos Júnior (2021) apresentou a análise gravimétrica da área entre a Bacia do Marajó e a Plataforma Bragantina que revelou anomalias gravimétricas negativas interpretadas como fossas que compõem o sistema de grábens do Marajó. De tal forma identifica a fossa Vigia-Castanhal como divisor entre a Plataforma Bragantina e a bacia do Marajó. Adicionalmente, as análises bioestratigráficas e outros dados (Rojas *et al.* 2022), as principais diferenças entre a Formação Pirabas e Marajó são a litologia predominantemente siliciclástica com cimentação carbonática na Fm. Marajó e o conteúdo calcário e fossilífero mais abundantes e diversos na Fm. Pirabas associado ao ambiente deposicional em plataforma marinha rasa. Portanto, esta pesquisa interpreta os aquíferos profundos da borda leste da Bacia do Marajó como aquífero Marajó (Imbiriba Júnior *et al.* 2021).

### 1.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa abrange três municípios da RMB: Benevides, Marituba e Santa Izabel do Pará (Figura 02). Estes municípios integram parte da área de conurbação do município de Belém e situam-se na região periférica. Juntamente aos municípios de Belém, Ananindeua, Castanhal e Santa Bárbara do Pará, os sete municípios compõem a RMB (Pará 1995, 2011). De acordo com informações do IBGE, os dados de população estimada em 2021, no censo de 2010, área territorial, densidade demográfica, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e a porcentagem de saneamento adequado de cada município estão resumidos na tabela 01 (IBGE 2010, 2020, 2021).

A partir das informações da tabela 01 constata-se que os municípios mais populosos em ordem decrescente são Marituba, seguido da Santa Izabel e Benevides com o menor em número de habitantes. Em relação a extensão da área territorial Marituba detém maior área seguido de Benevides e Santa Izabel possui a menor área. Quanto a densidade Marituba também apresenta maior densidade demográfica, IDHM e porcentagem de saneamento. Em segundo lugar Benevides e Santa Izabel apresenta menores densidade demográfica, IDHM e porcentagem de saneamento. Concernente ao desenvolvimento humano o IDHM na escala quanto mais próximo de 1 maior o desenvolvimento, apresenta médio desenvolvimento nas três cidades, cuja escala média varia de 0,6 a 0,7. No entanto, referente ao saneamento as

porcentagens indiciam condições precárias com menos de 20 % de saneamento adequado em cada um dos municípios.

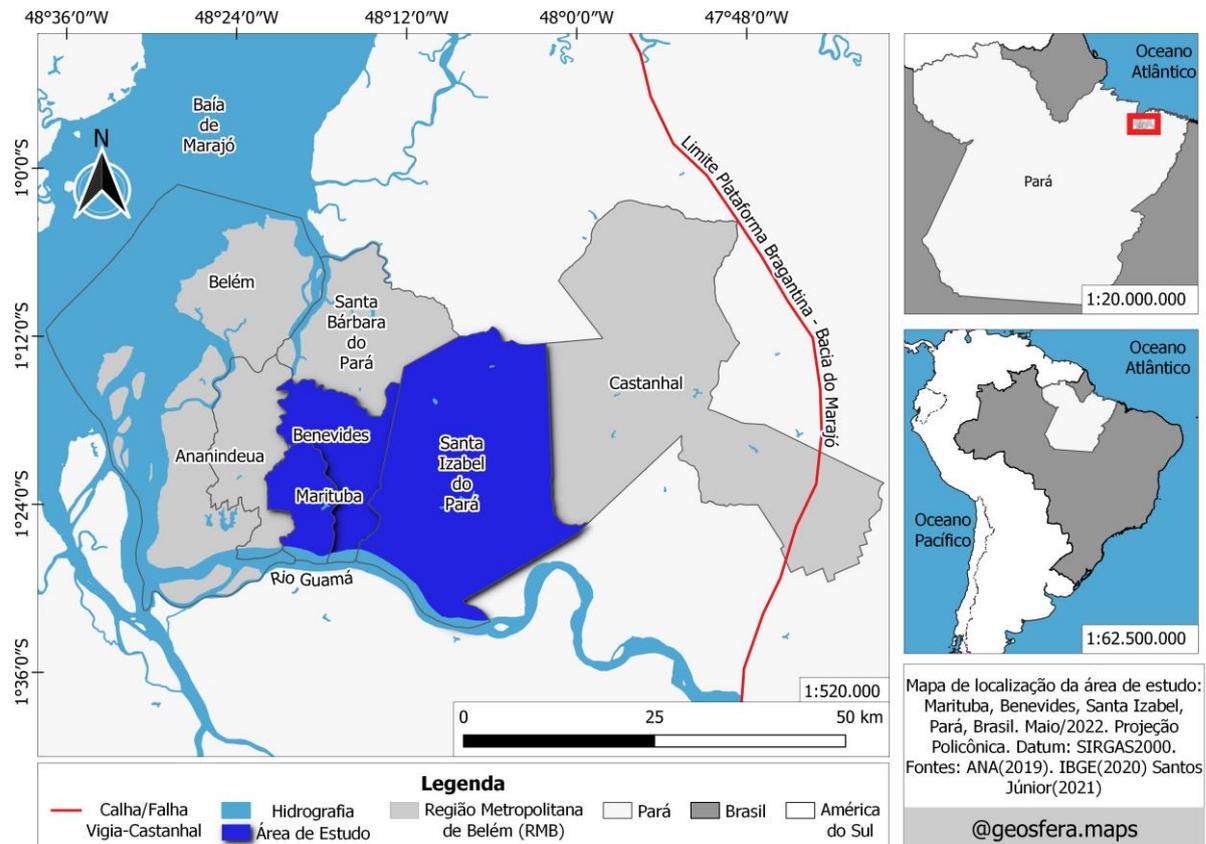


Figura 02 - Mapa de localização da área de estudo.

Tabela 01 - Informações demográficas e territoriais municipais da área de estudo.

	Marituba	Benevides	Santa Izabel do Pará
<b>População Estimada - 2021</b>	135.812 habitantes	64.780 habitantes	72.856 habitantes
<b>População Censo - 2010</b>	108.246 habitantes	51.651 habitantes	59.466 habitantes
<b>Área Territorial - 2021</b>	103,214 km <sup>2</sup>	187,826 km <sup>2</sup>	717,662 km <sup>2</sup>
<b>Densidade Demográfica - 2010</b>	1.047,44 hab/km <sup>2</sup>	274,99 hab/km <sup>2</sup>	82,86 hab/km <sup>2</sup>
<b>IDHM – 2010</b>	0,676	0,665	0,659
<b>Saneamento Adequado - 2010</b>	18,8 %	17,4 %	10,7 %

Fonte: (IBGE 2010, 2021).

A região metropolitana de Belém-PA, situa-se no domínio de clima equatorial úmido, tipo Af, segundo a classificação de Köppen. As médias anuais dos parâmetros climáticos de temperatura é 26,4° C, precipitação pluvial anual é entre 3.000 a 4.000 mm, umidade do ar de 84%, evaporação total de 771,6 mm, e insolação total de 2.219,8h (Bastos *et al.* 2002, Alvares *et al.* 2013).

A pluviosidade ocorre durante todos os meses do ano. Especificamente há uma variação mensal na frequência diária e intensidade pluvial. Enquanto algumas regiões do país

têm estações características denominadas estação chuvosa e estação seca, na RMB denomina-se o período mais chuvoso de Dezembro a Maio e o período menos chuvoso entre os meses de junho a novembro. Destacam-se os meses com maiores precipitações históricas são fevereiro, março e abril e os com as menores quantidades de precipitação mensal são setembro, outubro e novembro (Costa & Blanco 2018, Lira *et al.* 2020).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Compreender a dinâmica sazonal de interação entre os sistemas aquíferos Barreiras e Marajó com base na caracterização isotópica de Sr e hidrogeoquímica nos municípios Benevides, Marituba e Santa Izabel, Pará, Brasil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar qualidade hidro(geo)química dos sistemas aquíferos durante o ciclo hidrológico anual.
- Determinar as assinaturas da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó e sua variação sazonal.
- Integrar as informações obtidas com os *backgrounds* da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  para água meteórica, rocha da Formação Barreiras e água subterrânea dos sistemas aquíferos na RMB.
- Interpretar a ocorrência de mistura de águas entre os aquíferos e suas implicações para a vulnerabilidade integrando os dados no contexto geológico.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer do trabalho, realizou-se a contínua consulta a referências bibliográficas sobre novas informações publicadas com implicações diretas na construção e interpretação da pesquisa. Assim, se realizou a leitura e integração de artigos, livros, dissertações, teses, bases cartográficas geológicas e divulgações bibliográficas oficiais que serviram de base teórica e conceitual para elaboração do trabalho. Para tanto, os temas e palavras chaves que guiarão a busca estão relacionados ao contexto geológico regional das formações Barreiras, Marajó e Pirabas, utilização de geoquímica isotópica do estrôncio e hidrogeoquímica como traçador da interação entre as águas subterrâneas e entre sistemas aquíferos.

Uma parte muito importante da revisão bibliográfica foi a compilação dos dados de estrôncio, razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , e todos os parâmetros físico-químicos e químicos (Apêndice A-tabela 13). Os trabalhos que foram compilados são os três principais anteriormente realizados que são similares a esta pesquisa (Oliveira Filho 2012, Silva 2017, Oliveira 2019). Estes dados são de suma importância para as análises estatísticas com o objetivo de diferenciar os tipos de água e aquíferos. Igualmente, a compilação dos dados foi crucial para a modelagem de mistura entre os aquíferos, tanto a utilizar a modelagem hidrogeoquímica quanto a modelagem da geoquímica isotópica do Sr (concentração de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). (Ver no Apêndice A).

É necessário enfatizar que a interpretação da geologia regional adotada neste trabalho trata os aquíferos Marajó e Pirabas como diferentes em razão das diferenças expostas entre as respectivas formações geológicas. Anteriormente, e ainda segundo a interpretação de outros autores mais antigos na literatura, os aquíferos Marajó e Pirabas são o mesmo. Portanto, o foco de compilar e adicionar dados sobre a Formação Pirabas é para a comparação e entendimento das semelhanças e diferenças evidenciadas na hidrogeoquímica e geoquímica isotópica do estrôncio que serão apresentadas e discutidas ao longo da dissertação.

#### 3.2 AMOSTRAGEM

A água subterrânea foi coletada em 09 amostras de poços rasos do Sistema Aquífero Barreiras e 06 amostras de poços profundos do Sistema Aquífero Marajó, as coletas foram realizadas a cada dois meses no ano de 2013 (Figura 03). As amostras destinadas para análise química dos principais íons e análise isotópica de Sr foram filtradas com filtros de Marca

Millipore de 0,45  $\mu\text{m}$ , acidificadas com  $\text{HNO}_3$ -bidestilado a pH em torno de 2 e estocadas em garrafas de polietileno de 1000 mL refrigeradas (Négrei *et al.* 2005, Bordalo *et al.* 2007).

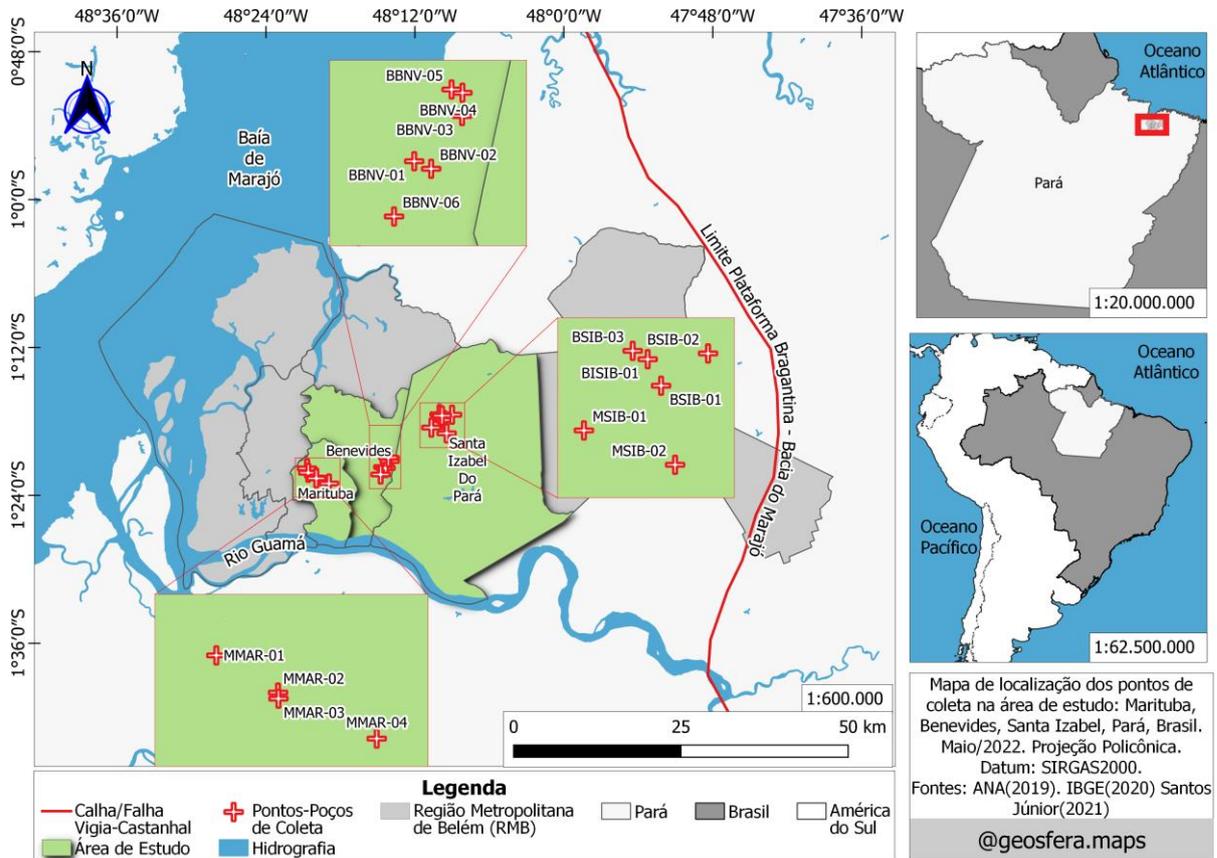


Figura 03 - Mapa de localização dos pontos de coleta de água subterrânea do aquífero Barreiras (Barreiras em Benevides: BBNV-01, BBNV-02, BBNV-03, BBNV-04, BBNV-05, BBNV-06; Barreiras em Santa Isabel: BSIB-01, BSIB-02, BSIB-03) e do aquífero Marajó (Marajó em Marituba: MMAR-01, MMAR-02, MMAR-03, MMAR-04; Marajó em Santa Isabel: MSIB-01, MSIB-02).

### 3.3 ANÁLISE ISOTÓPICA DE ESTRÔNCIO

Baseando-se na metodologia implantada no Laboratório de Geologia Isotópica por Bordalo *et al.* (2007) para determinação da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em águas, evaporou-se 500 ml de amostra quando de proveniência do aquífero Barreiras, 200 ml de amostra quando de proveniência do aquífero Pirabas (devido à diferença da quantidade de estrôncio dissolvido na amostra), além de uma amostra de 500 ml de água da chuva, coletada no período chuvoso. Posteriormente, todas as amostras foram solubilizadas com 1 mL de  $\text{HNO}_3$ -bidestilada 3,5 mol/L, para separação cromatográfica do Sr com resina Sr.spec. A seguir, adiciona-se a cada amostra 1,2 mL de  $\text{HNO}_3$ \*\*\* concentrado (3%), e levadas para análises num espectrômetro de massa (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* – ICP-MS, Modelo Neptune), onde foram feitas as leituras das amostras.

As razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  foram normalizadas para  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$  e o fracionamento de

massa foi corrigido no modo exponencial. A concentração de Estrôncio das amostras foi determinada através da mistura com traçador de Sr ( $^{86}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,054998$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,021387$ ;  $^{88}\text{Sr}/^{84}\text{Sr} = 0,165433$ ). Para a precisão analítica utilizou-se o padrão SRM-987 (Solução Neptune) que forneceu uma média  $0,710272 \pm 0,000020$  (média de 38 leituras) para a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e os brancos totais de Sr ficaram em torno de 3,50 ng.

### 3.4 ANÁLISES HIDROGEOQUÍMICAS

#### 3.4.1 Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos de temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos foram determinados *in situ* com a utilização de sonda multiparamétrica.

#### 3.4.2 Análises Hidroquímicas

As análises hidroquímicas foram reproduzidas de acordo com as metodologias da APHA (1995) e ANA (2011). Para o ferro total a determinação foi por meio da espectrofotometria. O método de Grasshoff (1964) foi utilizado para análise da sílica.

A determinação da análise de alcalinidade foi realizada por titulometria adicionando indicador metilorange, fenolftaleína e agente titulante ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Em relação ao bicarbonato seus valores foram calculados a partir do produto dos valores numéricos da alcalinidade total, em mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , pela constante 1,22 (Custódio & Llamas 1976).

Por meio da cromatografia líquida foram determinados principais cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) com utilização do cromatógrafo de íons DIONEX DX-120.

### 3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram organizados, utilizados na modelagem, criação de gráficos e diagramas, tabelas e mapas com a utilização dos *softwares*: *Microsoft Excel*, *Calc Libreoffice*, *Statistica 7*, *Aquachem – Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting version 9 (2011)*, *Paleontological Statistics (Past 4.03)* e *QGIS 3.16*. As análises de correlação, análise de componentes principais e análise discriminante foram todas realizadas no programa *Paleontological Statistics (Past 4.03)*.

Com o objetivo de guiar a escolha dos testes mais adequados aos objetivos optou-se pelo teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* com nível de significância menor do que 5% (p-valor ou  $\alpha < 0,05$ ) para todos os dados, os quais apresentaram distribuição normal com p-

$valor > 0,05$  e distribuição não-normal com  $p\text{-valor} < 0,05$ . De tal forma, para verificar a diferença estatisticamente significativa entre os dois períodos sazonais dentro do mesmo aquífero e a diferença estatisticamente significativa de uma variável entre os dois aquíferos no mesmo período sazonal optou-se pela análise de variância (ANOVA com nível de significância menor do que 5% ( $p\text{-valor}$  ou  $\alpha < 0,05$ )) para dados com distribuição normal e teste de *Kruskal-Wallis* (com nível de significância menor do que 5% ( $p\text{-valor}$  ou  $\alpha < 0,05$ )) para dados com distribuição não normal. Bem como, a medida de tendência central que melhor representa dados com distribuição não paramétrica é a mediana. Esta é a razão pela qual alguns parâmetros apresentam a mediana e outros não, isto é, as variáveis químicas e físico-químicas em cada um dos aquíferos que apresentou distribuição não normal foram representados pela média e mediana nos resultados.

### 3.6 GEOPROCESSAMENTO

Com o objetivo de analisar a distribuição espacial da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  foram realizadas etapas de geoprocessamento para geração de mapas geoestatísticos que demonstram o padrão visual de variação espacial da razão isotópica. As etapas de geoprocessamento consistiram na inserção dos dados de coordenadas geográficas coletadas neste trabalho juntamente àquelas compiladas dos trabalhos anteriores. E associado a cada ponto amostral (poço) foram adicionados os valores dos respectivos parâmetros (razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) para geração dos mapas de distribuição geoestatística.

Os softwares utilizados foram: o *Calc Libre Office* para planilhamento e tabulação dos dados; o *QuantumGis* (QGIS versão 3.16.11) para criação das camadas vetoriais de pontos que representam os poços; o *ArcGIS PRO* para realização da *krigagem* ordinária simples e exportação em formato *raster* georreferenciado; novamente o QGIS foi utilizado para vetorização e organização visual das camadas de *krigagem*, e confecção dos mapas.

### 3.6 MODELAGEM DE MISTURA ENTRE OS AQUÍFEROS

#### 3.6.1 Modelagem De Mistura Utilizando A Geoquímica Isotópica Do Sr

Resumidamente, a modelagem realizada com o Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  consiste analisar a distribuição dos dados no diagrama de mistura da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  contra o inverso da concentração (Faure 1986), identificar os membros finais (concentração de Sr e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) e os padrões de mistura entre tais membros. Depois de selecionados os membros finais utiliza-se a

Equação (1) de mistura binária do diagrama de mistura da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  contra o inverso da concentração de estrôncio ( $1/\text{Sr}$ ) para calcular a proporção de mistura entre dois reservatórios (Faure 1986).

**Equação 1.** Equação de mistura binária do diagrama de mistura da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  contra o inverso da concentração de estrôncio ( $1/\text{Sr}$ ).

$$\left([\text{Sr}]_{\text{obs}} \cdot \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}_{\text{obs}}\right) = \left([\text{Sr}]_A \cdot \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}_A \cdot f_A\right) + \left([\text{Sr}]_B \cdot \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}_B \cdot f_B\right) \quad (1)$$

Para cada amostra observada (obs), o produto da sua concentração de estrôncio pela sua razão isotópica é igual a: soma do produto da concentração de estrôncio pelos respectivos fatores de concentração e razões isotópicas dos membros finais A e B, no qual a soma de  $f_A$  e  $f_B$  resulta em 1.

Ao considerar a limitação binária é necessário sistematizar o modelo de mistura. Portanto, considera-se simplificada o modelo litoestratigráfico e o fluxo vertical da água. De tal forma, propõe-se que o processo de recarga ocorra a partir da entrada de água meteórica no aquífero Barreiras. E a partir do aquífero Barreiras há a interação e mistura de águas com o aquífero sotoposto Marajó.

As proporções de mistura dos pontos deste trabalho e daqueles pontos compilados dos valores regionais foram calculados em três cenários. Enfatiza-se que os três cenários foram necessários para calcular os valores pontuais de todas as amostras. Para que os resultados obtidos fossem o mais próximos da realidade e apresentem um significado coerente dentro do contexto geoquímico e hidrogeológico de acordo com dados disponíveis.

As concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  anômalas (*outliers*) do aquífero Barreiras podem ser considerados valores extremos naturalmente presentes na formação continental que geralmente é mais radiogênica, fato que é evidenciado por valores de razões isotópicas similares em rochas da Formação Barreiras (Oliveira Filho 2012, Moizinho *et al.* 2021). No entanto, ao analisar a distribuição não-paramétrica das concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com valores anômalos do aquífero Barreiras, também é possível explicar isto considerando a característica livre à semiconfinada do aquífero, também evidenciado pelos valores anômalos de cloreto e nitrato que evidenciam a vulnerabilidade do aquífero. Desta forma, não se descarta a possibilidade de uma contaminação antrópica influenciar a ocorrência dos valores anômalos na geoquímica isotópica do Sr (Bakari *et al.* 2013).

Logo, ao considerar as hipóteses expostas no parágrafo anterior, os três cenários em que a modelagem foi realizada apresentam os respectivos critérios.

- Primeiro cenário: inclusão das concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com valores anômalos possivelmente naturais na seleção do membro final do aquífero Barreiras (Apêndice A - tabela 14).
- Segundo cenário: Exclusão das concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com valores

anômalos para seleção do membro final do aquífero Barreiras (Apêndice A - tabela 15).

- Terceiro cenário: A partir do segundo cenário, foram também excluídos da seleção do membro final do aquífero Barreiras: as concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das amostras com concentrações de cloreto e nitrato com valores superiores àqueles considerados para uma possível contaminação ( $\text{NO}_3^- \geq 5 \text{ mg/L}$ ;  $\text{Cl}^- \geq 15 \text{ mg/L}$ ) de acordo com Teramoto *et al.* (2021) (Apêndice A – tabela 16).

### 3.6.2 Modelagem De Mistura Utilizando A Hidrogeoquímica

A modelagem de mistura utilizando as ferramentas da hidrogeoquímica é clássica e consiste basicamente de avaliar no diagrama de *Schoeller* a assinatura iônica dos principais cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) que estão dissolvidos na água. E a partir desta análise prévia há a seleção dos membros finais que representam dois reservatórios (aquíferos) que apresentam assinaturas típicas de cada aquífero.

Após identificar cada membro final o próximo passo é a estimativa da porcentagem de mistura entre os dois membros finais para obtenção da assinatura típica esperada para a amostra. Esta estimativa é geralmente calculada empiricamente até que a assinatura típica resultante corresponda àquela que se busca. O cálculo consiste basicamente em calcular a porcentagem de contribuição para cada íon de um membro final A e somar com a porcentagem de contribuição para cada íon do outro membro final B para obter a mistura entre as duas.

**Equação 2.** Equação de mistura binária do diagrama de *Schoeller* para o sódio

$$\% \text{ Mistura } (\text{Na}^+) = \% \text{ A} * (\text{Na}^+)_{\text{A}} + \% \text{ B} * (\text{Na}^+)_{\text{B}} \quad (2)$$

%A: porcentagem de contribuição do membro final A;  $(\text{Na}^+)_{\text{A}}$  concentração de sódio do membro final A;

%B: porcentagem de contribuição do membro final B;  $(\text{Na}^+)_{\text{B}}$  concentração de sódio do membro final.

Desta forma, calcula-se a contribuição para cada um dos outros íons ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), compila-se o resultado de cada íon e adiciona-se a assinatura iônica da mistura no diagrama de *Schoeller*. Os valores dos membros finais obtidos na modelagem estão apresentados junto com os resultados.

Como forma de comparar o resultado da modelagem geoquímica isotópica do Sr, os valores obtidos foram também testados na modelagem hidrogeoquímica do diagrama de *Schoeller*. De tal forma, foram calculadas na modelagem hidrogeoquímica as proporções de mistura do respectivo cenário mais adequado para cada aquífero que foram obtidas na

modelagem geoquímica isotópica. Além disso, também foi adicionada para comparação a modelagem anteriormente proposta nos trabalhos prévios.

## 4. GEOLOGIA REGIONAL

### 4.1 BACIA DO MARAJÓ

A Bacia do Marajó (Marajó Basin, Figura 04) também referida como Sistema de Grabens do Marajó situa-se entre os limites da Plataforma Bragantina a Leste, da Bacia do Amazonas a Oeste, da foz do Amazonas ao Norte e ao Sudeste pela Bacia do Parnaíba. A área de estudo desta pesquisa está situada no extremo leste do Graben do Marajó (Destacado no ponto vermelho na figura 04), próximo ao limite da falha normal Vigia-Castanhal que separa o Graben da Plataforma Bragantina (Zálan & Matsuda 2007, Moizinho *et al.* 2022).

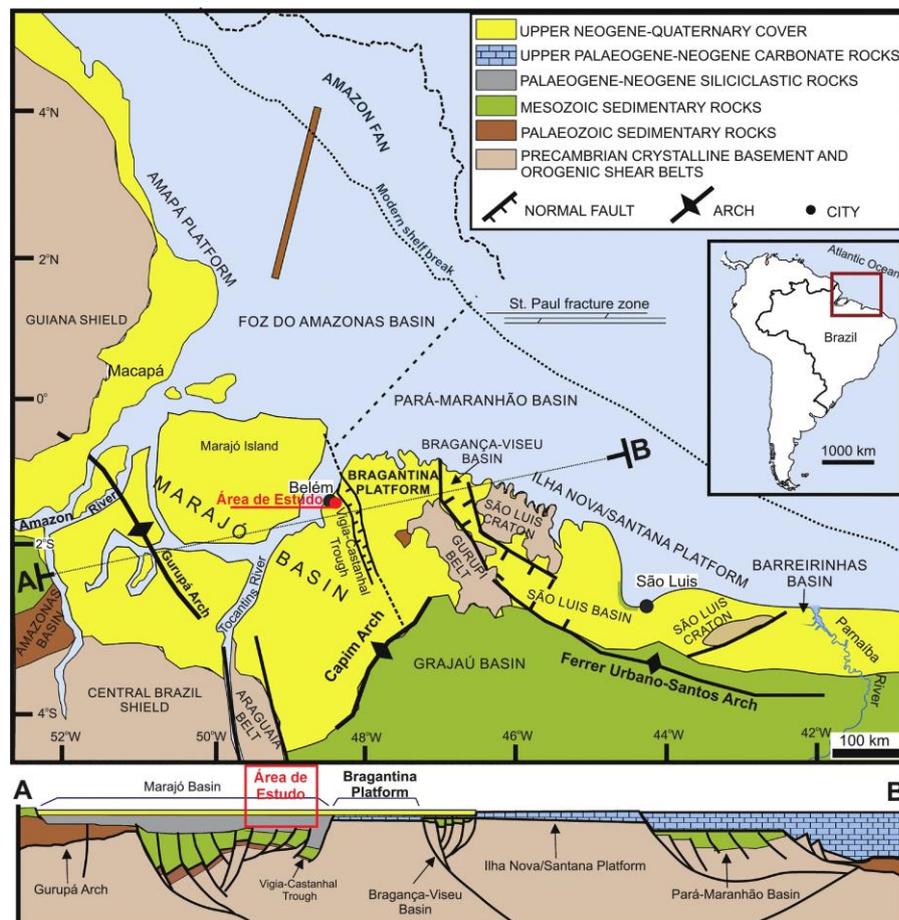


Figura 04 - Mapa de localização da bacia do Marajó, adaptado de Nogueira *et al.* (2021).

### 4.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

É importante ressaltar que as formações geológicas que serão descritas a seguir dentro do contexto geológico da RMB na zona oriental bacia do Marajó apresentam duas principais interpretações.

Tradicionalmente descrito por diversos autores e pelas informações oficiais divulgadas pelas entidades públicas a litoestratigrafia é composta pela Formação Pirabas na base, seguida da Formação Barreiras com alguns afloramentos superficiais e os sedimentos inconsolidados

da Unidade Pós-Barreiras no topo da superfície (ANA 2018, Rossetti *et al.* 1989, Rossetti 2001, Rossetti 2006).

No entanto, estudos recentes (Santos Júnior 2021, Nogueira *et al.* 2021, Imbiriba Junior *et al.* 2021, Moizinho 2021, Moizinho *et al.* 2022) consideram o limite da bacia do Marajó a leste, a falha normal Vigia-Castanhal como o limiar até o qual existe a Formação Pirabas, que está restrita à Plataforma Bragantina. Logo a partir da falha sentido a Oeste para dentro da bacia ocorre a Formação Marajó na qual se localiza a RMB. De tal forma que a Formação Marajó na bacia homônima seria a unidade litoestratigráfica correspondente a Pirabas na Plataforma Bragantina.

#### 4.2.1 Formação Marajó

A Formação Marajó (Figura 05) apresenta seu desenvolvimento durante o período que vai do Eoceno até o Mioceno Inferior. De tal forma, a formação é constituída por folhelhos, arenitos finos a médios, argilitos com porções cimentadas de carbonato e diversos tipos de fósseis (foraminíferos, antozoários, briozoários, moluscos, ostracodes e poríferos). O conteúdo fóssil associado à formação e sedimentos siliciclásticos são interpretados como um ambiente deposicional costeiro de plataforma. Na metade inferior da formação predominam a frequência de sedimentos siliciclásticos, ao passo que a frequência das camadas pelíticas aumenta na metade superior. (Petri 1957, Costa *et al.* 2002, Moizinho 2021).

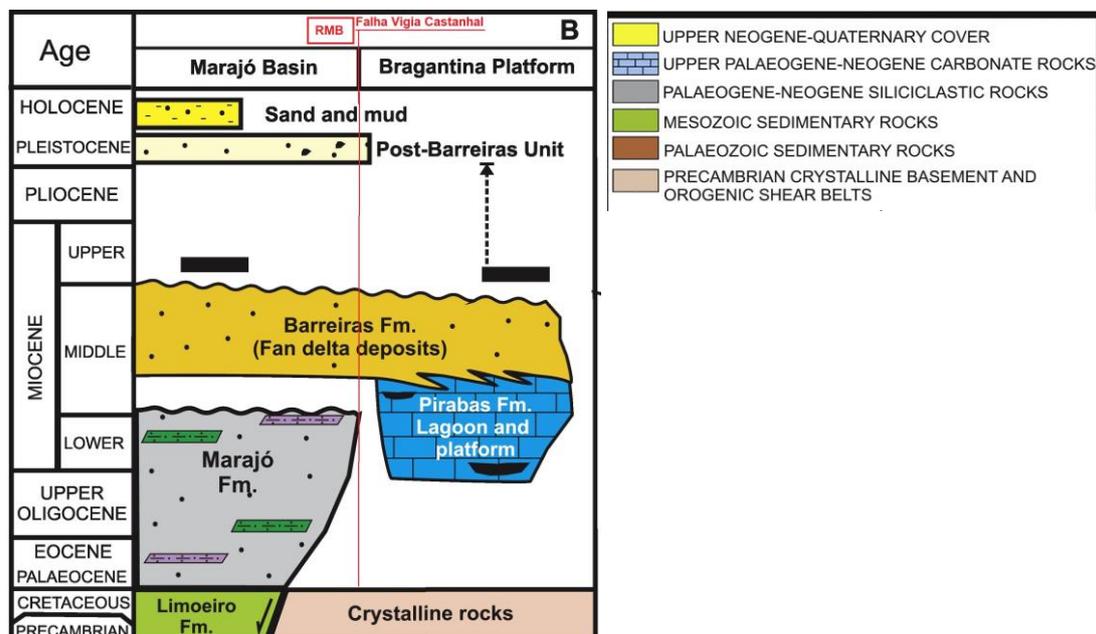


Figura 05 - Unidades Litoestratigráficas na bacia do Marajó e Plataforma Brangantina, adaptado de Nogueira *et al.* (2021).

A Formação Marajó limita-se ao norte com a Bacia da Foz do Amazonas ambiente de plataforma marinha onde ocorre a Formação Amapá. Limita-se a Oeste a formação apresenta

contato interdigitado com depósitos litologicamente similares aos da Bacia do Amazonas (*onshore*). Pertencente ao período do Cretáceo, a Formação Limoeiro está sotoposta a Formação Marajó e apresentam concordâncias nos contatos entre a base e porção superior (Zálan & Matsuda 2007).

Restritamente inserida na Bacia do Marajó, a Formação Marajó apresenta afloramentos na base de falésias costeiras na Ilha de Outeiro, ambiente estuarino localizado a Leste da bacia.

#### **4.2.2 Formação Pirabas**

A Formação Pirabas (Figura 05), requer atenção especial, principalmente porque sua existência era considerada no sistema do Graben do Marajó de acordo com a configuração estratigráfica dos autores que pesquisaram sobre a formação, classificando-a em superior e inferior. Recentemente, no entanto, os resultados de revisões e análises estratigráficas levaram a proposta de que a Formação Pirabas não se situa no Graben de Marajó. Portanto a Formação Marajó substitui a Formação Pirabas, iniciando a partir da Bacia do Marajó após a Plataforma Bragantina, cujo limiar é a falha Vigia-Castanhal (Santos Júnior 2021).

As rochas da Formação Pirabas sobrepõem uma camada de rochas descontínua não descrita na litologia que sobrepõem as rochas do basamento cristalino Pré-Cambriano na Plataforma Bragantina. Ao passo que na Bacia do Marajó a Formação homônima repousa sobre a Formação Limoeiro (Nogueira *et al.* 2021).

A Formação Pirabas contém registros paleontológicos marinhos referente a Era Cenozoica, cujos afloramentos são descontínuos ao longo do Maranhão, Pará e Piauí. Conforme Antonioli *et al.* (2015) e Góes *et al.* (1990) a deposição da formação composta por vários tipos de calcários ocorreu no intervalo Oligoceno Superior – Mioceno Inferior, em um paleoambiente caracterizado por águas salinas tipicamente marinhas de rasa profundidade e temperatura equatoriais.

Em relação a composição das fácies é necessário considerar o ambiente deposicional. Por exemplo, o ambiente caracterizado por movimentação e concentração salina característica de mar aberto e temperaturas equatoriais apresenta a fácies Castelo, cuja composição litológica inclui diversos tipos de calcários duros: coquinas, biohermitos, micritos e dolomicritos. A fácies Castelo integra a base da Formação Pirabas (Góes *et al.* 1990).

A segunda fácies estratigráfica, intermediária, é a Capanema é proveniente de ambiente de deposição estuarinos, lacustres, cuja agitação das águas e salinidade é menor em

relação a marinha. E sua composição litológica inclui folhelhos rítmicos, margas (calcários argilosos), arenitos calcíferos, micritos e biomicritos (Góes *et al.* 1990).

A fácies de topo é chamada Baunilha Grande corresponde ao ambiente deposicional de mangue com condições redutoras. Cujas composição litológica é de argilas escuras com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros com fragmentos de crustáceos branquimes (Góes *et al.* 1990).

A Formação Pirabas na Plataforma Bragantina, assim como a Formação Marajó na Bacia Homônima, ambas as formações estão discordantemente sob a Formação Barreiras. A Formação Pirabas está sobreposta em seu limite inferior discordantemente ao embasamento cristalino e rochas cretácicas (Rossetti 2001).

#### **4.2.3 Formação Barreiras**

A formação Barreiras (Figura 05) caracteriza considerável parte das coberturas superficiais da Era Cenozoica que afloram em grande parte do nordeste paraense. Em específico na área de estudo desta pesquisa. Juntamente a ocorrência da mesma formação distribuída ao longo do litoral norte do Brasil até o estado do Rio de Janeiro denominam-se também como Grupo Barreiras. Em relação a área da bacia do marajó a sua deposição é registrada como ocorrendo durante o Mioceno médio. E o paleoambiente de deposição é atribuído a ambiente transicional fluvial a estuarino. Embora bastante dispersos encontram-se muitos icnofósseis associados às fácies (Rossetti 2006, 1990).

De acordo com Góes *et al.* (1990) a Formação Pirabas encontra-se sotoposta pela Formação Barreiras de modo discordante, cujo contato entre as formações ocorre gradual e interdigitadamente. Reitera-se que esta configuração estratigráfica Pirabas-Barreiras agora é restrita a Plataforma Bragantina e na área da bacia do Marajó a Formação Barreiras sobrepõe a Formação Marajó. Segundo Rossetti (2006) a genética da Formação Barreiras durante a evolução miocênica caracteriza-se uma única sequência deposicional litoestratigráfica siliciclástica que sucede gradualmente a anterior caracterizada pela sequência litoestratigráfica carbonática-siliciclástica (contato intermediário) e a sequência litoestratigráfica carbonática (Formação Pirabas).

Como já mencionado, a Formação Barreiras é formada por sedimentos siliciclásticos: argilitos cinza-escuros, siltitos, arenitos quartzosos, heterolíticos e conglomerados polimíticos com variegações de areia e argila cujas cores são desde tons brancos até avermelhados. De acordo com o trabalho de Rossetti *et al.* (1989) a Formação Barreiras apresenta as seguintes fácies litológicas: argilosa com laminação plano paralela (AI), argilosa maciça (Am); arenosa

sem estruturação aparente (Sm); arenosa com estratificação cruzada acanalada (Sa); arenosa com ondulações cavalgantes ascendentes (SC); arenosa grossa e conglomeráticas (SG); conglomeráticas (Cg); conglomerática com seixos de argilas (CA); blocos de arenitos ferruginosos intercalados com seixos de quartzos (BS), arenosa com estratificação sigmoidal (Ss), arenosa com estratificação cruzada tabular (St) e areno-argilosa, geralmente maciça (AA). Embora bastante dispersos encontram-se muitos icnofósseis associados às fácies (Rosseti 2006)

#### 4.2.4 Unidade Pós Barreiras

A Formação Barreiras é sotoposta pela unidade Pós-Barreiras (Figura 05), cuja composição é de sedimentos inconsolidados arenosos e argilosos com granulometria de fina a média, e a coloração apresenta desde tons amarelados, creme-amarelados, a totalmente branca. A unidade não demonstra estrutura sedimentar bem definida, no entanto, algumas estruturas aparentam ser maciças e outras são típicas de deposição de dunas eólicas com espessuras variadas. Registram-se ainda seixos milimétricos de quartzo leitoso dispersos e concreções ferruginosas, bem como sedimentos aluvionares recentes do Holoceno em ambientes deposicionais fluviais como os regionais Igarapés (Matta 2002, Sá 1969, Silva & Lowenstein 1988, Costa *et al.* 1993).

A idade mais antiga a qual se atribui a unidade Pós-Barreiras é a época do Pleistoceno. Na qual a formação da unidade ocorre com desmantelamento e formação *in situ* da Formação Barreiras. Ambas as formações são separadas por um horizonte laterítico imaturo caracterizando uma discordância erosiva (Costa & Horbe 1995, Costa 1991, Rossetti 2001).

### 4.3 HIDROGEOLOGIA

A configuração dos sistemas aquíferos é determinada a partir das características hidráulicas das camadas superior e inferior que compreendem o aquífero. Em primeiro grau de importância a característica determinante é o tamanho dos poros nos sedimentos e rochas. Em segundo grau a ocorrência e organização no interior das camadas permeáveis e impermeáveis. Por último e não menos importante destaca-se a ocorrência de falhas e fraturas que interconectam as camadas do sistema aquífero ou entre dois sistemas (ANA 2018).

De acordo com Matta (2002), na Região Metropolitana de Belém os principais sistemas hidrogeológicos são: Sistema Pós-Barreiras (0 m a 25 m), Sistema Aquífero Barreiras (25 m a 90 m), Sistema Aquífero Pirabas (Pirabas Superior de 90 m a 180 m; e

Pirabas Inferior de 180 m 259 m). Esta configuração dos sistemas hidrogeológicos foram consideradas em quase todos os estudos anteriores dos aquíferos da RMB. Inclusive os estudos similares precursores deste atual como Silva (2015) e Oliveira Filho *et al.* (2018).

No entanto, recentemente o estudo de Imbiriba Júnior *et al.* (2021) propõe uma redefinição hidroestratigráfica em que a Formação Pirabas com depósitos carbonáticos de 120 m de espessura, encontrada abaixo de 50 m de profundidade em subsuperfície está restrita a Plataforma Bragantina, isto é, o aquífero Pirabas ocorre apenas na plataforma. Enquanto na zona oriental da Bacia do Marajó os depósitos siliciclásticos correspondentes constituem a Formação Marajó. A sucessão subsuperficial de 70 m de espessura zona oriental da Bacia do Marajó, anteriormente considerada depósitos siliciclásticos da Formação Barreiras é reinterpretada como a Formação Marajó, que compreende argilitos e arenitos de granulometria fina a grossa. A Formação Barreiras com 20 m de espessura está exposta na zona oriental da Bacia do Marajó e Plataforma Bragantina. A parte superior da Formação Marajó tem 30 m de espessura de leitos de argilitos estuarinos, selando os depósitos marinhos finos de 200 m de espessuras subjacentes com microfósseis representando o intervalo principal para a água potável (Rojas *et al.* 2021).

#### **4.3.1 Sistema Aquífero Barreiras**

O que anteriormente Matta (2002) definiu como Sistema Aquífero Pós-Barreiras com espessura de até 25 m, de acordo com a redefinição hidroestratigráfica de Imbiriba Júnior *et al.* (2021) é referido como o Sistema Aquífero Barreiras com espessura de 20 m. O sistema hidrogeológico contém um horizonte laterítico cuja espessura alcança três metros incluindo sedimentos argilo-arenosos e concreções ferruginosas e aluminosas.

O sistema aquífero Pós-Barreiras (Matta 2002) agora denominado Barreiras (Imbiriba Júnior *et al.* 2021) é definido como o aquífero existente nos perfis de sedimentos e rochas argilo-arenosas inconsolidadas, com profundidade de até 20 m e fraco potencial hidrogeológico com vazão em torno de 5 m<sup>3</sup> /h. Assim, o aquífero é denominado livre a semiconfinado que caracteriza alta vulnerabilidade que possibilita a interação com fossas sépticas, postos de combustíveis, cemitérios, efluentes industriais entre outros. Isto é atestado pelas altas concentrações de formas nitrogenadas, além da alta concentração de ferro que faz com que a água necessite de tratamento (Matta 2002, Cabral 2004, Oliveira *et al.* 2001, Paranhos 2010).

Conforme a natureza livre a semiconfinada a recarga do sistema hidrogeológico é proveniente principalmente da água meteórica. Logo a vulnerabilidade destes reservatórios é

alta devido à profundidade de ocorrência deles, que é inferior a 25 metros,

#### **4.3.2 Sistema Aquífero Marajó**

Conforme a definição de Matta (2002) o Sistema Aquífero Barreiras inicia a partir de 25 m em subsuperfície até 90 metros e o Sistema Aquífero Pirabas de inicia em média de 90 m até o 259 m. De acordo com a redefinição hidroestratigráfica de Imbiriba Júnior *et al.* (2021) os dois sistemas são referidos como um, o Sistema Aquífero Marajó a partir da profundidade de 20 m, na qual a parte superior tem 30 m de espessura de argilitos que selam os depósitos finos de 200 m de espessuras subsequentes, alcançando a profundidade de até 250 m.

Na espessura de 25 m a 90 m, conforme Matta (2002), o atual Sistema Aquífero Marajó é constituído por camadas aquíferas menos espessas intercaladas por camadas impermeáveis e semipermeáveis. As camadas de aproximadamente 70 metros de profundidade caracterizam-se como livres (camadas arenosas) e confinadas (camadas argilosas, aquitardos). Em relação ao potencial hidrogeológico apresentam vazões entre 10 e 70 m<sup>3</sup>/h.

De tal forma, a permeabilidade vertical varia em função da composição de arenitos cinza esbranquiçados, de granulação fina a conglomeráticos intercalados com camadas mais espessas de argilitos e siltitos avermelhados no fundo, alternando até o topo com argilitos calcíferos cinzas esverdeados e calcário duro cinza claro, camadas de arenito calcífero, siltito e arenito na faixa de profundidade.

Na faixa de 70 a 180 metros as vazões variam de 100 m<sup>3</sup>/h a 300 m<sup>3</sup>/h. Na faixa de 180 m a 250 m o aquífero Marajó possui vazões médias a 300 m<sup>3</sup>/h alcançando até 600 m<sup>3</sup>/h, com água de boa qualidade, pH próximo ao neutro, com fácies hidrogeoquímica cálcico-magnesianas-bicarbonatadas (Matta 2002, Oliveira *et al.* 2001, Carvalho 2001, Oliveira Filho *et al.* 2018).

O Sistema Aquífero Marajó tem potencial moderado, apesar de permeabilidades relativamente altas encontradas nos arenitos de granulometria mais grossa. A reserva permanente drenável é a quantidade de água que pode ser drenada do aquífero e depende da porosidade efetiva da rocha, corresponde ao volume de água acumulado que não varia em função da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (ANA 2018).

O aquífero Marajó apresenta uma porosidade efetiva de 20 %, espessura média de 186 m na qual calcula-se que 80 % dessa espessura contenha o volume de 5,65 m<sup>3</sup> que seria o valor da reserva drenável do aquífero. A partir disso calcula-se que este volume corresponde a 84% da água subterrânea na RMB (ANA 2018).

#### 4.4 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO E SUA IMPORTÂNCIA NA IDENTIFICAÇÃO DE MISTURAS EM ÁGUAS

Para obter indícios de conexão hidráulica de aquíferos é possível utilizar algumas metodologias através da hidrogeologia em ensaios de campo, identificação da estrutura geométrica, falhas e fraturas em profundidade que interconectam os aquíferos através de métodos da geofísica e da geoquímica. Dentre tais metodologias destaca-se a geoquímica isotópica que utiliza métodos de identificação de fontes e misturas em amostras de rochas, solo, sedimento e água entre outras matrizes ambientais (Costa 2004, Négrel *et al.*2010, Plechacek 2022).

Isto é possível porque cada amostra ambiental possui uma composição química específica que intrinsecamente está relacionado ao local de origem e suas características. Dentre as quais a composição isotópica pode indicar de maneira mais precisa a origem do material além das contribuições posteriores provenientes de outros locais ou eventos geológicos potenciais que afetam o sistema isotópico (Faure 1986).

Dentre diversos sistemas isotópicos se destaca o estrôncio (Sr) que possui quatro isótopos  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ . Este sistema de isótopos é variável, uma vez que o  $^{87}\text{Sr}$  é originado a partir do decaimento beta do Rubídio ( $^{87}\text{Rb}$ ), além da quantidade de  $^{87}\text{Sr}$  produzida na nucleossíntese primordial (Faure 1986, Allègre 2008).

Similarmente, o sistema Rb-Sr é utilizado em estudos de proveniência de amostras de materiais geológicos como rochas e sedimentos, além de ser um dos primeiros métodos utilizados na datação de eventos geológicos através da Geocronologia. De tal forma, sabe-se que diversos fatores influenciam na composição isotópica do sistema Rb-Sr, por exemplo, a fonte do material, bem como a idade geológica, a geoquímica do elemento e relações de afinidade com os minerais presentes no material, a ocorrência de fenômenos geológicos de diferentes magnitudes e escalas entre outros (Allègre 2008).

Geralmente considera-se tais fatores para evidenciar a fonte e a mistura entre materiais. Em se tratando dos isótopos do Sr já é documentado que materiais crustais possuem um enriquecimento maior da razão isotópica, isto é, materiais crustais tendem a ter uma razão isotópica do Sr mais radiogênica em relação aos materiais provenientes do manto, por exemplo. Logo é possível associar uma composição isotópica de Sr mais radiogênica a origem de um material crustal (Dickins 2018).

Tal fato pode ser evidenciado também em amostras de águas subterrâneas, pois esta

água que após a precipitação meteórica infiltra e percola através do solo perpassa as rochas e se aloja na formação geológica do aquífero. Conseqüentemente a água que é um solvente universal ao passar do tempo de recarga do aquífero participa de reações químicas removendo e adicionando espécies químicas ao sistema, de tal maneira que adquire características similares aos materiais com os quais entrou em contato. Notavelmente, a composição isotópica do Sr das águas subterrâneas é uma das características adquiridas semelhante à da formação geológica em que se aloja. Na tabela 02, encontram-se valores da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de diversas matrizes e ambientes geológicos, inclusive de trabalhos regionais citados a seguir para águas subterrâneas e meteóricas e formações geológicas (Christensen *et al.* 2018, Négrel & Petelet-Giraud 2005).

Portanto através da geoquímica isotópica do estrôncio é possível associar a composição isotópica (razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) da água subterrânea ao material geológico que aloja o aquífero, incluindo as características naturais e por consequência a fonte de proveniência da água e a mistura entre as águas de dois ou mais aquíferos, com água meteórica ou água marinha (Quaggio 2021).

Na região da Amazônia Oriental, especificamente no Nordeste paraense onde situa-se a área de estudo, o trabalho pioneiro na utilização de isótopos de Sr em água subterrânea da zona costeira na região Bragantina-PA foi realizado por Bordalo *et al.* (2007). Neste trabalho a utilização da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  evidenciou a contribuição marinha na água subterrânea e a diferenciação da contribuição da água que percola as camadas sedimentares continentais.

Na RMB, o primeiro estudo realizado em 2012 com a utilização de razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em águas subterrâneas nos municípios de Belém e Ananindeua. E como resultado obteve dois tipos de águas associados aos dois principais sistemas aquíferos com suas respectivas razões Sr-Sr diferentes que tendem a semelhança no período mais chuvoso, isto é, indícios de mistura de águas entre os aquíferos (Oliveira Filho 2012).

Semelhantemente, obtendo indícios de mistura de águas entre os aquíferos, Silva (2015) utilizou de razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em águas subterrâneas nos municípios de Castanhal e Santa Maria. Também obteve como resultado dois tipos de águas associados aos dois principais sistemas aquíferos com suas respectivas razões Sr-Sr diferentes que tendem a semelhança no período mais chuvoso.

Diferentemente, Oliveira (2019) realizou pesquisa semelhante na Plataforma Bragantina nos municípios de Igarapé-Açu e São Francisco do Pará e não obteve indícios

claros de mistura de águas entre os aquíferos Barreiras e Pirabas utilizando a razão isotópica do estrôncio.

Tabela 02 - Assinatura Isotópica de diversos materiais e ambientes geológicos, segundo diversos autores.

Ambientes	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Fonte
Crosta continental superior	0,7163-0,8240	Goldstein & Jacobsen (1988)
Média das rochas dos Andes	0,70566-0,70951	Rollinson (1993)
Crosta Continental	0,7123*	Banner (2004)
Carbonatos marinhos Fanerozoicos	0,707-0,709	Banner (2004)
Água do Mar Atual	0,7092*	Banner (2004)
Água da chuva em áreas oceânicas	0,7092*	Capo <i>et al.</i> 1992
Água da Chuva em áreas continentais	0,707463- 0,713143	Herut <i>et al.</i> (1993), Négrel & Roy (1998), Han & Liu (2006), Xu & Han (2009), Xu <i>et al.</i> (2009), Han <i>et al.</i> (2010)
Água da chuva na Região Metropolitana de Belém	0,705316*	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Sedimentos em Suspensão do Rio Amazonas	0,71327-0,72146	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Sedimentos em Suspensão do Rio Negro	0,71698*	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Sedimentos em Suspensão do Rio Trombetas	0,74683*	Allègre <i>et al.</i> (1996)
Rocha Formação Barreiras	0,727492*	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Rocha Formação Pirabas	0,708752*	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Macrofósseis da Formação Pirabas	0,7086-0,7088	Belúcio (2001)
Água do Sistema Aquífero Barreiras	0,702348- 0,719799	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Água do Sistema Aquífero Pirabas	0,710709- 0,710939	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Água da Chuva Região Metropolitana de Belém	0,705316*	Oliveira Filho & Galarza (2013)
Água do Sistema Aquífero Barreiras	0,712716- 0,723881	Silva & Galarza (2017)
Água do Sistema Aquífero Pirabas Superior	0,706080- 0,709063	Silva & Galarza (2017)
Água do Sistema Aquífero Barreiras	0,710687- 0,714903	Oliveira (2019)
Água do Sistema Aquífero Pirabas	0,710413- 0,711035	Oliveira (2019)
Rocha Formação Pós-Barreiras (Borda Leste da Bacia do Marajó)	0,71664-0,72282	Moizinho <i>et al.</i> (2022)
Rocha Formação Barreiras (Borda Leste da Bacia do Marajó)	0,72751-0,74599	Moizinho <i>et al.</i> (2022)
Rocha Formação Barreiras (Plataforma Bragantina)	0,71821-0,7316	Moizinho <i>et al.</i> (2022)
Rocha Formação Pirabas (Plataforma Bragantina)	0,73141*	Moizinho <i>et al.</i> (2022)

\* média dos valores

Moizinho et al. (2022) obtiveram resultados que foram incluídos neste estudo por

serem valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  regionais originários das formações aqui investigadas que podem auxiliar nas interpretações. Estas são: formação Pós-Barreiras na borda Leste da Bacia do Marajó ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,71664 – 0,72282), Formação Barreiras na borda Leste da Bacia do Marajó ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,72751 – 0,74599), Formação Barreiras na Plataforma Bragantina ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,71821 – 0,7316) e por último Formação Pirabas na Plataforma Bragantina ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  = 0,73141). Estes valores regionais foram incluídos nos resultados para discussão e melhor entendimento da geoquímica isotópica do Sr na região.

#### 4.5 CONFIGURAÇÃO NEOTECTÔNICA

A bacia do Marajó é uma das bacias sedimentares que foram originadas com a ocorrência de rifteamentos atuantes na abertura dos Oceanos Atlântico Central e Equatorial durante o período entre Triássico ao Cretáceo (Soares Júnior *et al.* 2011).

Em relação a neotectônica podem ser referidos como os eventos que começaram com a abertura do Oceano Atlântico até a sua forma mais recente. Isto é evidenciado por estudos recentes que indicaram características de tectonismo recente no tempo geológico. Destacam-se dois principais eventos tectônicos em dois intervalos de épocas geológicas, o intervalo Mioceno-Plioceno e o Pleistoceno-Holoceno (Hasui 1990, Borges *et al.* 1995, Costa *et al.* 1991, Costa 1996, Costa *et al.* 1996, Costa 2004, Palheta 2008, Bemerguy *et al.* 1995).

##### 4.5.1 Mioceno-Plioceno

As feições neotectônicas deste período são caracterizadas pelo desenvolvimento de estruturas transtensivas. As estruturas transtensivas são falhas mestras normais, lístricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE situadas na região litorânea especificamente a região que abrange o Marajó e Belém. Estas feições compõem a estrutura da bacia de deposição dos sedimentos da sequência Marajó-Barreiras e Pirabas-Barreiras (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

São dois eventos principais que caracterizam a evolução tectonossedimentar da área: transgressão do Mar Pirabas e movimentações das falhas normais. Primeiro a transgressão do nível do mar Pirabas associado ao controle pelas falhas normais (NW-SE) e a ocorrência da sedimentação dos carbonatos da Formação Pirabas (Figura 06). Segundo a ocorrência de movimentações sucessivas ao longo das falhas normais, como resultado se originou a sequência siliciclástica da Formação Barreiras. As falhas transcorrentes dextrais NE-SW, participantes do processo evolutivo da bacia, podem estar associadas ao controle da distribuição das sequências sedimentares na direção NW-SE (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

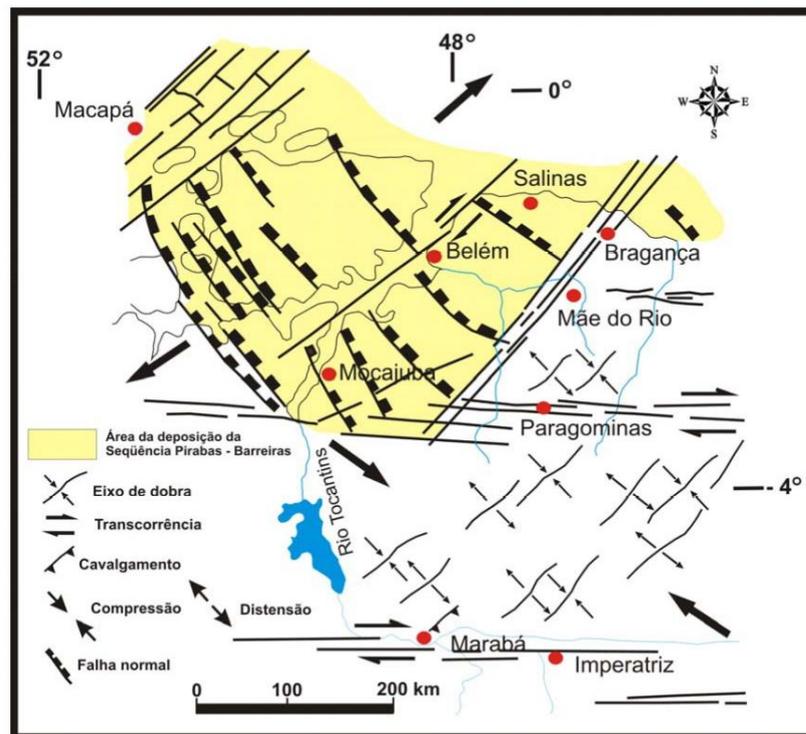


Figura 06 - Estruturas paleógenas-miocênicas: falhas mestras normais na direção NW-SE, inclinadas para NE, controlaram a deposição da Seqüência Pirabas-Barreiras. Falhas transcorrentes dextrais NE-SW seccionam as falhas normais. Fonte: (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

#### 4.5.2 Plioceno-Holoceno

No intervalo entre as épocas do Plioceno ao Holoceno, a evolução tectonossedimentar seguiu-se com a ocorrência de estruturas romboédricas transtensivas em variados tamanhos e simetrias (Figura 07). As estruturas transtensivas que caracterizam a bacia de afastamento são falhas transcorrentes dextrais E-W interconectadas através de falhas normais NW-SE reativadas e transcorrentes dextrais NE-SW (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

Durante o processo evolutivo, a ocorrência da movimentação das falhas normais resultou na deposição intercalada das formações Ipixuna e Barreiras. Também resultou na exposição da Formação Pirabas/Formação Marajó entre a Formação Barreiras. Assim como resultou no basculamento da Ilha do Marajó, também permitiu a deposição da unidade Pós Barreiras (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

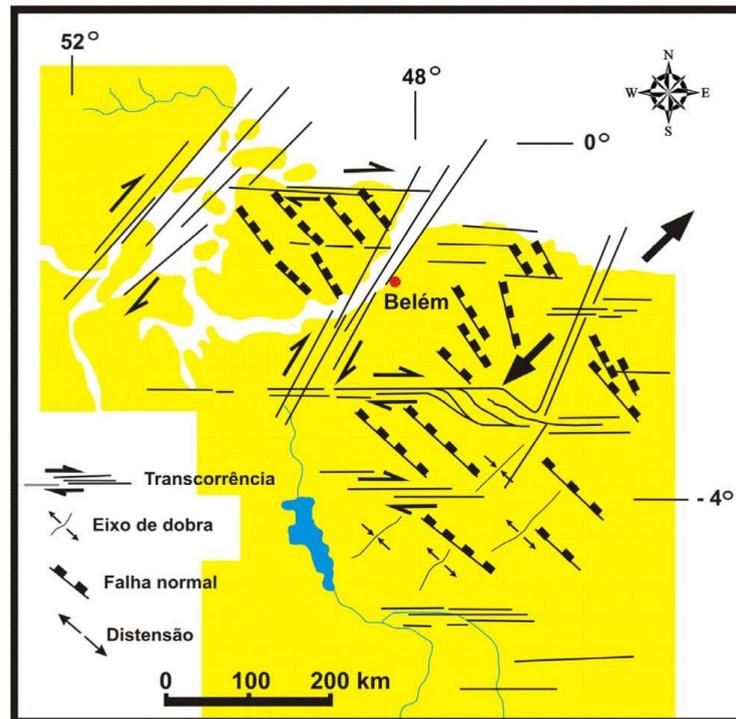


Figura 07 - Estruturas quaternárias: Surgimento de várias estruturas romboédricas transtensivas controladas por falhas transcorrentes dextrais E-W, normais NW-SE reativadas, transcorrentes dextrais NE-SW e falhas normais N-S. Fonte: (Costa *et al.* 1996, Palheta 2008).

## 5 RESULTADOS

A seguir, nas tabelas 03 e 04, respectivamente nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso, estão resumidos os resultados das análises dos parâmetros químicos e físico-químicos das amostras de águas representativas dos aquíferos Marajó e Barreiras. Nas tabelas estão os dados do ponto/poço, profundidade (Prof.), a data da coleta, potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), ferro total (Fe(t)), Sílica (SiO<sub>2</sub>), bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), cloreto (Cl<sup>-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sódio (Na<sup>+</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), magnésio (Mg<sup>+2</sup>), potássio (K<sup>+</sup>) e Cálcio (Ca<sup>+2</sup>). Cada resultado dos respectivos parâmetros será descrito detalhadamente nos tópicos seguintes. Os perfis estratigráficos de cada um dos poços pode ser encontrado no Apêndice A (Figuras 40, 41, 42 e 43).

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA

A análise dos parâmetros físico-químicos e principais íons das águas permitiu classificar a fácies hidrogeoquímica. Nos quais as águas rasas do aquífero Barreiras apresentaram fácies cloretada sódica, pH ácido e baixas condutividades elétricas e STD. Diferentemente, as águas profundas do aquífero Marajó apresentaram fácies bicarbonatada cálcica, pH próximo ao neutro e altas condutividades elétricas e STD. A seguir nas figuras 08 e 09 estão representadas as fácies hidroquímicas dos aquíferos Barreiras e Marajó nos diagramas de Piper, nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso respectivamente.

Adicionalmente, foram incluídas amostras de água meteórica da RMB nos diagramas de Piper, com objetivo de evidenciar a influência da recarga das águas meteóricas no aquífero Barreiras. E com objetivo de evidenciar as similaridades e diferenças entre o aquífero Marajó e o Pirabas, também foram inseridas amostras do aquífero Pirabas e o *background* do aquífero Pirabas (*background* aqui se refere ao local em que a formação Pirabas aflora em Capanema e portanto tem uma caracterização do aquífero mais próxima à das formações carbonatadas homônima Pirabas).

De maneira semelhante, o diagrama de Durov (Figuras 10 e 11) permite identificar as principais fácies hidroquímicas dos aquíferos e diferenciar os aquíferos Barreiras, Marajó, Pirabas e as águas meteóricas.

Tabela 03 - Parâmetros Químicos e Físico-Químicos dos aquíferos Barreiras e Marajó no período Menos Chuvoso.

	Pontos/ Poços	Prof. (metros)	Data	pH	CE ( $\mu$ S/cm)	STD (mg/L)	Fe (t) (mg/ L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>+2</sup> (mg/L)
AQUÍFERO MARAJÓ	MMAR-01	255	Mai-Jun	7,26	351,00	277,00	0,17	27,94	206,23	2,46	ND	0,64	4,11	2,87	0,73	20,63
			Jul-Ago	7,13	255,00	291,00	0,19	19,99	244,01	3,22	ND	1,21	5,57	2,99	1,45	38,19
			Set-Out	7,65	379,00	300,00	0,30	33,13	224,08	3,10	ND	3,58	4,00	2,56	2,60	39,26
	MMAR-02	273	Mai-Jun	7,68	321,00	254,00	0,20	21,90	197,55	3,85	ND	2,13	4,42	3,51	0,70	27,69
			Jul-Ago	7,22	273,00	276,00	0,16	13,48	229,60	6,21	ND	3,40	6,03	4,07	2,64	38,81
			Set-Out	7,54	365,33	289,00	0,29	27,02	189,22	4,58	ND	4,52	4,28	3,06	2,90	38,92
	MMAR-03	274	Mai-Jun	7,53	329,00	260,00	0,20	20,14	200,81	5,33	ND	2,11	4,52	3,15	0,62	19,95
			Jul-Ago	7,23	274,00	285,00	0,18	17,39	237,65	6,89	ND	1,86	6,20	2,63	2,12	33,96
			Set-Out	7,55	377,00	298,00	0,28	21,84	176,77	5,43	ND	4,07	4,37	2,75	3,09	39,79
	MMAR-04	284	Mai-Jun	7,67	308,00	244,00	0,23	23,31	179,10	4,58	ND	1,76	4,84	2,46	0,42	21,88
			Jul-Ago	7,31	284,00	252,00	0,20	18,71	207,15	8,51	ND	0,95	6,32	0,83	2,26	24,89
			Set-Out	7,42	340,00	269,00	0,30	26,10	166,81	5,23	ND	5,91	4,47	3,87	3,00	37,70
	MSIB-01	274	Mai-Jun	7,19	260,00	260,00	0,14	20,19	199,72	2,77	ND	0,67	4,61	0,90	ND	19,83
			Jul-Ago	7,10	274,00	244,00	0,13	10,66	202,07	4,07	ND	2,01	6,14	1,98	2,03	29,33
			Set-Out	7,16	324,00	256,00	0,10	22,13	180,51	3,16	ND	4,67	4,26	3,37	2,97	36,77
	MSIB-02	274	Mai-Jun	7,56	325,00	257,00	0,27	22,03	169,33	2,99	ND	0,15	4,65	0,03	ND	16,63
			Jul-Ago	7,11	274,00	244,00	0,18	11,80	204,61	4,36	ND	3,00	6,11	3,03	1,41	33,48
			Set-Out	7,15	324,00	256,00	0,17	20,72	181,75	3,42	ND	10,59	4,28	4,39	2,70	36,91
AQUÍFERO BARREIRAS	BBNV-01	45	Mai-Jun	4,22	85,00	67,00	0,02	9,14	ND	9,74	17,54	3,33	2,76	ND	0,08	0,03
			Jul-Ago	3,77	45,00	72,00	0,01	3,14	ND	15,30	24,76	4,61	4,05	ND	0,65	ND
			Set-Out	3,90	104,20	82,00	0,02	9,05	ND	12,44	21,11	4,42	2,51	0,30	1,01	ND
	BBNV-02	37	Mai-Jun	4,17	71,00	56,00	0,22	11,18	ND	6,24	3,46	1,71	8,40	0,01	0,02	0,15
			Jul-Ago	3,88	37,00	53,00	0,19	4,24	ND	8,34	4,12	3,23	11,38	ND	0,29	ND
			Set-Out	4,03	57,10	45,00	0,21	10,74	ND	6,76	3,17	1,70	7,02	0,17	ND	ND
	BBNV-03	42	Mai-Jun	4,18	56,80	45,00	0,05	9,21	ND	5,80	9,34	0,85	2,26	ND	ND	ND
			Jul-Ago	3,98	42,00	50,00	0,05	2,54	ND	7,63	14,03	2,11	2,67	ND	0,39	ND
			Set-Out	4,07	54,20	43,00	0,02	9,38	ND	5,74	8,55	1,97	1,56	0,00	ND	ND
	BBNV-04	40	Mai-Jun	4,04	95,70	76,00	0,02	6,88	ND	12,27	23,54	3,46	1,34	ND	ND	ND
			Jul-Ago	3,90	40,00	92,00	0,11	0,25	ND	18,38	45,17	2,57	0,60	ND	0,60	ND
			Set-Out	4,47	52,10	24,00	0,02	11,09	ND	5,15	10,66	2,21	0,45	0,43	0,21	0,07
	BBNV-05	42	Mai-Jun	4,24	57,40	45,00	0,02	6,26	ND	4,37	14,13	0,72	0,30	ND	ND	ND
			Jul-Ago	3,87	42,00	40,00	0,01	2,21	ND	16,63	40,84	1,60	0,34	ND	0,10	ND
			Set-Out	3,87	125,90	99,00	0,00	5,82	ND	47,99	52,01	15,19	0,00	0,61	0,64	ND
	BBNV-06	60	Mai-Jun	4,47	28,10	22,00	0,02	11,39	ND	3,11	3,54	0,27	1,43	0,03	0,07	0,05
			Jul-Ago	4,22	60,00	25,00	0,03	4,39	ND	5,65	4,69	0,78	2,00	ND	0,04	ND
			Set-Out	3,95	48,30	38,00	0,00	8,69	ND	4,27	4,14	6,08	1,61	0,00	0,62	ND
BSIB-01	60	Mai-Jun	4,36	41,30	33,00	0,48	14,52	ND	4,97	2,94	1,48	6,15	0,01	0,23	0,05	
		Jul-Ago	4,29	60,00	35,00	0,54	5,60	ND	5,44	2,46	1,74	7,84	0,11	0,67	0,19	
		Set-Out	4,08	46,70	37,00	0,51	15,96	ND	4,45	1,91	2,83	5,62	0,34	0,70	ND	
BSIB-02	46	Mai-Jun	3,97	85,00	67,00	0,04	6,03	ND	5,88	23,56	2,29	0,25	0,02	0,10	0,06	
		Jul-Ago	3,73	46,00	62,00	0,02	0,59	ND	10,17	34,27	1,31	0,43	0,11	0,53	ND	
		Set-Out	4,16	36,40	29,00	0,00	5,72	ND	7,82	29,51	7,06	0,00	0,40	0,74	0,42	
BSIB-03	46	Mai-Jun	4,16	41,00	32,00	0,08	6,32	ND	2,98	1,87	0,52	4,62	ND	0,03	0,37	
		Jul-Ago	3,79	46,00	38,00	0,36	1,28	ND	4,61	1,08	1,12	8,10	0,02	0,32	ND	
		Set-Out	3,83	39,20	31,00	0,15	6,44	ND	3,32	0,59	1,14	5,33	0,45	ND	ND	

Prof. (Profundidade); Cond. (Condutividade Elétrica); STD (Sólidos Totais Dissolvidos); Fe(t) (Ferro Total); SiO<sub>2</sub> (Sílica); HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Bicarbonato); Cl<sup>-</sup> (Cloro); NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Nitrato); Na<sup>+</sup> (Sódio); SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L); Mg<sup>+2</sup> (Magnésio); K<sup>+</sup> (Potássio); Ca<sup>+2</sup> (Cálcio); ND (Não Detectado); Mai-Jun (Maio-Junho); Jul-Ago (Julho-Agosto); Set-Out (Setembro-Outubro)

Tabela 04 - Parâmetros Químicos e Físico-Químicos dos aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso.

	Pontos / Poços	Prof... (metro)	Data	pH	Cond. (µS/cm)	STD (mg/L)	Fe (t) (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>+2</sup> (mg/L)
AQUÍFERO MARAJÓ	MMAR-01	255	Nov-Dez	7,58	366	175	0,15	30,83	247,39	2,664	ND	2,023	3,788	3,763	3,151	41,79
			Jan-Fev	7,28	245	193	0,21	23,65	253,64	10,725	ND	2,607	6,354	3,957	2,932	43,24
			Mar-Abr	7,61	365	288	0,17	29,55	248,27	2,992	ND	2,184	5,775	4,505	2,23	44,407
	MMAR-02	273	Nov-Dez	7,63	375	176	0,16	27,94	238,23	5,743	ND	4,958	4,498	4,021	3,049	38,029
			Jan-Fev	7,3	200	160	0,16	22,24	246,93	6,559	ND	5,051	7,214	5,082	3,034	43,246
			Mar-Abr	7,33	376	297	0,33	22,13	244,24	5,373	ND	4,524	6,013	5,346	2,311	43,493
	MMAR-03	274	Nov-Dez	7,41	377	179	0,17	23,73	243,46	5,092	ND	2,38	4,309	2,484	2,559	36,87
			Jan-Fev	7,26	252	199	0,03	19,31	254,98	7,661	ND	5,242	7,185	5,448	3,179	45,47
			Mar-Abr	7,22	377	299	0,77	19,1	245,59	6,189	ND	3,525	5,504	5,777	2,714	44,944
	MMAR-04	284	Nov-Dez	7,62	333	157	0,28	27,18	209,43	4,696	ND	4,196	4,438	3,724	2,657	36,755
			Jan-Fev	7,48	223	176	0,16	22,07	226,8	10,849	ND	5,182	7,686	4,601	2,839	39,717
			Mar-Abr	7,48	314	249	0,17	24,2	217,4	5,502	ND	3,807	6,482	5,171	1,916	39,533
	MSIB-01	274	Nov-Dez	7,32	322	153	0,12	25,12	205,5	2,893	ND	2,134	4,241	2,563	1,805	34,899
			Jan-Fev	7,03	213	168	0,13	18	214,72	3,685	ND	4,106	7,121	3,79	2,537	38,105
			Mar-Abr	7,16	311	246	0,12	20,85	205,33	3,662	ND	3,399	6,302	4,068	2,016	37,51
	MSIB-02	274	Nov-Dez	7,28	324	154	0,17	21,58	206,81	3,246	ND	3,255	4,644	2,83	2,476	33,178
			Jan-Fev	7	215	169	0,18	16,89	213,38	4,905	ND	5,193	7,325	4,364	2,556	39,603
			Mar-Abr	7,14	327	259	0,16	19,91	206,67	3,403	ND	3,616	6,091	4,57	2,102	37,218
AQUÍFERO BARREIRAS	BBNV-01	45	Nov-Dez	3,93	109,3	51	0,03	8,76	ND	12,48	20,395	6,999	2,879	0,929	0,999	0,097
			Jan-Fev	3,76	109,8	87	0,08	7,37	ND	15,839	24,662	10,046	4,575	0,206	1,386	0,729
			Mar-Abr	4,21	97,9	77	0	10,33	ND	14,668	24,804	8,547	5,174	0,039	0,493	0,475
	BBNV-02	37	Nov-Dez	3,94	71,3	33	0,2	10,54	ND	7,157	3,352	5,661	7,822	0,588	0,347	ND
			Jan-Fev	3,7	61,7	49	0,12	9,19	ND	11,366	5,402	6,212	10,998	0,135	0,747	0,103
			Mar-Abr	4,17	73,3	58	0,11	11,07	ND	8,611	7,723	5,832	10,874	0,171	0,454	0,146
	BBNV-03	42	Nov-Dez	4,1	54,2	25	0,04	9,42	ND	5,723	7,693	2,798	2,05	1,143	ND	ND
			Jan-Fev	3,72	34,1	27	0,06	7,83	ND	6,728	9,534	4,735	4,007	0,12	0,713	0,098
			Mar-Abr	4,23	48,3	38	0,03	10,5	ND	5,953	9,406	3,535	3,076	0,113	0,373	0,061
	BBNV-04	40	Nov-Dez	4,13	50,4	24	0,02	8,62	ND	4,692	9,112	4,209	0,52	1,042	ND	ND
			Jan-Fev	4,13	61,3	48	0,11	6,87	ND	18,192	29,069	10,096	4,265	0,161	0,625	0,209
			Mar-Abr	4,09	111,9	88	0,01	9,69	ND	14,218	30,956	8,788	2,102	0,165	0,708	0,133
	BBNV-05	42	Nov-Dez	3,97	54,5	24	0,01	8,98	ND	4,673	9,754	3,323	-	0,923	ND	ND
			Jan-Fev	3,8	29,5	23	0,02	8,84	ND	7,223	11,892	4,408	ND	0,101	0,286	0,075
			Mar-Abr	4,23	46,7	37	0,01	10,23	ND	4,834	12,3	3,456	0,458	0,014	0,118	0,029
	BBNV-06	60	Nov-Dez	3,95	34,4	16	0,03	11,17	ND	3,449	3,784	2,438	1,418	0,86	ND	0,138
			Jan-Fev	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Mar-Abr	4,58	30	24	0,12	12,58	ND	4,12	4,574	2,218	2,606	0,091	0,018	0,019
BSIB-01	60	Nov-Dez	3,95	55,9	26	0,49	15,62	ND	3,979	1,932	2,293	5,861	0,832	0,745	ND	
		Jan-Fev	3,95	26,7	21	0,53	12,36	ND	7,43	3,63	3,157	8,732	0,197	0,98	0,153	
		Mar-Abr	4,42	38,2	30	0,46	15,52	ND	4,182	1,925	1,739	7,2	0,294	0,774	0,193	
BSIB-02	46	Nov-Dez	3,8	99,6	47	0,01	5,55	ND	7,279	28,355	6,255	-	1,054	0,451	0,253	
		Jan-Fev	3,5	50,4	40	0,01	5,01	ND	7,712	32,86	6,449	ND	0,185	0,819	0,499	
		Mar-Abr	3,97	86,9	69	0	6,79	ND	6,656	29,741	5,52	ND	0,295	0,565	0,751	
BSIB-03	46	Nov-Dez	3,87	49,2	23	0,14	5,77	ND	3,35	0,846	0,966	4,886	0,706	0,289	ND	
		Jan-Fev	3,68	41,13	33	0,14	11,25	ND	5,06	ND	1,911	7,953	0,137	0,431	0,124	
		Mar-Abr	4,12	41,3	33	0,09	7,25	ND	3,16	2,078	1,366	6,158	0,168	0,334	0,251	

Prof. (Profundidade); Cond. (Condutividade Elétrica); STD (Sólidos Totais Dissolvidos); Fe (t) (Ferro Total); SiO<sub>2</sub> (Sílica) HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Bicarbonato); Cl<sup>-</sup> (Cloreto); NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Nitrito); Na<sup>+</sup> (Sódio); SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L); Mg<sup>+2</sup> (Magnésio); K<sup>+</sup> (Potássio); Ca<sup>+2</sup> (Cálcio); ND (Não Detectado); Nov-Dez (Novembro-Dezembro); Jan-Fev (Janeiro-Fevereiro); Mar-Abr (Março-Abril)

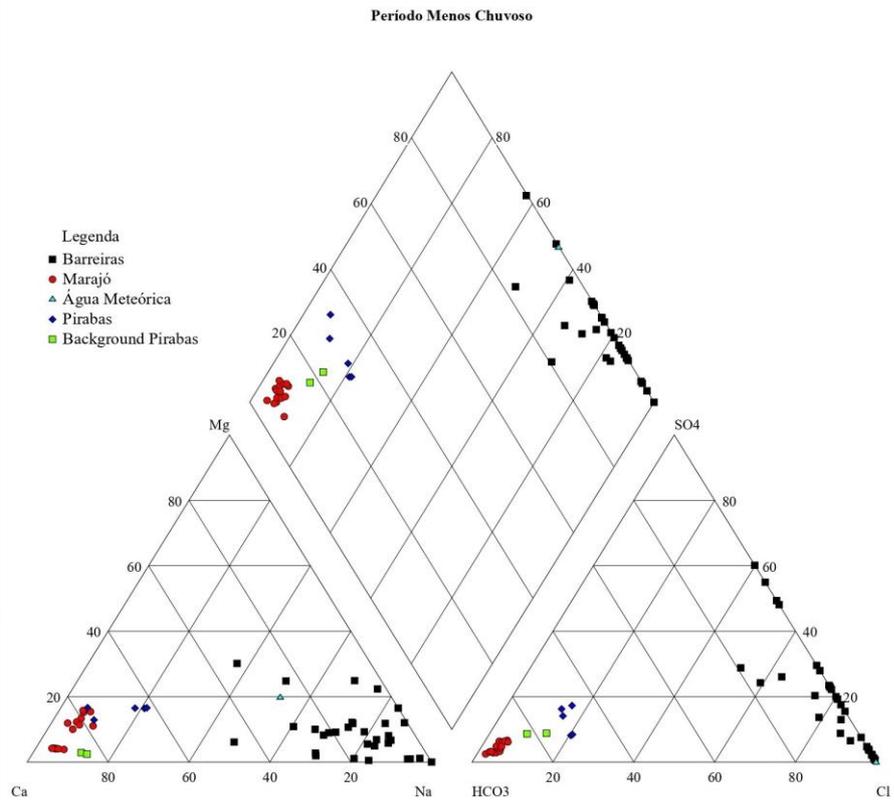


Figura 08 - Diagrama de Piper dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período menos chuvoso

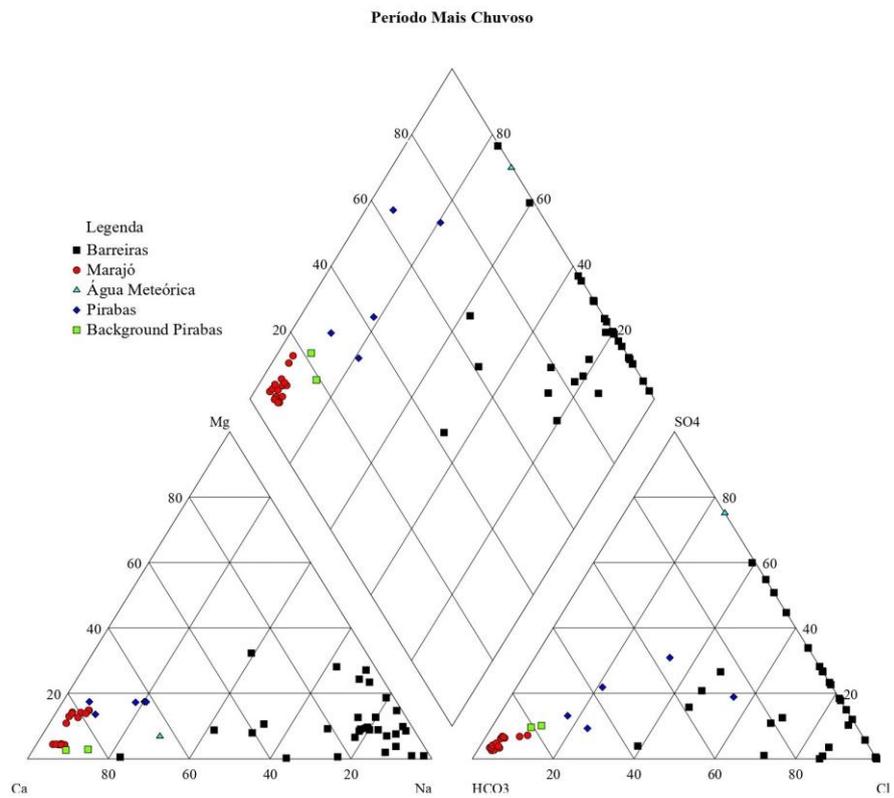


Figura 09 - Diagrama de Piper dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso.

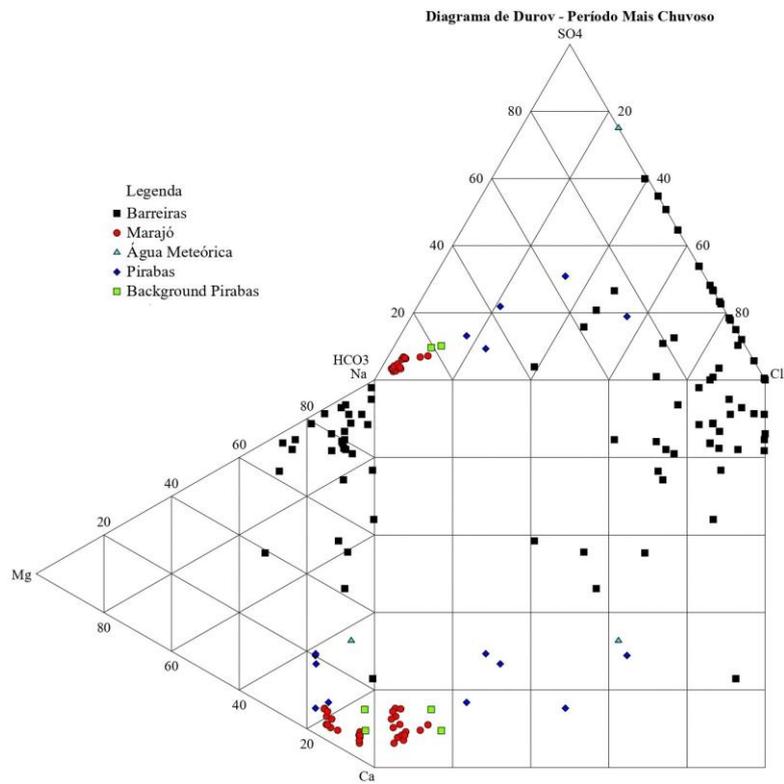


Figura 10 - Diagrama de *Durov* dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período menos chuvoso.

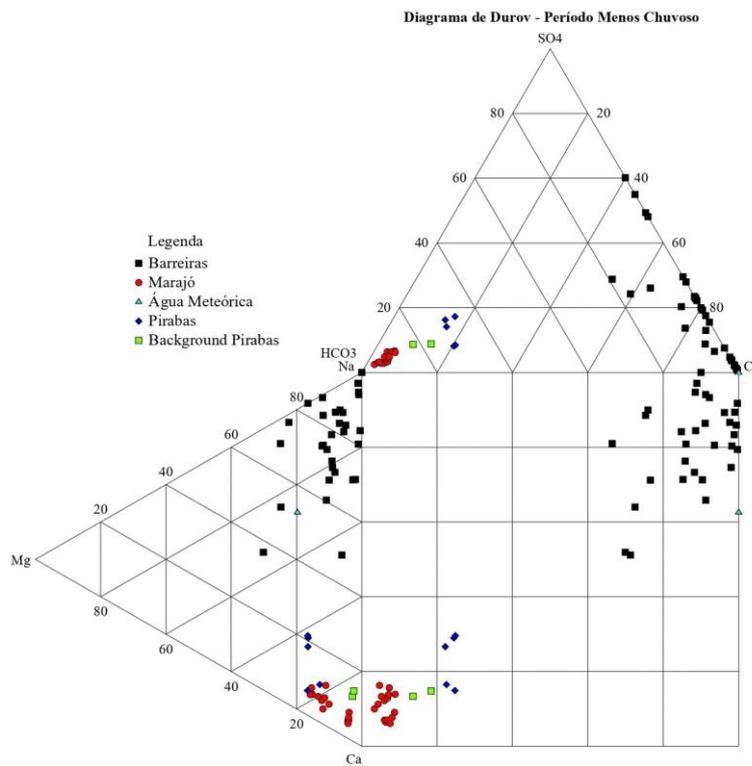


Figura 11 - Diagrama de *Durov* dos sistemas aquíferos Barreiras e Marajó no período mais chuvoso.

### 5.1.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH indica a concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ) na água e é expresso em uma escala logarítmica em que o valor 7 indica uma água neutra, os valores menores que 7 indicam águas ácidas, e valores superiores a 7 indicam águas básicas ou alcalinas. Os valores de pH das amostras representativas do Aquífero Barreiras (AB) e Aquíferos Marajó (AM) apresentaram dois padrões diferentes entre si ao longo do ciclo hidrológico anual. A partir do gráfico do pH (figura 12) é visível a diferença entre as águas básicas do AM e as águas ácidas do AB. Ao comparar os valores dos dois aquíferos, considerando a sazonalidade, é perceptível a diferença estatisticamente significativa entre o pH dos dois aquíferos (menos chuvoso: ANOVA  $F=726,5$   $p\text{-valor}=2,27 \times 10^{-37}$ ; mais chuvoso: ANOVA  $F=741,2$   $p\text{-valor}=1,546 \times 10^{-37}$ ).

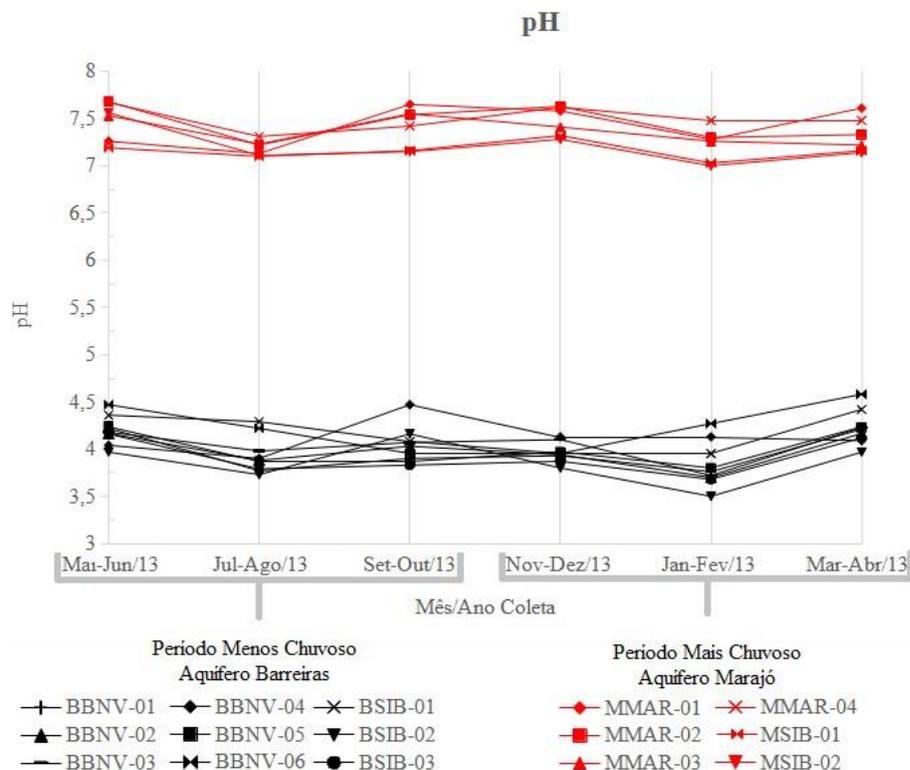


Figura 12 - Gráfico da variação sazonal e espacial do pH nas águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras e Marajó.

O pH no aquífero Barreiras apresentou o valor médio de 4,03 variando do mínimo 3,50 ao máximo 4,58 com desvio padrão de 0,22 unidades. No período menos chuvoso a média do pH foi 4,06 em no mais chuvoso a média foi de 4,00. Embora graficamente o pH aparente valores constantes e semelhantes, observa-se uma de diferença sazonal estatisticamente significativa entre os valores do pH ao comparar as variâncias (ANOVA  $F=6,418$   $p\text{-valor}=0,0001219$ ).

Em relação ao aquífero Marajó o valor médio do pH foi 7,35 com o mínimo de 7,00 e máximo de 7,68 e desvio padrão de 0,20 unidades. Ao testar a análise de variância para os

períodos menos chuvoso com média de 7,36 em relação ao mais chuvoso com média de 7,34 se observou uma diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=3,081$   $p$ -valor=0,02317).

### 5.1.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é uma medida do fluxo da corrente elétrica e está diretamente relacionada a concentração de sais dissolvidos na água. De tal maneira que um grande valor expressa uma grande condutividade e grande concentração de sais dissolvidos e vice-versa (Tundisi & Tundisi2008).

As amostras analisadas nesta pesquisa apresentaram valores de condutividade em dois padrões distintos associados aos dois diferentes tipos de águas dos respectivos sistemas aquíferos. Desta maneira, ao longo do ciclo anual o aquífero Marajó apresentou altos valores de condutividade ao passo que o aquífero Barreiras apresentou baixos valores de condutividade, como está ilustrado no gráfico da figura 13. Ao comparar os valores dos dois aquíferos é perceptível uma diferença estatisticamente significativa entre os dois tipos de águas (menos chuvoso: *Kruskal-Wallis*  $H=34,17$ ,  $p$ -valor=0,000002181; mais chuvoso: *Kruskal-Wallis*  $H=34,5$ ,  $p$ -valor0,000001885), graficamente é possível ver a diferença entre os dois (teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7637$ ,  $p$ -valor=0,007822).

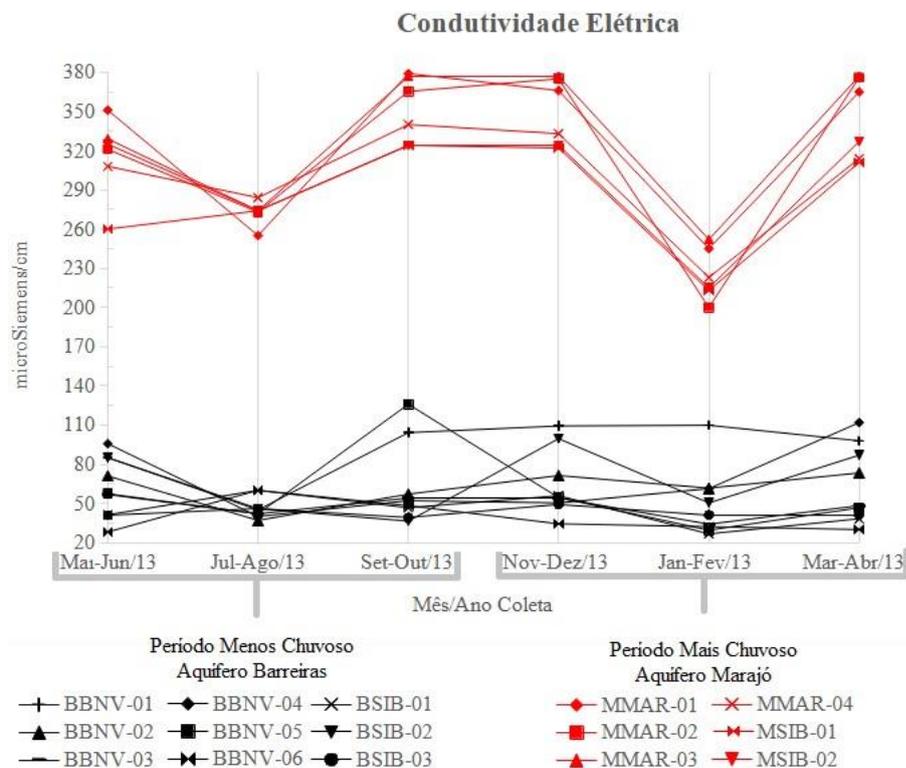


Figura 13 - Gráfico da variação sazonal e espacial da condutividade nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

A condutividade média para o aquífero Barreiras obtida foi 58,70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e a mediana foi de 50,40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  variando do mínimo 26,70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ao máximo 125,90  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 24,80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Em relação ao período menos chuvoso a média foi 57,16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e mediana foi 48,30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , quando comparado com o mais chuvoso cuja média foi 60,31  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e mediana foi 52,30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  não há uma diferença significativa estatisticamente (*Kruskal-Wallis*  $H=4,89$ ,  $p\text{-valor}=0,4292$ ; teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7637$ ,  $p\text{-valor}=0,007822$ )

As amostras do aquífero Marajó apresentaram condutividade média de 309,79  $\mu\text{S}/\text{cm}$  com mínimo de 200,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e máximo de 379,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 52,93  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ao comparar o período menos chuvoso com a média de 313,19  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em relação ao período mais chuvoso com a média de 306,39  $\mu\text{S}/\text{cm}$  percebe-se que há uma diferença estatisticamente significativa entre os dois períodos ao baseado no teste ANOVA ( $F=25,67$   $p\text{-valor}=0,0000000005334$ ).

### 5.1.3 Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os STD, aqui mensurados em miligramas por litro, dizem respeito a concentração total de sais, minerais e demais constituintes dissolvidos na água, de tal forma que tem relação diretamente proporcional com a condutividade e a salinidade da água. Portanto o reservatório no qual encontra-se pode influenciar naturalmente nos valores de STD ao mesmo tempo que poluição das águas também altera o valor de STD, logo é necessário analisar este parâmetro em conjunto com outros para uma análise fundamentada que permita evidenciar contribuições antropogênicas e geogênicas.

As águas analisadas neste trabalho apresentaram dois padrões diferenciados, com altos valores referentes ao aquífero Marajó (dissolução de carbonatos) e menores valores relacionados ao aquífero Barreiras, como está ilustrado na figura 14. É visível no gráfico a diferença de STD entre os dois aquíferos e esta diferença é estatisticamente significativa ao comparar os valores dois aquíferos (menos chuvoso: *Kruskal-Wallis*  $H=32,53$ ,  $p\text{-valor}=0,00000462$ ; mais chuvoso: *Kruskal-Wallis*  $H=35,37$ ,  $p\text{-valor}=0,000001256$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,799$ ,  $p\text{-valor}=0,01989$ ).

As amostras referentes ao Aquífero Marajó apresentaram média geral de 234,86 mg/L de STD com desvio padrão de 49,95, variando do mínimo de 153,00 mg/L ao máximo de 300,00 mg/L. Há uma diferença sazonal estatisticamente significativa entre as respectivas estações do período menos chuvoso com média de 264,33 mg/L e o período mais chuvoso com média de 205,39 mg/L (ANOVA  $F=37,43$   $p\text{-valor}=0,00000000005096$ ).

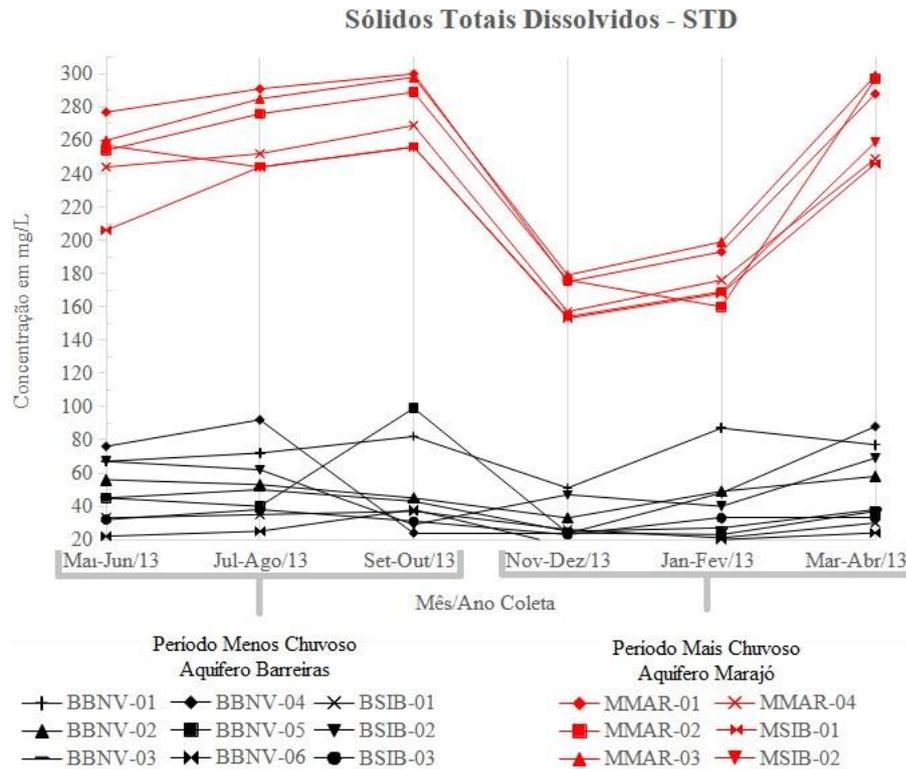


Figura 14 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de STD nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

Em relação ao Aquífero Barreiras a média geral obtida foi 45,08 mg/L de STD e mediana de 38,00 mg/L com valor mínimo de 16,00 mg/L e máximo de 99 mg/L e desvio padrão de 21,08. No período menos chuvoso foram obtidas a média de 49,56 mg/L e mediana de 45 mg/L, no período mais chuvoso foram obtidas a média de 40,42 mg/L e a mediana de 33 mg/L. Não se obteve variação sazonal estatisticamente significativa quando foi testada a hipótese pelo teste de *Kruskal-Wallis* ( $H=9,296$ ,  $p\text{-valor}=0,09739$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,799$ ,  $p\text{-valor}=0,01989$ ).

#### 5.1.4 Ferro Total

O parâmetro ferro total corresponde a todas as formas químicas do ferro dissolvidas na água. As amostras dos dois aquíferos apresentaram nas concentrações de ferro total uma sutil distinção entre si (Figura 15). Ao realizar o teste estatístico para comparar os valores é possível obter uma diferença estatisticamente significativa entre as concentrações de ferro nos dois aquíferos (menos chuvoso: *Kruskal-Wallis*  $H=11,34$ ,  $p\text{-valor} = 0,04373$ ; mais chuvoso *Kruskal-Wallis*  $H=14,69$ ,  $p\text{-valor} = 0,01149$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,644$ ,  $p\text{-valor}=0,0003144$ ). Com exceção do ponto BSIB-01 e BSIB-03 (no bimestre Julho-Agosto), as amostras do Aquífero Marajó apresentaram as maiores concentrações de ferro total, enquanto o Aquífero Barreiras apresentou as menores concentrações com maior variação.

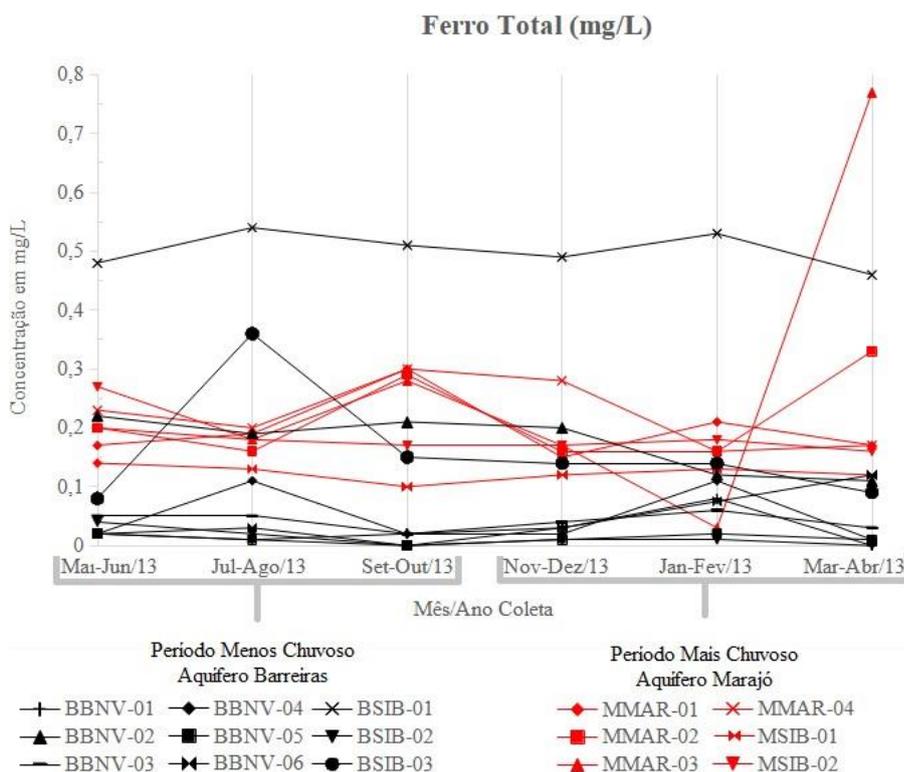


Figura 15 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de ferro total nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

As águas do Aquífero Barreiras apresentaram média geral de 0,11 mg/L de ferro total e mediana de 0,04 mg/L com valor mínimo de 0,00 mg/L e máximo de 0,54 mg/L e desvio padrão de 0,16 unidades. Após realizar teste de normalidade em que os dados não apresentaram distribuição normal (Teste de *Shapiro-Wilk*  $W=0,644$ ,  $p\text{-valor}=0,0003144$ ), foi realizado o teste de *Kruskal-Wallis* ( $H=2,873$ ,  $p\text{-valor} = 0,7152$ ) para verificar a hipótese de diferença sazonal entre os dois períodos menos chuvoso (média 0,12 mg/L e mediana de 0,03 mg/L) e mais chuvoso (média 0,11 mg/L e mediana de 0,05 mg/L), mas não houve diferença estatisticamente significativa, ou seja, aceita-se a hipótese de semelhança das concentrações de ferro total entre os dois períodos sazonais no aquífero Barreiras.

As águas do Aquífero Marajó apresentaram uma média geral de ferro total de 0,20 mg/L, mediana de 0,17 mg/L variando do mínimo de 0,03 mg/L ao máximo 0,77 mg/L com desvio padrão de 0,12 unidades. Após realizar teste de normalidade (*Shapiro-Wilk*  $W=0,7074$ ,  $p\text{-valor}=0,007385$ ) em que os dados não apresentaram distribuição normal, foi realizado o teste de *Kruskal-Wallis* ( $H=5,467$ ,  $p\text{-valor} = 0,3564$ ) para comparar o período menos chuvoso (média 0,21 mg/L e mediana de 0,20 mg/L) e o período mais chuvoso (média 0,20 mg/L e mediana de 0,17 mg/L), no entanto não houve diferença estatisticamente significativa das concentrações de ferro total entre os períodos sazonais no aquífero Marajó.

### 5.1.5 Sílica

A sílica na água subterrânea provém majoritariamente de minerais silicatados de rochas e solos pelos quais a água percola e interage com os minerais através do processo intempérico. Os fatores que podem contribuir para o aumento da concentração de sílica na água subterrânea são o tempo de residência e de interação entre a água e a rocha/solo, além da profundidade do aquífero (Khan & Umar 2010).

Graficamente (Figura 16) é visível dois padrões distintos das concentrações de sílica na água subterrânea, o qual se caracteriza por maiores concentrações no aquífero Marajó e as menores concentrações no Aquífero Barreiras. A distinção das águas é corroborada estatisticamente pelo teste ANOVA (menos chuvoso: ANOVA  $F=52,09$   $p\text{-valor}= 3,181 \times 10^{-16}$ ; mais chuvoso: ANOVA  $F=47,17$   $p\text{-valor}=1,66 \times 10^{-15}$ ).

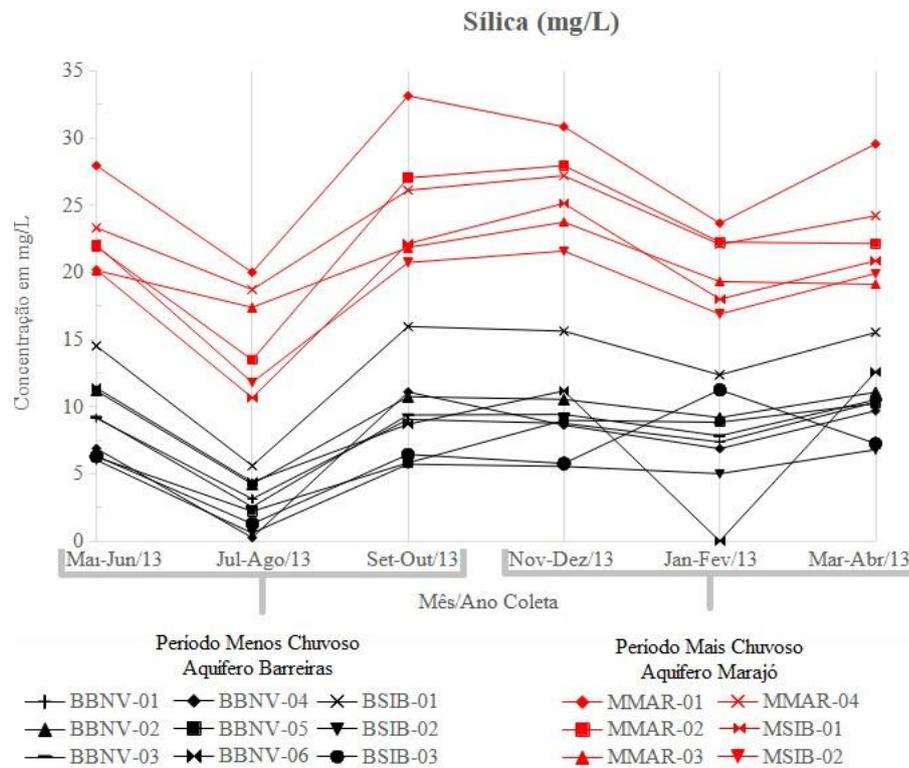


Figura 16 - Gráfico da variação sazonal e espacial da concentração de sílica nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

As amostras do aquífero Marajó apresentaram uma concentração geral média de 22,02 mg/L de sílica variando do mínimo 10,66 mg/L ao máximo 33,13 mg/L e desvio padrão de 4,88. No período menos chuvoso a média foi de 21,03 mg/L e no período mais chuvoso 23,02 mg/L, aos comparar os valores obtém-se uma diferença estatisticamente significativa entre os períodos sugerindo que no aquífero Marajó as maiores concentrações de sílica são encontradas no período mais chuvoso (ANOVA  $F=6,889$   $p\text{-valor}=0,0002178$ ).

As águas do Aquífero Barreiras apresentaram uma concentração média de sílica de 8,21 mg/L variando do mínimo de 0,25 mg/L ao máximo 15,96 mg/L e desvio padrão de 3,65

unidades. Ao considerar o teste ANOVA para comparar os períodos menos chuvoso (média 6,97 mg/L) e mais chuvoso (média 9,50 mg/L) obtém-se uma diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=9,47$   $p\text{-valor}<0,0000025$ ), um indício de que as maiores concentrações de sílica são encontradas no período mais chuvoso nas águas do aquífero Barreiras.

### 5.1.6 Bicarbonato

O bicarbonato é um dos componentes que permite uma clara distinção entre os aquíferos Marajó e Barreiras, uma vez que é praticamente ausente no Barreiras ao passo que contém altas concentrações no Marajó (Figura 17).

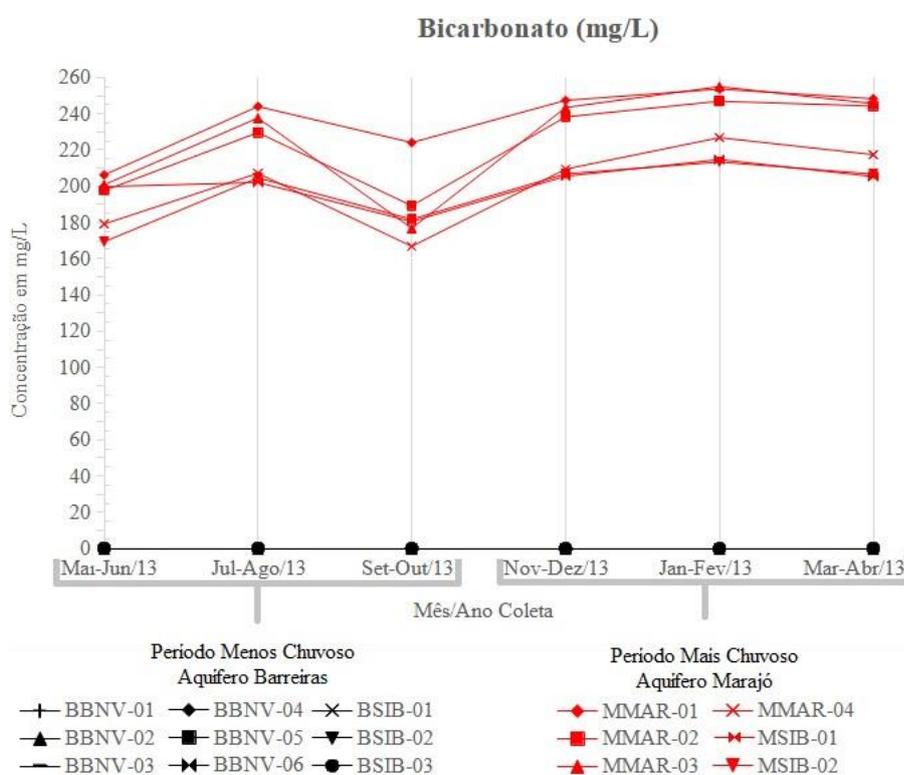


Figura 17 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de bicarbonato nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

A concentração média de bicarbonato no aquífero Marajó foi de 214,60 mg/L variando do mínimo 166,81 mg/L ao máximo 254,98 mg/L com desvio padrão de 25,54 unidades. A média para o período menos chuvoso foi de 199,83 mg/L e para o período mais chuvoso foi de 229,38 mg/L e a diferença entre os dois períodos é estatisticamente significativa (ANOVA  $F=6,941$   $p\text{-valor}=0,0002061$ ). Logo, o teste estatístico sugere que existe uma variação sazonal nas concentrações de bicarbonato no aquífero Marajó em que as maiores concentrações são encontradas no período mais chuvoso.

Em relação ao aquífero Barreiras não foram detectadas concentrações quantificáveis

de bicarbonato nas amostras de águas coletadas.

### 5.1.7 Cloreto

O íon cloreto, segundo Mazor (2003), é conservativo, isto é, o cloreto não participa da troca de íons que ocorre na interação da água subterrânea com a rocha. Isto implica que o íon dissolvido na água ao adentrar no aquífero e percolá-lo dificilmente será removido. Geologicamente a origem do cloreto pode estar relacionada a dissolução de rochas específicas ou de aerossol marinho. Outra via de inserção de cloro na água seria uma contaminação antrópica.

A partir do gráfico da figura 18 vê-se que os valores das concentrações de cloreto são geralmente maiores no aquífero Barreiras em comparação com o aquífero Marajó. Estatisticamente a diferença entre as concentrações de cloreto dos aquíferos é significativa, de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* (Menos Chuvoso:  $H=16,02$ ,  $p\text{-valor}=0,006781$ ; Mais Chuvoso:  $H=12,57$ ,  $p\text{-valor}=0,02776$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,5512$ ,  $p\text{-valor}=0,00002558$ ).

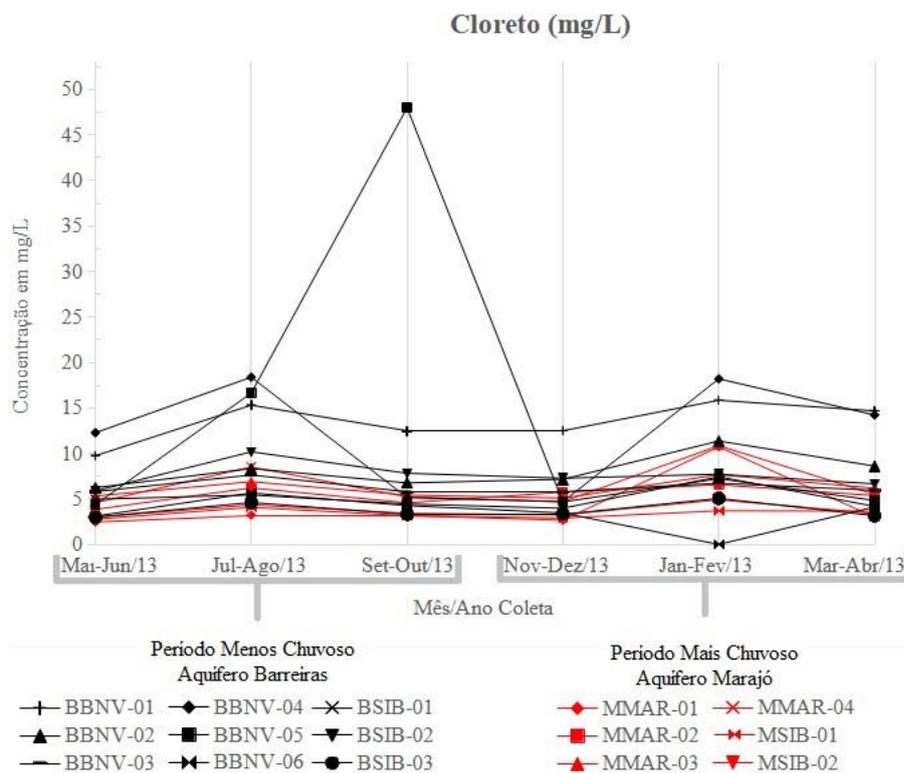


Figura 18 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cloreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

As amostras analisadas do aquífero Barreiras apresentaram uma concentração média geral de 8,38 mg/L de cloreto, e mediana de 6,24 mg/L, variando do mínimo 2,98 mg/L ao máximo 47,99 mg/L com desvio padrão de 6,92 unidades. Ao comparar o período menos

chuvoso (média 9,09 mg/L e mediana 5,88 mg/L) em relação ao mais chuvoso (média 7,64 mg/L e mediana 6,68 mg/L) não há uma diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* ( $H = 7,435$ ;  $p\text{-valor} = 0,1902$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,5512$ ,  $p\text{-valor}=0,00002558$ ).

Em relação ao aquífero Marajó a média geral da concentração de cloreto foi de 4,89 mg/L variando do mínimo 2,46 mg/L ao máximo 10,85 mg/L com desvio padrão de 2,07 unidades. Considerando o período sazonal menos chuvoso (média 4,45 mg/L) comparado em relação ao período mais chuvoso (média 5,32 mg/L) obtém-se uma variação estatisticamente significativa (ANOVA  $F=3,723$ ;  $p\text{-valor}=0,009691$ ). Isto sugere que as maiores concentrações de cloreto no aquífero Marajó ocorrem no período mais chuvoso.

### 5.1.8 Nitrato

O nitrato é a forma mais oxidada do nitrogênio ( $\text{NO}_3^-$ ). A presença de nitrato na água é comumente associada a contaminação por esgoto ou fertilizantes e raramente em condições definidas o nitrato é lixiviado de algumas rochas (Foley 2009).

Há uma clara distinção das concentrações de nitrato entre os dois aquíferos e é visível no gráfico da figura 19, no qual o aquífero Barreiras apresenta altas concentrações de nitrato variando ao longo do gráfico, enquanto está praticamente ausente no aquífero Marajó, cujas amostras não foram detectadas nitrato.

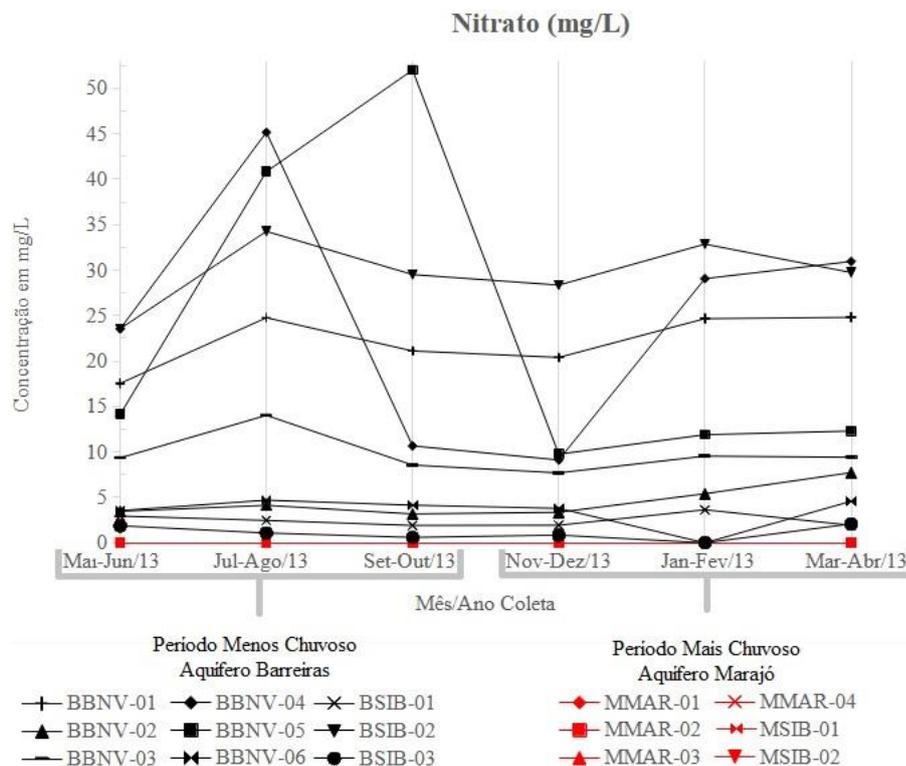


Figura 19 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cloreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

O aquífero Barreiras apresentou uma concentração média geral de 14,01 mg/L de nitrato, e mediana de 9,37 mg/L variando do mínimo 0,59 mg/L ao máximo 52,01 mg/L com desvio padrão de 12,98 unidades. Ao comparar os valores entre o período menos chuvoso (média de 14,93 mg/L e mediana de 9,34 mg/L) e mais chuvoso (média de 13,03 mg/L e mediana de 9,41 mg/L) não se obteve uma diferença estatisticamente significativa teste de *Kruskal-Wallis* ( $H = 1,983$ ;  $p$ -valor = 0,8515; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,8139$ ,  $p$ -valor=0,02938).

Nas amostras do Aquífero Marajó analisadas não foram obtidas quantidades detectáveis de nitrato em nenhum ponto onde foram coletadas estas amostras.

### 5.1.9 Sulfato

O sulfato na água subterrânea pode ser proveniente da dissolução de minerais como pirita e gipso presentes em rochas. Também pode ser originado de contaminação antrópica proveniente de esgotos, minas de carvão, refinaria metalúrgica entre outras fontes (Perry *et al.* 2009, Miao *et al.* 2012).

As amostras dos aquíferos apresentaram dois padrões distintos de concentrações de sulfato: o aquífero Marajó apresentou concentrações semelhantes em um padrão constante e regular, enquanto o aquífero Barreiras apresentou um padrão irregular variando de baixas a altas concentrações de sulfato (Figura 20). Embora apresentem padrões diferentes, estatisticamente os aquíferos não apresentam diferença significativa de acordo com o teste ANOVA (menos chuvoso: ANOVA  $F=1,614$   $p$ -valor=0,1792; mais chuvoso: ANOVA  $F=2,231$   $p$ -valor=0,07046).

O aquífero Marajó apresentou uma concentração geral média de 5,39 mg/L de sulfato, variando do mínimo 3,79 mg/L ao máximo 7,69 mg/L e desvio padrão de 1,14 unidades. Em relação ao período menos chuvoso (média: 4,95 mg/L) comparado ao mais chuvoso (média: 5,83 mg/L) há uma diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=91,3$ ;  $P$ -Valor =  $3,192 \times 10^{-17}$ ). De tal forma, no aquífero Marajó as maiores concentrações de sulfato são encontradas no período mais chuvoso.

Em relação ao aquífero Barreiras a concentração média geral de sulfato obtida foi de 4,01 mg/L variando do mínimo 0 mg/L ao máximo de 11,38 mg/L com desvio padrão de 3,21 unidades. Ao comparar o período menos chuvoso (média: 3,30 mg/L) em relação ao período mais chuvoso (média: 4,93 mg/L) não foi obtida diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=0,5905$ ;  $P$ -Valor=0,7072).



maiores concentrações de sódio são encontradas no período mais chuvoso (Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=16,37$   $p\text{-valor}=0,005869$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7784$ ,  $p\text{-valor}=0,01153$ ).

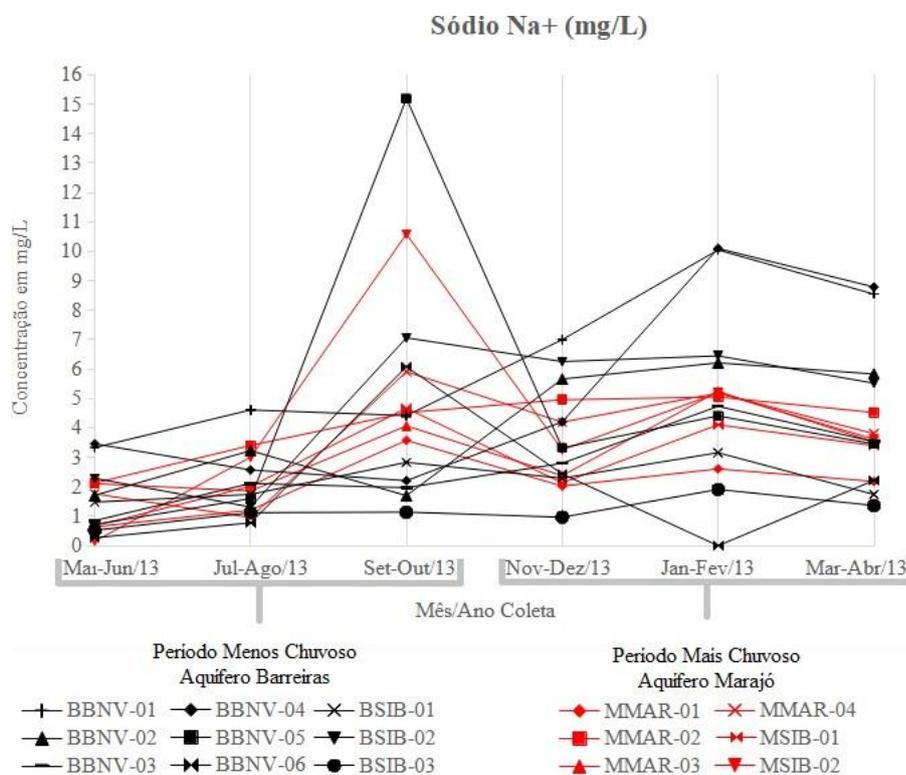


Figura 21 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de sódio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

No aquífero Marajó a concentração de sódio média foi de 3,35 mg/L, e a mediana de 3,40 mg/L variando do mínimo 0,15 mg/L ao máximo 10,59 mg/L com desvio padrão de 1,94 unidades. Quando comparadas as concentrações do período menos chuvoso (média 2,96 mg/L e mediana 2,12 mg/L) em relação às concentrações do período mais chuvoso (média 3,74 mg/L e mediana 3,71 mg/L) ambos os períodos apresentam uma diferença entre si estatisticamente significativa de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* ( $H=24,28$   $p\text{-valor}=0,0001921$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7334$ ,  $p\text{-valor}=0,01363$ ), em que as maiores concentrações de sódio são encontradas no período mais chuvoso.

### 5.1.11 Magnésio

O magnésio é um metal alcalino-terroso que também é considerado essencial em termos de nutricionais. Em relação a presença na água subterrânea pode ser originado a partir da dissolução de rochas carbonáticas como a dolomita (Rapant *et al.* 2017). Também é um dos elementos que pode estar associado à dureza da água.

Claramente visível no gráfico da figura 22, há dois padrões distintos que separam os

dois aquíferos. As maiores concentrações de Mg foram observadas no aquífero Marajó e as menores concentrações são relativas ao aquífero Barreiras. Esta diferença é estatisticamente significativa de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* (Menos Chuvoso:  $H=33,42$ ; P-Valor =  $0,000002131$ ; Mais Chuvoso:  $H=39,9$  p-valor= $0,0000001566$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,6072$ , p-valor= $0,0001164$ ).

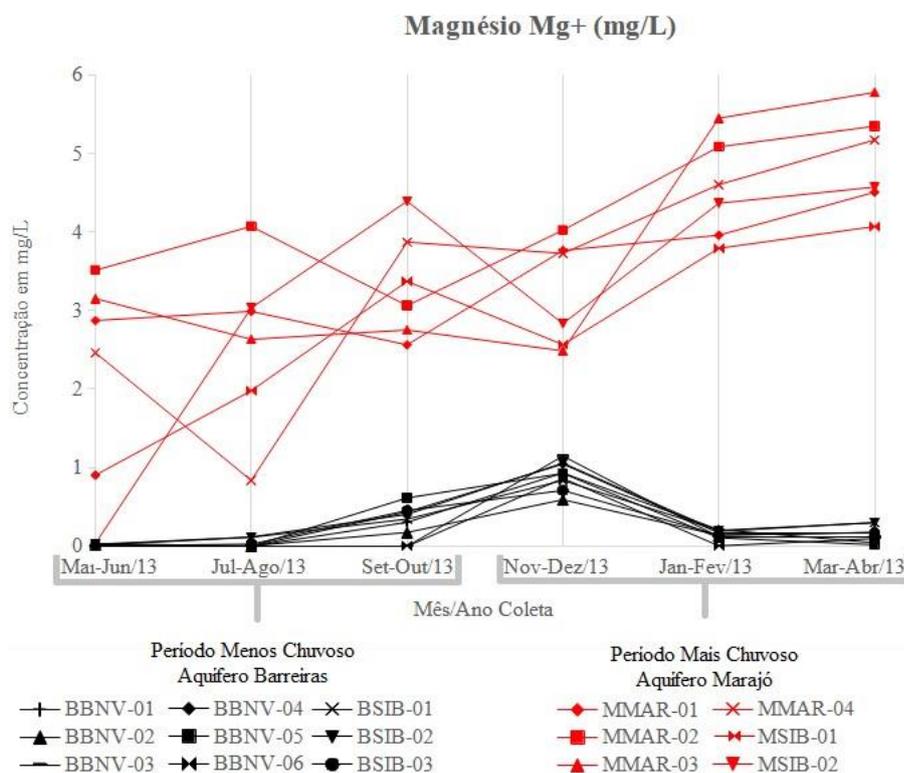


Figura 22 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de magnésio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

O aquífero Marajó apresentou concentração média de 3,46 mg/L variando do mínimo 0,03 mg/L ao máximo de 5,78 mg/L com desvio padrão de 1,30 unidades. Ao comparar os valores do período menos chuvoso (média 2,69 mg/L) em relação ao mais chuvoso (média 4,23 mg/L) obtém-se uma diferença estatisticamente significativa que evidencia que o período mais chuvoso apresenta maiores concentrações de Mg (ANOVA  $F=8,58$ ; P-Valor= $0,000039$ ).

O aquífero Barreiras apresentou concentração média de 0,33 mg/L, mediana de 0,17 mg/L, variando do mínimo 0,00 mg/L ao máximo 1,14 mg/L com desvio padrão de 0,34 unidades. Ao comparar as concentrações do período menos chuvoso (média 0,19 mg/L e mediana 0,11 mg/L) em relação ao período mais chuvoso (média 0,41 mg/L e mediana 0,19 mg/L) obtém-se uma variação estatisticamente significativa que evidencia que o período mais chuvoso apresenta maiores concentrações de Mg (Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=38,47$  p-valor= $0,0000002365$ ; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,6072$ , p-valor= $0,0001164$ ).

### 5.1.12 Potássio

O potássio é um metal alcalino-terroso e sua presença do potássio na água subterrânea pode ser associada a dissolução de minerais de feldspato intemperizados presentes nas rochas e solo naturalmente. Enquanto a contribuição antropogênica de potássio como contaminante pode estar associado a fertilizantes (Zakaria *et al.* 2021).

No gráfico da figura 23 é possível distinguir os dois aquíferos em dois padrões distintos em que as maiores concentrações de potássio são do aquífero Marajó e as menores são do aquífero Barreiras. Estatisticamente a diferença entre as concentrações de potássio dos dois aquíferos é significativa de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* (Menos Chuvoso:  $H=30,04$ ; P-Valor = 0,00001336; Mais Chuvoso:  $H=34,36$  p-valor=0,0000001997; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,8017$ , p-valor=0,02135).

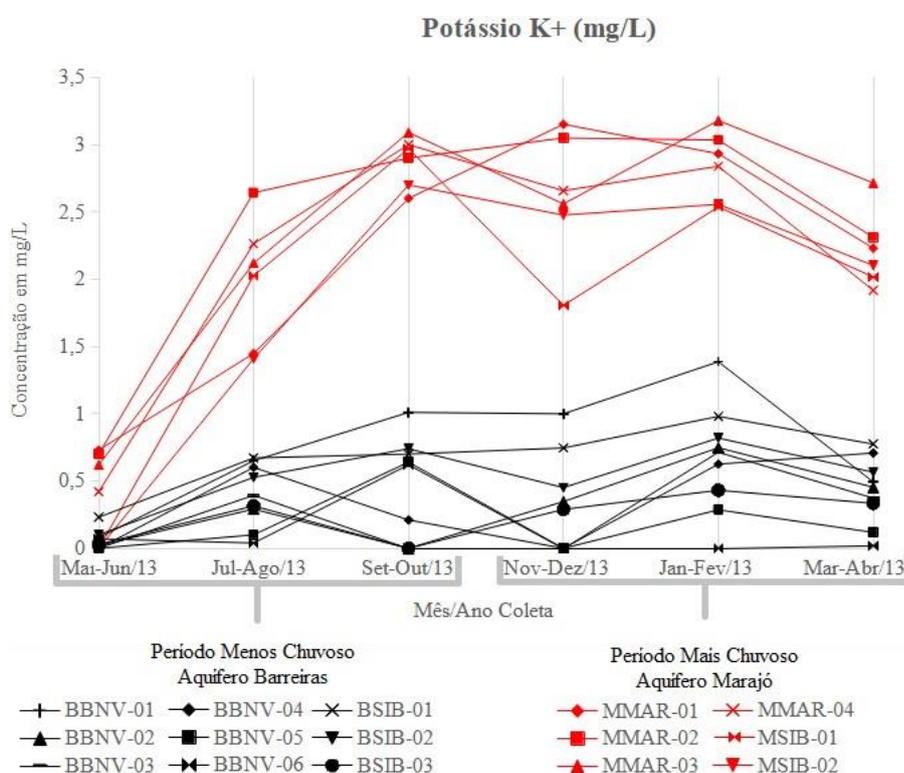


Figura 23 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de potássio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

Em relação ao aquífero Marajó a concentração média de potássio foi de 2,29 mg/L variando do mínimo 0,42 mg/L ao máximo 3,18 mg/L com desvio padrão de 0,77 unidades. Em relação ao período menos chuvoso (média 1,98 mg/L) comparado ao período mais chuvoso (média 2,56 mg/L) há uma diferença estatisticamente significativa sugerindo que as concentrações de potássio no aquífero Marajó são maiores no período mais chuvoso (ANOVA  $F=40,77$ ; P-Valor=0,000000000001708).

O aquífero Barreiras apresentou concentração média de potássio de 0,48 mg/L e

mediana de 0,45 mg/L, variando do mínimo 0,02 mg/L ao máximo 1,39 mg/L com desvio padrão de 0,32 unidades. Ao comparar as concentrações do período menos chuvoso (média 0,38 mg/L e mediana 0,32 mg/L) em relação ao período mais chuvoso (média 0,58 mg/L e mediana 0,53 mg/L) obtém-se uma diferença estatisticamente significativa que sugere que as maiores concentrações de potássio no aquífero Barreiras são encontradas no período mais chuvoso (Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=14,25$  p-valor=0,01358; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,8017$ , p-valor=0,02135).

### 5.1.13 Cálcio

O cálcio é um metal do grupo alcalino-terroso e é considerado um dos elementos essenciais para nutrição, e está associado a dureza da água. A presença do cálcio em águas subterrâneas é naturalmente associada a dissolução de formações carbonáticas e rochas como calcita, aragonita, calcário, dolomita entre outras.

É um dos elementos presentes nos aquíferos profundos da RMB, que contribuem para uma diferenciação mais clara em relação aos aquíferos rasos no qual as concentrações de cálcio são muito pequenas e às vezes praticamente ausente. Portanto, esta é a diferença marcante que pode ser observada no gráfico da figura 24, em que as maiores concentrações são referentes ao aquífero Marajó e as menores concentrações são do aquífero Barreiras. Tal fato é reforçado ao comparar as concentrações entre os aquíferos, pois obtém-se uma diferença estatisticamente significativa (Menos Chuvoso: Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=35$ ; P-Valor = 0,0000005004; Mais Chuvoso:  $H=35,57$  p-valor=0,0000001117; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,3898$ , p-valor=0,0000003217).

O aquífero Marajó apresentou uma concentração média de 35,35 mg/L de cálcio variando do mínimo 16,63 mg/L ao máximo 45,47 mg/L com desvio padrão de 7,76 unidades. Comparando o período menos chuvoso (média 30,81 mg/L) com o mais chuvoso (média 39,89) obtém-se uma diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=29,03$  P-Valor = 0,0000000001214). Portanto o período mais chuvoso apresenta maiores concentrações de cálcio.

Em relação ao aquífero Barreiras, a concentração de cálcio média foi de 0,20 mg/L, e mediana de 0,14 mg/L, variando do mínimo 0,02 mg/L ao máximo 0,75 mg/L com desvio padrão de 0,20 unidades. Ao comparar as concentrações do período menos chuvoso (média 0,15 mg/L e mediana 0,07 mg/L) com as concentrações do mais chuvoso (média 0,23 mg/L e mediana 0,14 mg/L) obtém-se uma diferença estatisticamente significativa, na qual período mais chuvoso apresenta as maiores concentrações (Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=21,19$  p-

valor=0,0003052; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,3898$ , p-valor=0,0000003217).

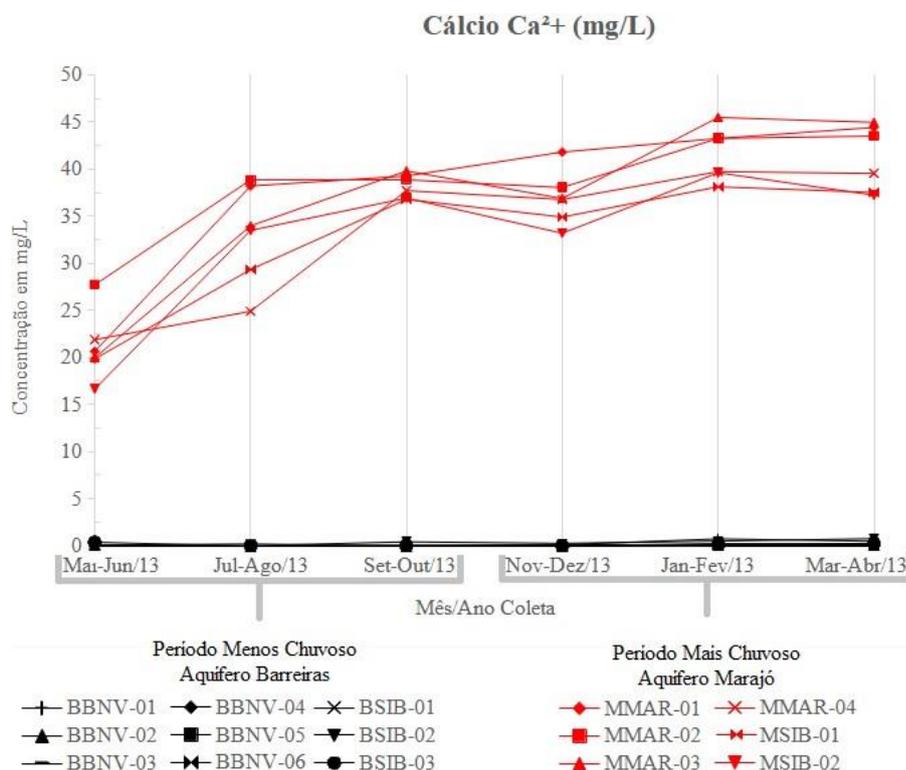


Figura 24 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de cálcio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

## 5.2 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DO ESTRÔNCIO

### 5.2.1 Estrôncio (Sr)

O estrôncio é um metal alcalino-terroso, geralmente como elemento traço na crosta terrestre, o qual pode ser intemperizado e dissolvido na água. O Sr está presente naturalmente em minerais como aragonita, calcita, celestita e estroncianita. Em relação a fontes antropogênicas resíduos industriais e aterros sanitários podem ser a origem do estrôncio como contaminante (Musgrove 2021).

As concentrações de estrôncio analisadas estão representadas no gráfico da figura 25 e na tabela 05 que apresentam dois padrões separados, nos quais é possível distinguir o aquífero Marajó com as maiores concentrações de estrôncio, e o aquífero Barreiras com as menores. Esta diferença entre as concentrações de estrôncio dos dois aquíferos é estatisticamente significativa (Menos Chuvoso: Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=35,49$ ; P-Valor=0,000001187; Mais Chuvoso: Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=32,31$  p-valor=0,000005034; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,6386$ , p-valor=0,0002717).

O aquífero Marajó apresentou uma concentração média geral de 0,53 mg/L de estrôncio, variando do mínimo 0,32 mg/L ao máximo 0,83 mg/L com desvio padrão de 0,13 unidades. Ao comparar o período menos chuvoso (média 0,55 mg/L) com o mais chuvoso

(média 0,50) nota-se uma diferença estatisticamente significativa (ANOVA  $F=4,597$ ; P-Valor = 0,003124). Isto sugere que as maiores concentrações de estrôncio são encontradas no aquífero Marajó no período menos chuvoso.

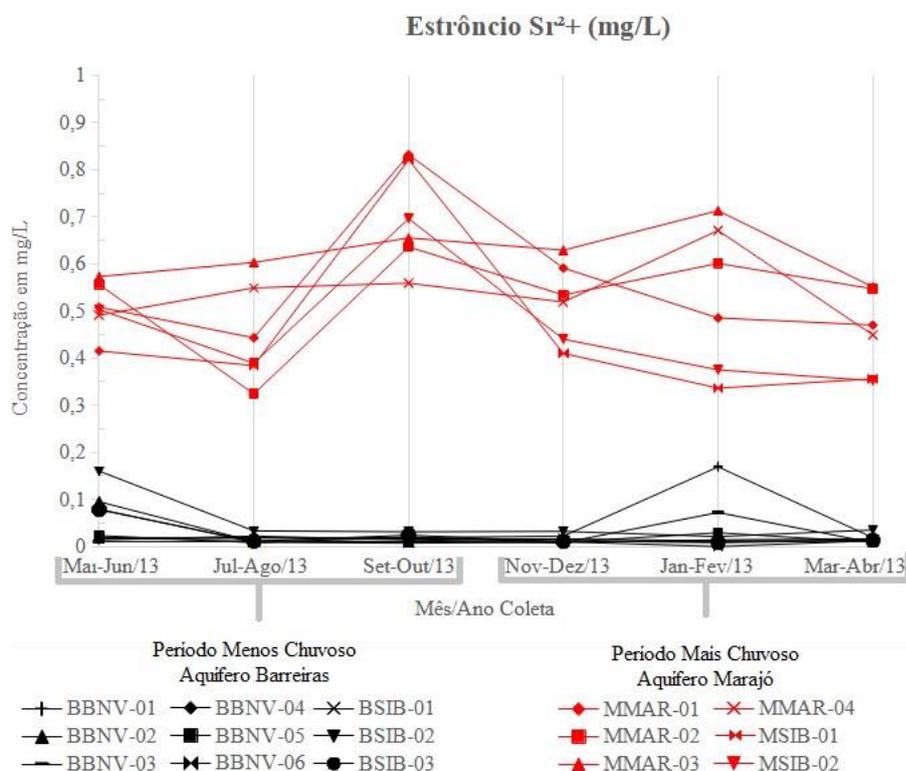


Figura 25 - Gráfico da variação sazonal e espacial das concentrações de estrôncio nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

O aquífero Barreiras apresentou uma concentração média de 0,03 mg/L de estrôncio, e mediana de 0,01 mg/L, variando do mínimo 0,01 mg/L ao máximo 0,17 mg/L com desvio padrão de 0,03 unidades. Ao comparar as concentrações do período menos chuvoso (média 0,03 mg/L e mediana 0,02 mg/L) com o período mais chuvoso (média 0,02 mg/L e mediana 0,02 mg/L) não se obteve uma diferença estatisticamente significativa (Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=8,462$ ; P-Valor = 0,1309 Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,6386$ , p-valor=0,0002717).

Tabela 05 - Concentrações de estrôncio em mg/L e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nos aquíferos Barreiras e Marajó nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso.

Período Menos Chuvoso										
Mai-Jun/2013				Jul-Ago/2013			Set-Out/2013			
Poço	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	
Marajó	MMAR-01	0,508	0,709490	0,000004	0,443	0,709440	0,000008	0,832	0,709364	0,000006
	MMAR-02	0,556	0,709272	0,000004	0,324	0,709043	0,000009	0,636	0,709010	0,000005
	MMAR-03	0,573	0,709243	0,000004	0,603	0,709318	0,000002	0,655	0,709070	0,000003
	MMAR-04	0,491	0,709134	0,000003	0,549	0,709216	0,000009	0,559	0,708877	0,000004
	MSIB-01	0,415	0,709524	0,000002	0,384	0,709511	0,000007	0,821	0,709474	0,000006
	MSIB-02	0,503	0,709717	0,000006	0,389	0,709652	0,000006	0,696	0,709575	0,000010
Barreiras	BBNV-01	0,018	0,723945	0,000004	0,019	0,727300	0,000009	0,018	0,727098	0,000009
	BBNV-02	0,095	0,723546	0,000007	0,010	0,726475	0,000019	0,009	0,727153	0,000003
	BBNV-03	0,011	0,723960	0,000006	0,010	0,724325	0,000048	0,011	0,726510	0,000017
	BBNV-04	0,014	0,724049	0,000005	0,022	0,727211	0,000002	0,014	0,726264	0,000008
	BBNV-05	0,023	0,724130	0,000003	0,008	0,727252	0,000007	0,020	0,726250	0,000009
	BBNV-06	0,079	0,720777	0,000002	0,009	0,727219	0,000005	0,007	0,727039	0,000015
	BSIB-01	0,017	0,724175	0,000004	0,014	0,717261	0,000007	0,015	0,722907	0,000021
	BSIB-02	0,160	0,727014	0,000004	0,033	0,723284	0,000017	0,031	0,718025	0,000006
	BSIB-03	0,078	0,722076	0,000006	0,011	0,718633	0,000006	0,024	0,715470	0,000010
Período Mais Chuvoso										
Nov-Dez/2013				Jan-Fev/2013			Mar-Abr/2013			
Poço	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	
Marajó	MMAR-01	0,591	0,709214	0,000006	0,485	0,708588	0,000009	0,470	0,709454	0,000008
	MMAR-02	0,534	0,708929	0,000010	0,601	0,709036	0,000007	0,547	0,709310	0,000011
	MMAR-03	0,629	0,709057	0,000011	0,713	0,709107	0,000010	0,551	0,709276	0,000009
	MMAR-04	0,519	0,708846	0,000004	0,671	0,709036	0,000011	0,449	0,709180	0,000009
	MSIB-01	0,410	0,709066	0,000008	0,336	0,708979	0,000005	0,356	0,709409	0,000007
	MSIB-02	0,440	0,709246	0,000008	0,375	0,709624	0,000010	0,352	0,709539	0,000006
Barreiras	BBNV-01	0,022	0,708490	0,000011	0,169	0,707891	0,000008	0,018	0,708442	0,000013
	BBNV-02	0,012	0,707182	0,000012	0,008	0,708984	0,000014	0,013	0,707583	0,000015
	BBNV-03	0,008	0,707489	0,000008	0,072	0,707193	0,000018	0,008	0,707785	0,000005
	BBNV-04	0,009	0,707063	0,000013	0,014	0,708527	0,000011	0,016	0,708599	0,000006
	BBNV-05	0,009	0,707684	0,000017	0,029	0,707743	0,000017	0,009	0,707624	0,000019
	BBNV-06	0,010	0,708545	0,000012	-	0,708426	0,000012	0,012	0,708665	0,000012
	BSIB-01	0,017	0,708548	0,000011	0,012	0,707623	0,000011	0,011	0,708187	0,000006
	BSIB-02	0,032	0,707573	0,000007	0,021	0,708335	0,000010	0,035	0,708163	0,000006
	BSIB-03	0,011	0,709374	0,000008	0,009	0,709849	0,000017	0,013	0,708899	0,000003

### 5.2.2 Razão Isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

A caracterização isotópica do estrôncio (razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) apresentou dois padrões bem delimitados que permitem diferenciar os aquíferos Barreiras e Marajó (Figura 26). De tal forma, no período menos chuvoso as razões isotópicas do Sr no aquífero Barreiras são maiores (mais radiogênicas) e se aproximam do membro final da rocha da Formação Barreiras, cuja composição isotópica é mais radiogênica; ainda no período menos chuvoso as razões isotópicas do Sr no aquífero Marajó foram bem menores (menos radiogênicas) comparadas às do aquífero Barreiras e se aproximam da razão isotópica do membro final dos macrófósseis carbonáticos da Formação Pirabas.

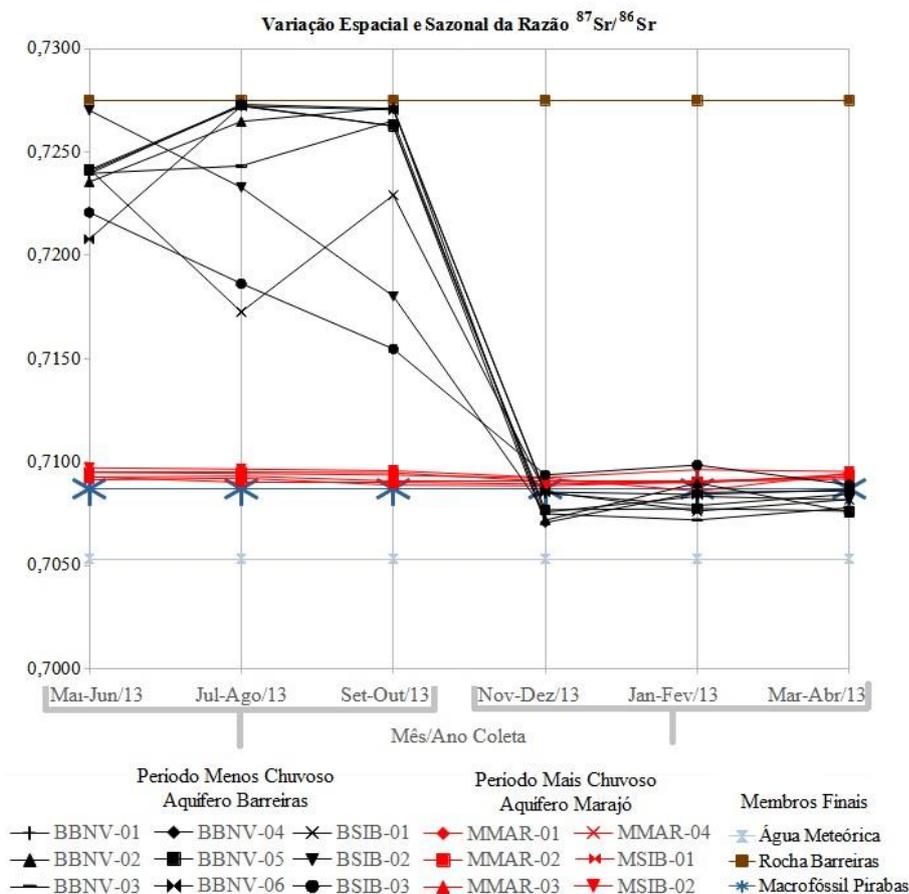


Figura 26 - Gráfico da variação sazonal das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras e membros finais da rocha da Formação Barreiras, água meteórica e macrofóssil da Formação Pirabas.

No período mais chuvoso há uma acentuada diminuição das razões isotópicas do Sr no aquífero Barreiras, cujas razões se aproximam do membro final da água meteórica (chuva) e das razões do aquífero Marajó; ainda no período mais chuvoso, as razões isotópicas no aquífero Marajó apresentam pequenas alterações.

Considerando a sazonalidade, ao comparar as razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dos dois aquíferos se confirma que há entre estes uma diferença estatisticamente significativa (Menos Chuvoso: Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=32,7$ ; P-Valor = 0,000004309; Mais Chuvoso: Teste de *Kruskal-Wallis*  $H=24,06$  p-valor=0,0002113; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7342$ , p-valor=0,003555). É importante ressaltar que no período menos chuvoso as razões do aquífero Barreiras são maiores (mais radiogênicas), enquanto no período mais chuvoso as razões isotópicas do aquífero Marajó são maiores (levemente mais radiogênicas). Ver na figura 27.

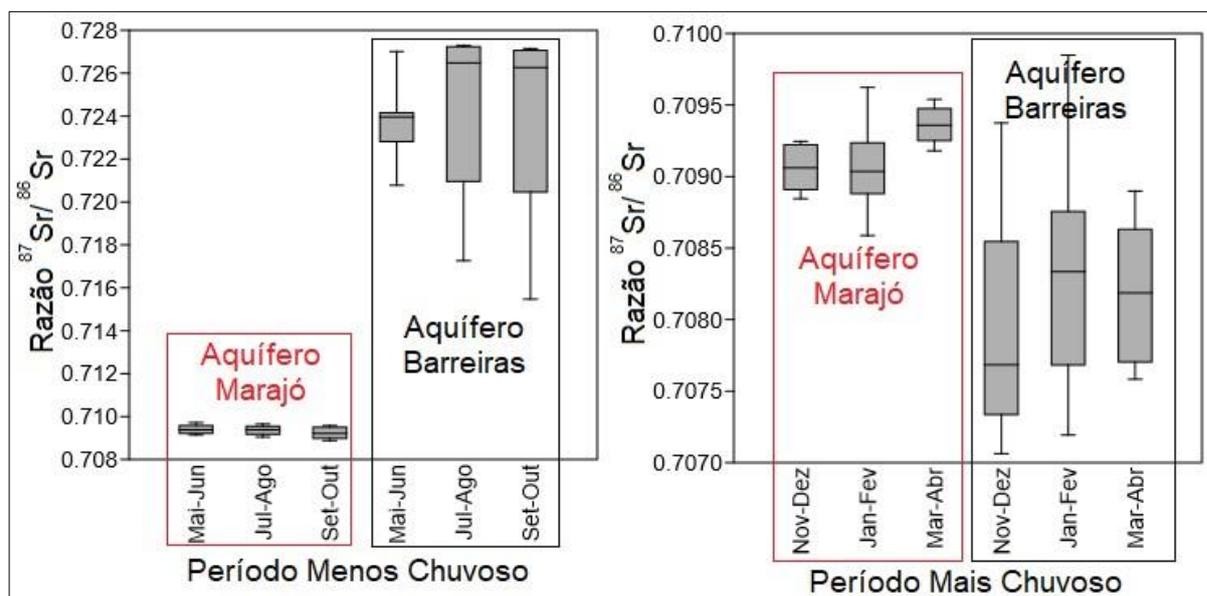


Figura 27 - Gráfico *Box-Plot* da variação das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Barreiras.

A razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  do aquífero marajó no período menos chuvoso variou de 0,708877 a 0,709717, com média de  $0,709329 \pm 0,000238$  (Desvio Padrão). No período mais chuvoso a razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variou de 0,708588 a 0,709624, com média  $0,709161 \pm 0,000257$  (Desvio Padrão). Ao comparar estatisticamente as razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  do período chuvoso em relação ao período menos chuvoso no aquífero Marajó, obtém-se uma diferença estatisticamente significativa pela análise de variância (ANOVA  $F=2,631$  p-valor=0,04357). Portanto, no período menos chuvoso as razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  são maiores (mais radiogênicas) comparadas às razões do período mais chuvoso. O que pode ser uma evidência da variação sazonal na razão isotópica dentro do aquífero Marajó (Figura 28).

O aquífero Barreiras apresentou as razões isotópicas mais radiogênicas no período menos chuvoso. No qual, a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variou de 0,715470 a 0,727300, com média de  $0,724050 \pm 0,003405$  (Desvio Padrão) e mediana de 0,724175. No período mais chuvoso, o aquífero Barreiras apresentou as razões isotópicas menos radiogênicas. De tal forma, a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variou de 0,707063 a 0,709849 com média  $0,708165 \pm 0,000683$  (Desvio Padrão) e mediana 0,708187. Claramente visível, a variação sazonal da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  no aquífero Barreiras é estatisticamente significativa de acordo com o teste de *Kruskal-Wallis* ( $H=40,58$  p-valor=0,000000114; Teste de normalidade *Shapiro-Wilk*  $W=0,7342$ , p-valor=0,003555).

Na figura 29 está representado o diagrama de mistura proposto por Faure (1986), no qual está plotado a razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  contra  $1/[\text{Sr}]$  (ppb). No diagrama estão representados todas as amostras analisadas neste trabalho, a compilação dos dados dos trabalhos anteriores relevantes para interpretação e os valores de membros finais e *backgrounds* como a água

meteórica ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,705316$ ; Oliveira Filho 2012), rocha da Formação Barreiras ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,727492$ ; Oliveira Filho 2012), macrofósseis da Formação Pirabas ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,708700$ ; Belúcio 2000) e *background* do aquífero Pirabas ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,705316$ ; Oliveira Filho 2012).

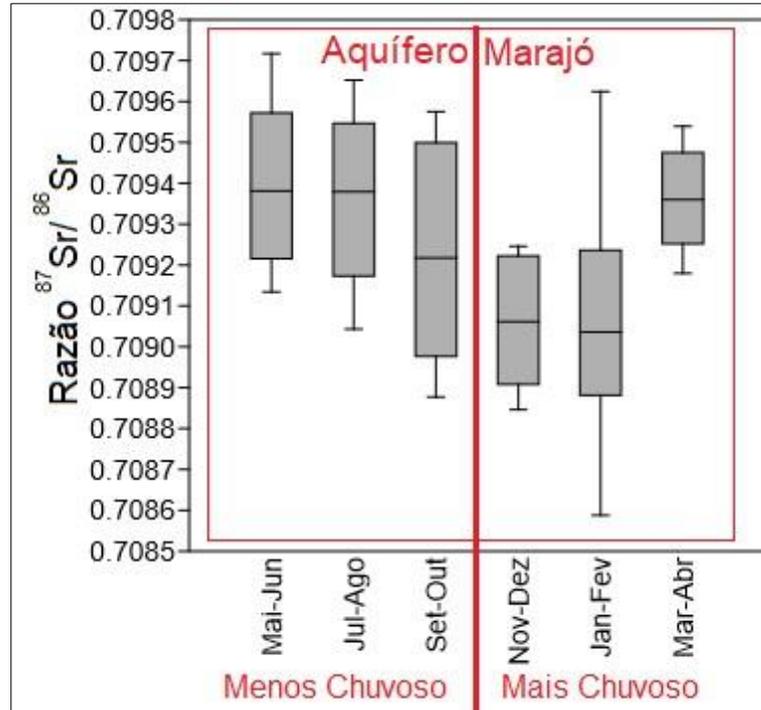


Figura 28 - Gráfico Box-Plot da variação sazonal das razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nas águas subterrâneas no aquífero Marajó.

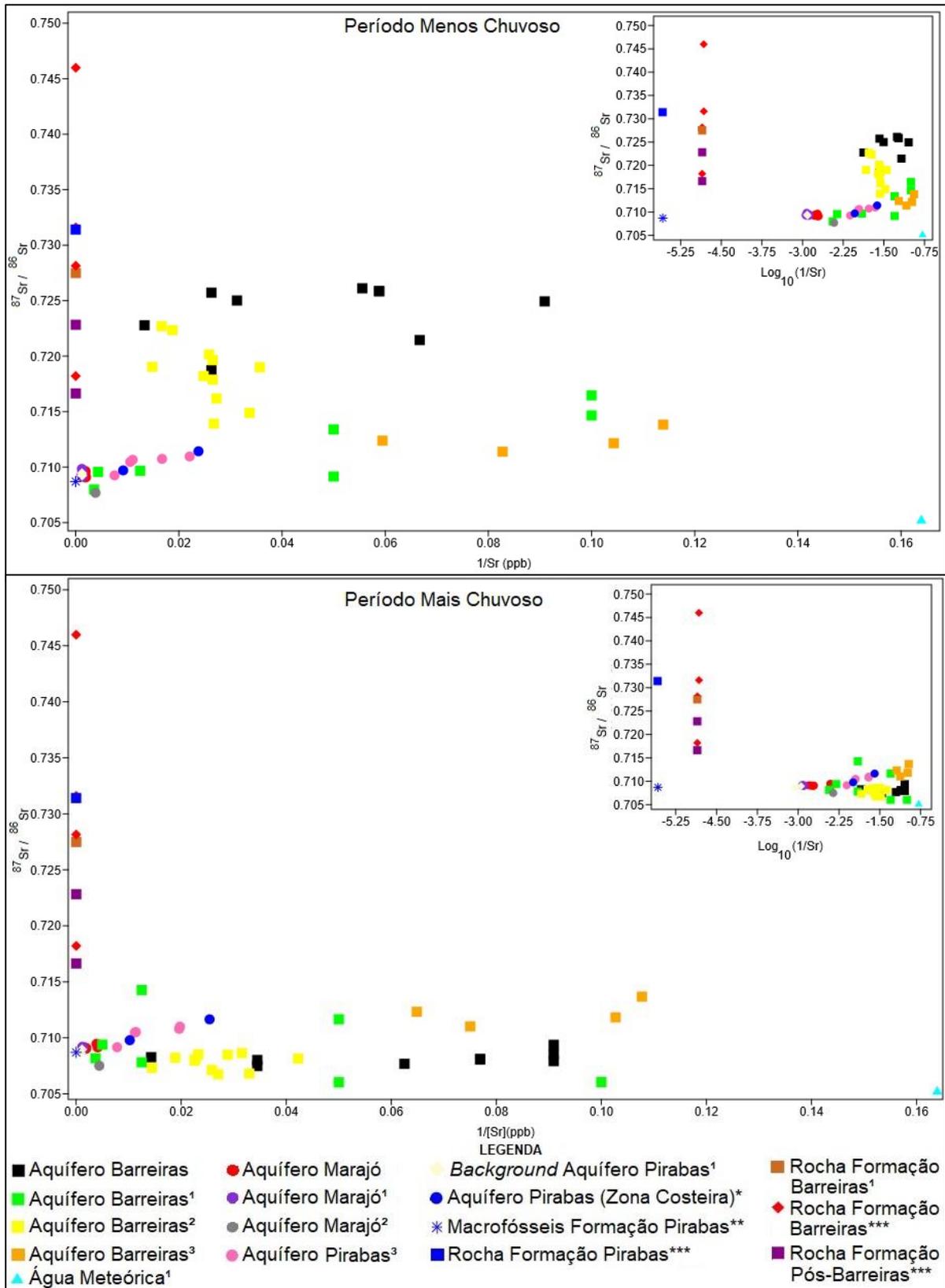


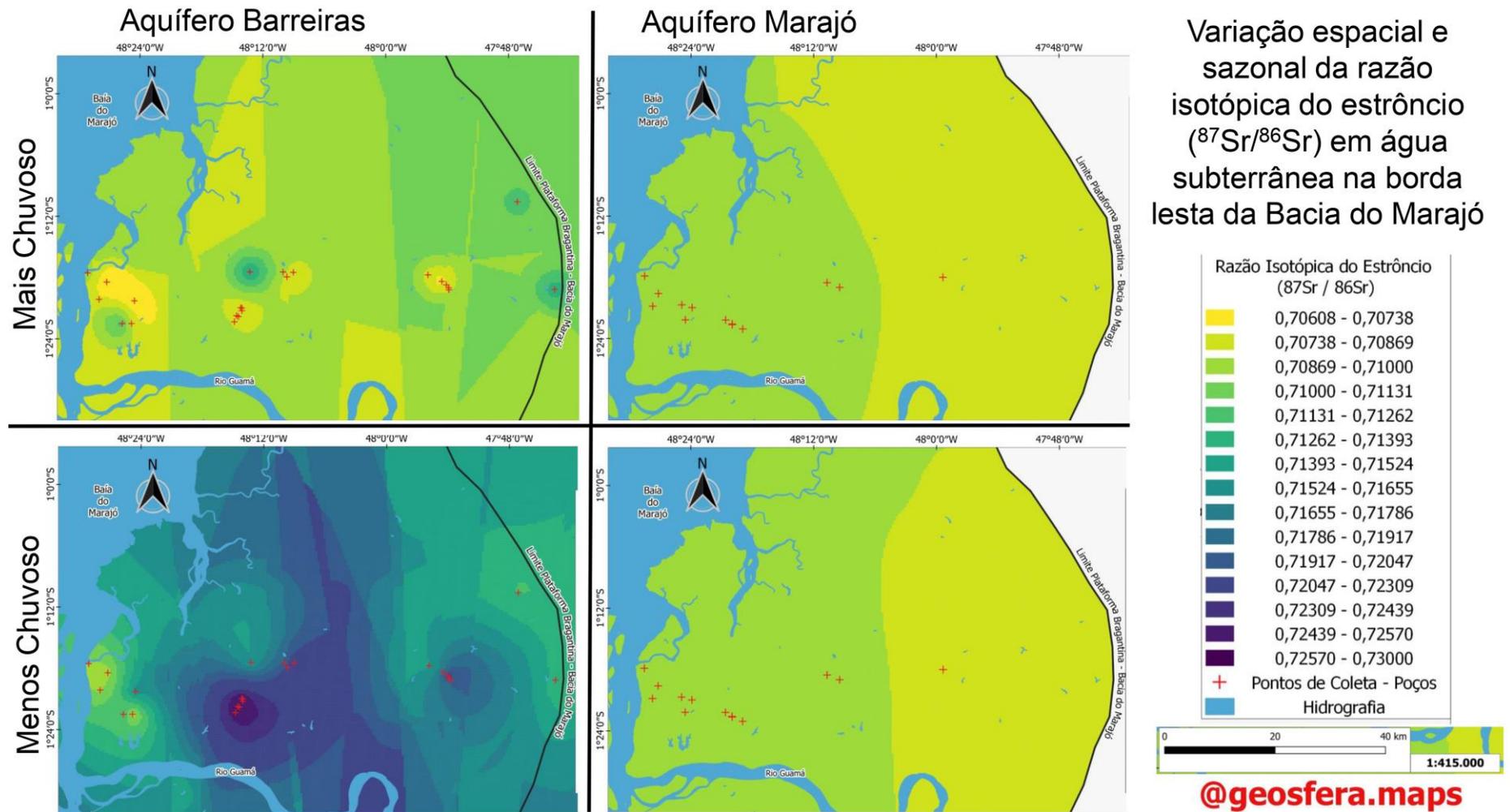
Figura 29 - Diagrama de mistura da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  contra o inverso da concentração de estrôncio ( $1/\text{Sr}$ ) dos aquíferos Marajó, Barreiras e Pirabas nos períodos menos chuvoso e mais chuvoso. 1-Oliveira Filho (2012), 2-Silva(2015), Oliveira (2019), \*Bordalo (2001), \*\*Belúcio(2001), \*\*\*Moizinho *et al.*(2022)

Além destes, o estudo recente de Moizinho *et al.* (2022) obteve resultados que foram incluídos neste estudo por serem valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  regionais originários das formações aqui investigadas que podem auxiliar nas interpretações. Estas são: formação Pós-Barreiras na borda Leste da Bacia do Marajó ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,71664 – 0,72282), Formação Barreiras na borda Leste da Bacia do Marajó ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,72751 – 0,74599), Formação Barreiras na Plataforma Bragantina ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0,71821 – 0,7316) e por último Formação Pirabas na Plataforma Bragantina ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,73141$ ). Os valores estão plotados na figura 29.

O diagrama de mistura (Fig. 29) ilustra a variação sazonal das razões isotópicas do estrôncio nos diferentes aquíferos representados, principalmente do aquífero Barreiras. Adicionalmente, o diagrama também permite evidenciar os membros finais como origem das variações isotópicas e suas influências em diversas proporções. Uma vez que, este diagrama permite rastrear e calcular a proporção mistura de dois membros finais para obtenção de um ponto amostral estabelecido em linha reta entre os membros finais.

No canto direito de cada diagrama de mistura do respectivo período, está representado o diagrama com a razão isotópica contra o logaritmo do inverso da concentração de estrôncio ( $\text{Log}_{10}(1/[\text{Sr}])$ ). Cujos objetivos são ilustrar detalhadamente a distância logarítmica entre as concentrações de Sr nas águas, nas rochas e microfósseis carbonáticos. E principalmente a diferença entre as rochas com deposição continental e marinha e a provável diferença dentro das rochas carbonáticas entre a fração dos carbonatos (Macrofósseis) e a fração siliciclástica. Na qual a fração carbonática é mais rica em estrôncio e a razão isotópica é menos radiogênica e a fração siliciclástica é mais pobre em estrôncio e apresenta razão isotópica mais radiogênica pela origem continental.

Semelhantemente, na figura 30, os mapas geoestatísticos gerados com *krigagem* ordinária apresentam o padrão de variação sazonal da razão isotópica do estrôncio nos aquíferos. Adicionalmente, os mapas apresentam o padrão de variação espacial que se apresenta mais heterogêneo no aquífero Barreiras e mais homogêneo no aquífero Marajó.



Mapa de interpolação por krigagem esférica. Santos Júnior(2021); Oliveira Filho (2012);Oliveira & Galarza (2013); Silva (2015); Silva & Galarza (2017); Oliveira (2019).  
 Figura 30 - Variação sazonal e espacial da razão isotópica do estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) nas águas subterrâneas de aquíferos rasos e profundos no Nordeste do Pará.

## 5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

### 5.3.1 Correlação de Spearman

A seguir na tabela 06 e 07 estão apresentadas as matrizes de correlação de *Spearman* (coeficiente  $\rho$ ) dos aquíferos Barreiras e Marajó, respectivamente. Ambas apresentam as matrizes nos períodos menos e mais chuvoso para melhor identificar variações sazonais. É necessário ressaltar que devido à natureza não paramétrica dos dados deste trabalho, optou-se por realizar a análise de correlação de *Spearman* que estabelece uma relação entre as variáveis não necessariamente linear como acontece na correlação de *Pearson*.

Tabela 06 – Matriz de Correlação de *Spearman* do aquífero Barreiras nos períodos menos e mais chuvoso.

Matriz de Correlação de <i>Spearman</i> do Aquífero Barreiras																
Período Menos Chuvoso																
	Prof.	pH	Cond.	STD	Ferro T.	Sílica	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Prof.																
pH	0,11															
Cond.	0,05	-0,27														
STD	-0,34	-0,35	<b>0,72</b>													
Ferro T.	0,06	<b>0,46</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,56</b>												
Sílica	<b>0,55</b>	0,06	0,16	-0,13	-0,01											
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,15	<b>0,43</b>	0,16	-0,14	0,02	0,18										
Cl <sup>-</sup>	-0,13	-0,18	<b>0,58</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,40</b>	-0,17	-0,12									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,24	<b>-0,43</b>	<b>0,74</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,62</b>	0,02	-0,15	<b>0,61</b>								
Na <sup>+</sup>	-0,07	0,14	<b>0,51</b>	<b>0,55</b>	-0,27	-0,12	0,14	<b>0,80</b>	<b>0,38</b>							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,05	0,33	<b>-0,48</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,69</b>	0,04	0,06	<b>-0,37</b>	<b>-0,63</b>	-0,23						
Mg <sup>2+</sup>	0,12	-0,04	<b>0,62</b>	<b>0,59</b>	-0,25	0,09	0,23	<b>0,55</b>	<b>0,48</b>	<b>0,51</b>	-0,33					
K <sup>+</sup>	-0,01	0,12	<b>0,54</b>	<b>0,65</b>	-0,19	0,03	0,17	<b>0,67</b>	<b>0,42</b>	<b>0,78</b>	-0,17	<b>0,70</b>				
Ca <sup>2+</sup>	-0,14	<b>0,41</b>	0,28	<b>0,37</b>	-0,07	-0,21	0,30	0,28	0,06	<b>0,62</b>	0,05	<b>0,49</b>	<b>0,73</b>			
Sr <sup>2+</sup>	-0,20	0,11	0,15	<b>0,48</b>	-0,11	-0,17	-0,11	0,32	0,28	0,35	0,02	0,25	<b>0,45</b>	<b>0,55</b>		
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	-0,13	<b>-0,47</b>	0,27	0,32	<b>-0,39</b>	0,29	-0,15	0,07	<b>0,57</b>	-0,29	<b>-0,39</b>	0,03	-0,21	<b>-0,51</b>	0,00	

Período Mais Chuvoso																
	Prof.	pH	Cond.	STD	Ferro T.	Sílica	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Prof.																
pH	0,15															
Cond.	0,07	-0,30														
STD	-0,37	<b>-0,39</b>	<b>0,68</b>													
Ferro T.	<b>0,40</b>	0,35	<b>-0,36</b>	-0,26												
Sílica	<b>0,50</b>	-0,14	0,33	-0,02	-0,09											
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,23	<b>0,46</b>	0,30	0,13	0,01	0,35										
Cl <sup>-</sup>	-0,27	0,00	<b>0,66</b>	<b>0,71</b>	-0,33	0,17	0,21									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,23	<b>-0,47</b>	<b>0,71</b>	<b>0,70</b>	<b>-0,59</b>	<b>0,36</b>	0,12	<b>0,70</b>								
Na <sup>+</sup>	-0,27	0,01	<b>0,43</b>	<b>0,63</b>	-0,15	-0,14	0,04	<b>0,82</b>	<b>0,50</b>							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,11	0,26	<b>-0,40</b>	-0,26	<b>0,73</b>	-0,14	-0,15	<b>-0,36</b>	<b>-0,62</b>	-0,34						
Mg <sup>2+</sup>	0,15	-0,25	<b>0,52</b>	<b>0,59</b>	-0,06	0,32	<b>0,39</b>	<b>0,36</b>	<b>0,53</b>	0,26	-0,35					
K <sup>+</sup>	-0,29	-0,10	<b>0,57</b>	<b>0,82</b>	-0,30	-0,11	0,12	<b>0,73</b>	<b>0,63</b>	<b>0,70</b>	-0,29	<b>0,43</b>				
Ca <sup>2+</sup>	0,04	<b>0,51</b>	0,23	<b>0,41</b>	0,18	-0,16	<b>0,47</b>	<b>0,45</b>	0,06	<b>0,45</b>	0,03	0,28	<b>0,55</b>			
Sr <sup>2+</sup>	-0,09	0,21	0,27	<b>0,48</b>	-0,07	0,11	0,19	<b>0,59</b>	<b>0,40</b>	<b>0,37</b>	0,02	0,25	<b>0,48</b>	<b>0,62</b>		
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	-0,27	0,02	-0,07	0,05	-0,04	-0,34	0,00	-0,20	-0,18	-0,13	0,07	0,06	0,03	0,02	-0,26	

Correlação	Intervalo	Positiva	Negativa
Muito Forte	0,9-1,0		
Forte	0,8-0,89		
Moderada	0,7-0,79		
Moderada	0,6-0,69		
Fraca	≤0,59		

No aquífero Barreiras (tabela 06) as correlações obtidas no período menos chuvoso foram de maneira geral semelhantes às aquelas obtidas no período mais chuvoso, exceto que apresentou algumas diferenças. Uma das principais diferenças são as correlações estabelecidas pela razão <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr com o pH, ferro total, nitrato, sulfato e cálcio apenas no período menos chuvoso. Isto pode sugerir que no período menos chuvoso a origem da razão <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr seja a Formação Barreiras, uma vez que as águas apresentam uma razão isotópica do

estrôncio mais radiogênica no período menos chuvoso, sendo a dissolução das rochas da Formação Barreiras a origem do Sr mais radiogênico que apresenta correlação com os demais parâmetros citados. Ao passo que no período mais chuvoso a influência da recarga das águas meteóricas é maior e é nesse período que as águas das chuvas influenciam na variação sazonal isotópica que ocorre. Este fato é corroborado pela existência de correlação entre cloreto e sódio no aquífero Barreiras apenas no período mais chuvoso, sendo a água da chuva predominantemente de fácies hidroquímica cloretada sódica.

Tabela 07 – Matriz de correlação de Spearman do aquífero Marajó nos períodos menos e mais chuvoso.

Matriz de Correlação de Spearman do Aquífero Marajó															
Período Menos Chuvoso															
Prof.	pH	Cond.	STD	Ferro T.	Sílica	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Prof.	0,53														
pH	0,13	0,60													
Cond.	0,62	0,33	0,32												
STD	-0,75	-0,31	-0,14	-0,85											
Ferro T.	0,60	0,38	0,29	0,96	-0,84										
Sílica	0,63	0,34	0,27	0,96	-0,90	0,93									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,51	0,03	-0,28	0,26	-0,14	0,19	0,18								
Cl <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,58	0,42	0,17	0,24	-0,23	0,18	0,18	0,48	0,00						
Na <sup>+</sup>	0,31	0,48	0,29	-0,16	0,10	-0,12	-0,24	0,17	0,00	0,44					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,13	-0,33	-0,46	0,37	-0,23	0,34	0,38	0,22	0,00	-0,30	-0,73				
Mg <sup>2+</sup>	0,12	-0,41	-0,65	0,17	-0,35	0,16	0,21	0,22	0,00	0,02	-0,45	0,62			
K <sup>+</sup>	0,19	0,70	0,92	0,19	-0,13	0,16	0,21	-0,29	0,00	0,28	0,36	-0,56	-0,60		
Ca <sup>2+</sup>	0,20	0,53	0,90	0,14	-0,10	0,10	0,11	-0,21	0,00	0,17	0,46	-0,69	-0,72	0,87	
Sr <sup>2+</sup>	0,35	0,16	0,54	0,45	-0,56	0,44	525,00	-0,24	0,00	0,09	0,05	-0,30	-0,18	0,59	0,58
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr															

Período Mais Chuvoso															
Prof.	pH	Cond.	STD	Ferro T.	Sílica	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
Prof.	0,51														
pH	0,16	0,46													
Cond.	0,61	0,35	0,46												
STD	-0,69	-0,39	-0,12	-0,71											
Ferro T.	0,01	-0,22	-0,51	0,26	-0,20										
Sílica	0,54	0,29	0,25	0,92	-0,71	0,45									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,14	-0,23	-0,46	0,24	-0,03	0,71	0,25								
Cl <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,79	0,32	0,31	0,68	-0,63	0,01	0,51	0,28	0,00						
Na <sup>+</sup>	0,15	0,18	-0,27	-0,38	0,10	-0,31	-0,52	0,19	0,00	0,16					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,31	-0,11	-0,26	0,63	-0,45	0,83	0,74	0,69	0,00	0,39	-0,28				
Mg <sup>2+</sup>	0,70	0,39	0,30	0,90	-0,73	0,38	0,93	0,24	0,00	0,69	-0,32	0,71			
K <sup>+</sup>	0,30	0,69	0,76	0,58	-0,34	-0,15	0,52	-0,30	0,00	0,25	-0,31	0,07	0,57		
Ca <sup>2+</sup>	0,36	0,71	0,76	0,14	-0,05	-0,75	-0,05	-0,58	0,00	0,28	0,17	-0,55	0,11	0,64	
Sr <sup>2+</sup>	0,21	-0,05	0,20	0,29	-0,43	-0,21	0,28	-0,21	0,00	0,15	0,01	0,14	0,26	0,24	0,07
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr															

Correlação	Intervalo	Positiva	Negativa
Muito Forte	0,9-1,0	Dark Blue	Dark Red
Forte	0,8-0,89	Blue	Red
Moderada	0,7-0,79	Light Blue	Light Red
Moderada	0,6-0,69	Very Light Blue	Very Light Red
Fraca	≤0,59	White	White

No aquífero Marajó as correlações significativas estabelecidas também se mostraram semelhantes em ambos os períodos sazonais de maneira geral. Exceto pelas correlações estabelecidas pela razão <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr com a condutividade elétrica, ferro total, cálcio e estrôncio apenas no período menos chuvoso. Estas correlações da razão <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, principalmente as com o cálcio e o estrôncio podem indicar a origem da razão isotópica associada à composição

carbonática da Formação Marajó. Ao mesmo tempo que a ausência de correlação significativa no período mais chuvoso pode indiciar a contribuição da recarga que ocorre em maiores proporções neste período.

### 5.3.2 Análise Discriminante

A análise discriminante é uma técnica da estatística multivariada na qual é realizada a análise de um conjunto de variáveis de grupos de amostras previamente conhecidos com o objetivo de discriminar os grupos nos quais as amostras se enquadram. Desta forma, as classificações de cada inseridas pelo analista são confrontadas pelo teste estatístico que expõe a sua própria classificação. Portanto cabe ao analista interpretar os resultados e rejeitar ou aceitar a classificação ponto a ponto. No gráfico da figura 31 está representado o resultado da discriminação dos grupos. Há claramente a segregação entre os aquíferos Barreiras que agrupou juntamente à água meteórica, provavelmente por ser a origem da recarga das águas superficiais.

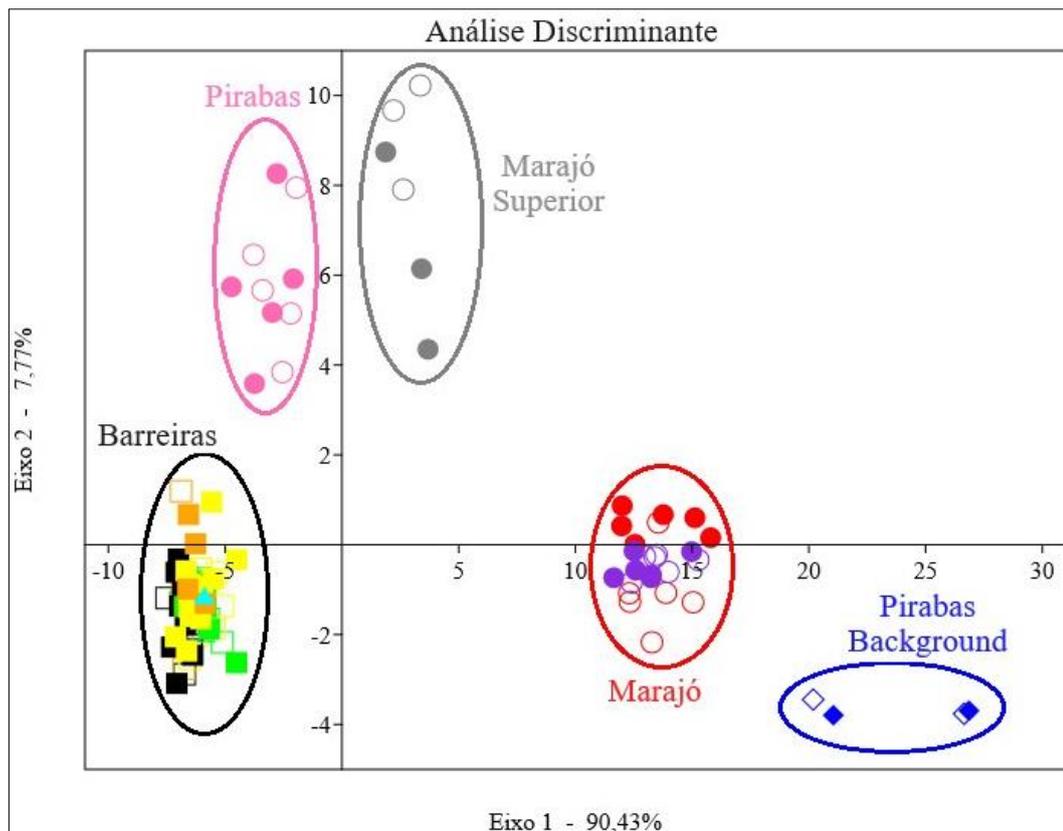


Figura 31 - Gráfico da análise discriminante dos aquíferos Barreiras, Marajó, Pirabas, *Background* do Pirabas e água meteórica.

Também há uma clara separação entre as águas profundas, o aquífero Pirabas agrupou separadamente do *Background* do Pirabas (*background* aqui se refere ao local em que a formação Pirabas aflora em Capanema e, portanto, tem uma caracterização do aquífero mais

próxima à das formações carbonatadas homônima Pirabas).

O aquífero Marajó agrupou em dois grupos em que a principal diferença entre os dois é a profundidade, portanto as águas mais profundas (em torno de 250 m) são classificadas como Marajó e as mais rasas (em torno de 100 m) são classificadas como Marajó Superior.

A seguir na tabela 08 estão apresentadas as classificações atribuídas ponto a ponto de cada aquífero e a classificação obtida pela análise discriminante para os períodos menos e mais chuvoso.

Tabela 08 - Classificação da Análise Discriminante dos aquíferos Barreiras, Marajó, Pirabas e água meteórica nos períodos menos e mais chuvoso.

(continua)

Ponto	Período Menos Chuvoso		Período Mais Chuvoso	
	Grupo Dado	Classificação	Grupo Dado	Classificação
BBNV-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BBNV-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BBNV-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BBNV-04	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BBNV-05	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BBNV-06	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSIB-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSIB-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSIB-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BB-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BB-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BB-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BA-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BA-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BA-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BNB	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BCAS-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BCAS-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BCAS-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BCAS-04	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BCAS-05	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-01	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-02	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-04	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-05	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSMP-06	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSF-02	Barreiras	Barreiras	<b>Barreiras*</b>	<b>Meteórica*</b>
BSF-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BSF-04	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
BIA-03	Barreiras	Barreiras	Barreiras	Barreiras
ACH	Meteórica	Meteórica	Meteórica	Meteórica

(conclusão)

Ponto	Período Menos Chuvoso		Período Mais Chuvoso	
	Grupo Dado	Classificação	Grupo Dado	Classificação
MMAR-01	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
MMAR-02	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
MMAR-03	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
MMAR-04	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
MSIB-01	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
MSIB-02	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PB-01	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PB-02	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PB-03	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PA-01	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PA-02	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PA-03	Marajó	Marajó	Marajó	Marajó
PSCAS-01	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior
PSCAS-01	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior
PSCAS-01	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior	Marajó Superior
PC-01	Pirabas <i>Background</i>	Pirabas Background	Pirabas <i>Background</i>	Pirabas <i>Background</i>
PC-02	Pirabas <i>Background</i>	Pirabas Background	Pirabas <i>Background</i>	Pirabas <i>Background</i>
PsSF-01	Pirabas	Pirabas	Pirabas	Pirabas
PiIA-01	Pirabas	Pirabas	Pirabas	Pirabas
PsIA-02	Pirabas	Pirabas	Pirabas	Pirabas
PsIA-04	Pirabas	Pirabas	Pirabas	Pirabas
PsIA-05	Pirabas	Pirabas	Pirabas	Pirabas

\* Classificações equivocadas

Todas as classificações previamente inseridas concordaram com as classificações realizadas pela análise discriminante tanto no período menos chuvoso quanto no mais chuvoso. Exceto por uma amostra do Barreiras que foi classificada como água meteórica no período mais chuvoso, provavelmente pela semelhança hidrogeoquímica das águas.

### 5.3.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise dos componentes principais é uma técnica da estatística multivariada em que as variáveis inseridas na análise com o objetivo de verificar quais dentre tais variáveis têm uma maior influência na variância dos dados e, portanto, é mais influente para separação entre os grupos. Desta forma, a PCA além de identificar quais variáveis apresentam maior influência na diferenciação das amostras, também permite agrupar as amostras pela afinidade entre os parâmetros analisados. A seguir, o gráfico da análise de componentes principais está representado na figura 32, no qual as amostras estão plotadas e o agrupamento destas que ocorreu de maneira similar ao da análise discriminante. A PCA diferenciou o aquífero Barreiras agrupando-o com as águas meteóricas, o aquífero Marajó, e o aquífero Marajó

superior, o aquífero Pirabas e o *Background* do aquífero Pirabas. Na tabela 09 estão resumidos os autovalores das duas componentes principais e a porcentagem de variância que cada componente explica.

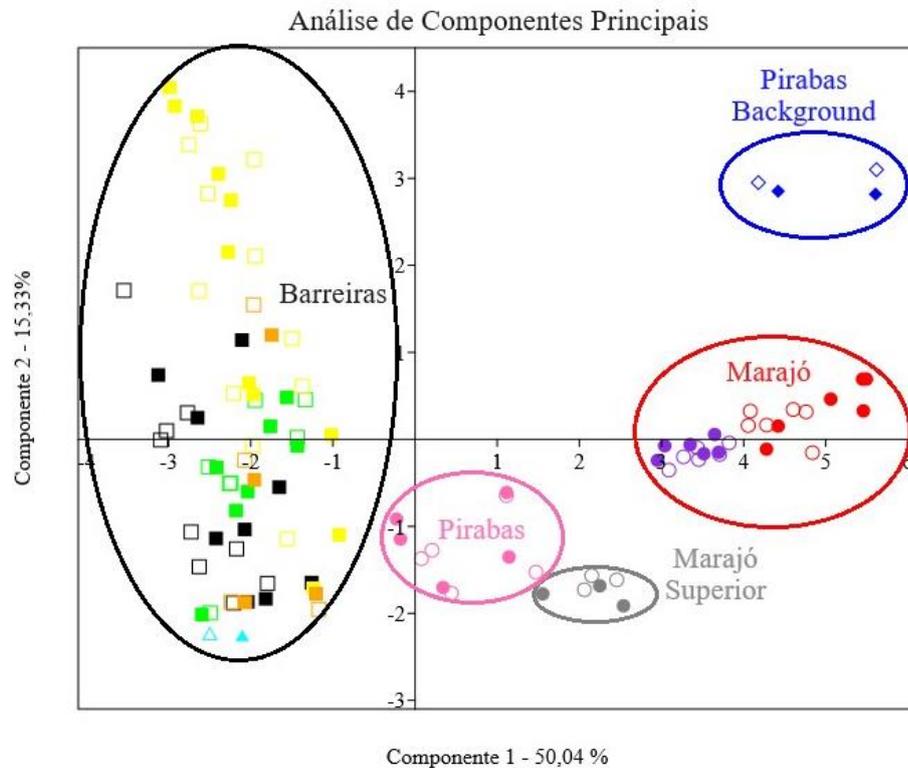


Figura 32 - Gráfico da análise de componentes principais com os pontos plotados e agrupados em cada aquífero Barreiras, Marajó, Pirabas, *Background* do Pirabas e água meteórica.

Tabela 09 - Parâmetros resultantes da Análise de Componentes Principais.

Componente	Autovalor	% Variância
1	8,01	50,04
2	2,45	15,33

A seguir, na figura 33 o gráfico PCA estão plotados os autovalores de cada uma das variáveis de acordo com a contribuição nas duas componentes principais. E na tabela 10 estão apresentados a contribuição do coeficiente de correlação de cada variável em relação componente 01 e a componente 02. As variáveis com maiores contribuições na componente 01 (que explica 50 % da variância), na ordem decrescente é  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH,  $\text{Sr}^{2+}$ , STD, condutividade e profundidade. As variáveis com maior contribuição na componente 02 (que explica 15,3 % da variância), na ordem decrescente são  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{NO}_3^-$ .

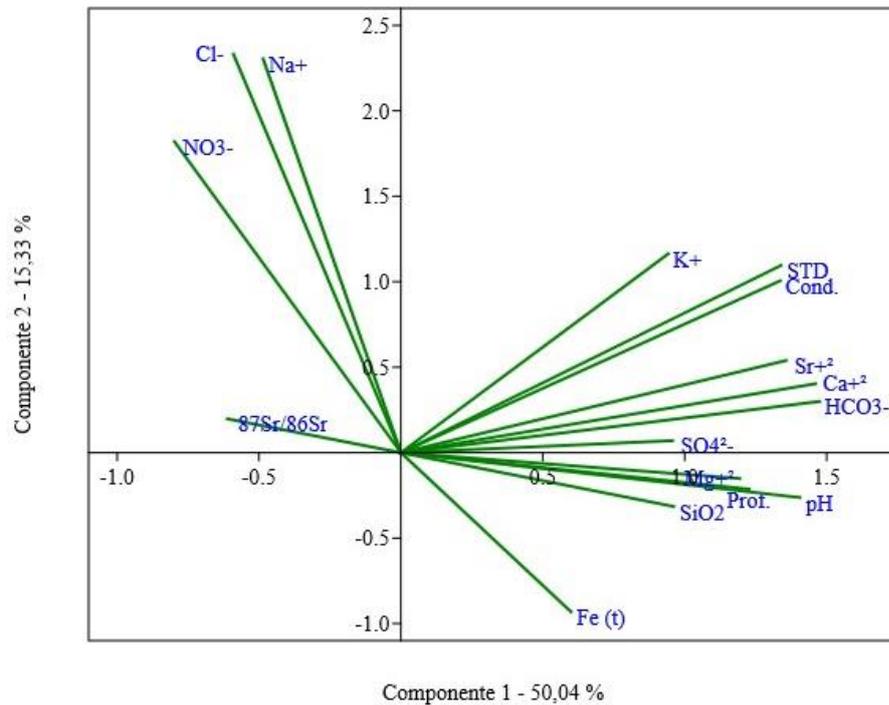


Figura 33 - Gráfico da análise de componentes principais com as variáveis plotadas.

Tabela 10 - Contribuição do coeficiente de correlação de cada variável da Análise de Componentes Principais nas duas principais componentes.

Variável	Correlação	
	Componente 1	Componente 2
Prof.	<b>0,79</b>	-0,07
pH	<b>0,91</b>	-0,09
Cond.	<b>0,86</b>	<b>0,36</b>
STD	<b>0,86</b>	<b>0,39</b>
Ferro T.	0,38	-0,33
Sílica	<b>0,62</b>	-0,11
$\text{HCO}_3^-$	<b>0,95</b>	0,11
$\text{Cl}^-$	-0,39	<b>0,83</b>
$\text{NO}_3^-$	-0,52	<b>0,65</b>
$\text{Na}^+$	-0,32	<b>0,82</b>
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0,61</b>	0,02
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0,76</b>	-0,05
$\text{K}^+$	0,61	<b>0,42</b>
$\text{Ca}^{2+}$	<b>0,94</b>	0,14
$\text{Sr}^{2+}$	<b>0,87</b>	0,19
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	-0,40	0,07

## 5.4 MODELAGEM DE MISTURA ENTRE OS AQUÍFEROS

### 5.4.1 Modelagem Utilizando Geoquímica Isotópica do Estrôncio

Os resultados da modelagem geoquímica estão resumidos na Tabela 11 e nas figuras 34 e 35 para o Aquífero Barreiras (valores representados pelo segundo cenário da modelagem) e 36 e 37 para o Aquífero Marajó (valores representados pelo terceiro cenário da modelagem). A modelagem foi calculada para os pontos deste trabalho e aqueles que foram compilados para obtenção de um número amostral maior e mais representativo da realidade (Ver pontos compilados no Apêndice A).

Tabela 11 - Proporção de mistura de águas nos aquíferos Barreiras e Marajó.

Reservatório	Estatística	Menos Chuvoso		Mais Chuvoso	
		% Água Meteórica	% Barreiras % Marajó	% Água Meteórica	% Barreiras % Marajó
Aquífero Barreiras	Mediana*	82,65%	17,35%	93,82%	6,18%
	Mínimo*	29,82%	3,08%	28,56%	2,80%
	Máximo*	96,92%	70,18%	97,20%	71,44%
Aquífero Marajó	Média		31,3% 68,7%	36,2%	63,8%
	Mínimo		8,1% 48,3%	16,3%	32,3%
	Máximo		51,7% 91,9%	67,7%	83,7%

\* Valores calculados apenas com os pontos que contém concentrações de cloreto e nitrato abaixo do limite de contaminação estabelecido.

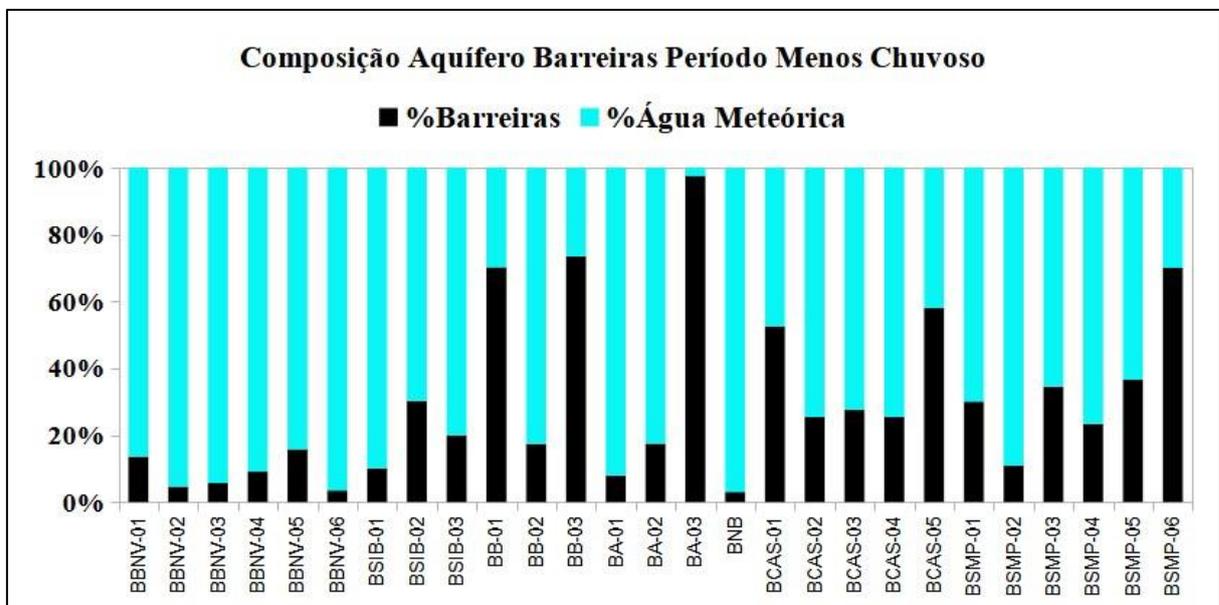


Figura 34 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Barreiras a partir da recarga das águas meteóricas nos períodos menos e mais chuvoso.

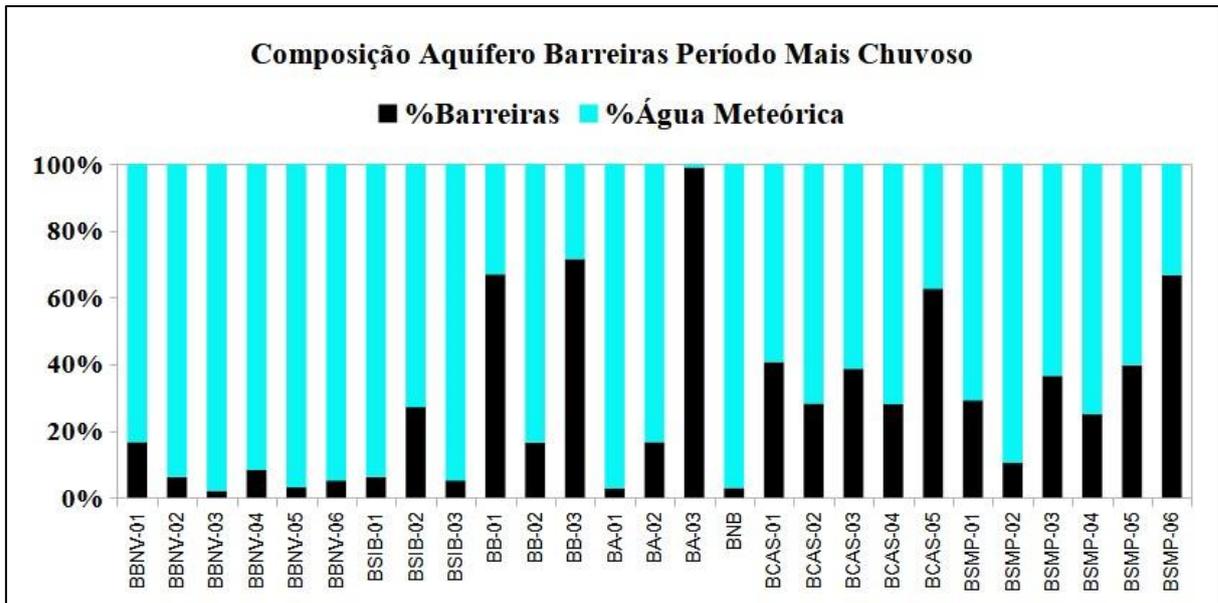


Figura 35 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó a partir da recarga do aquífero Barreiras nos períodos menos e mais chuvoso.

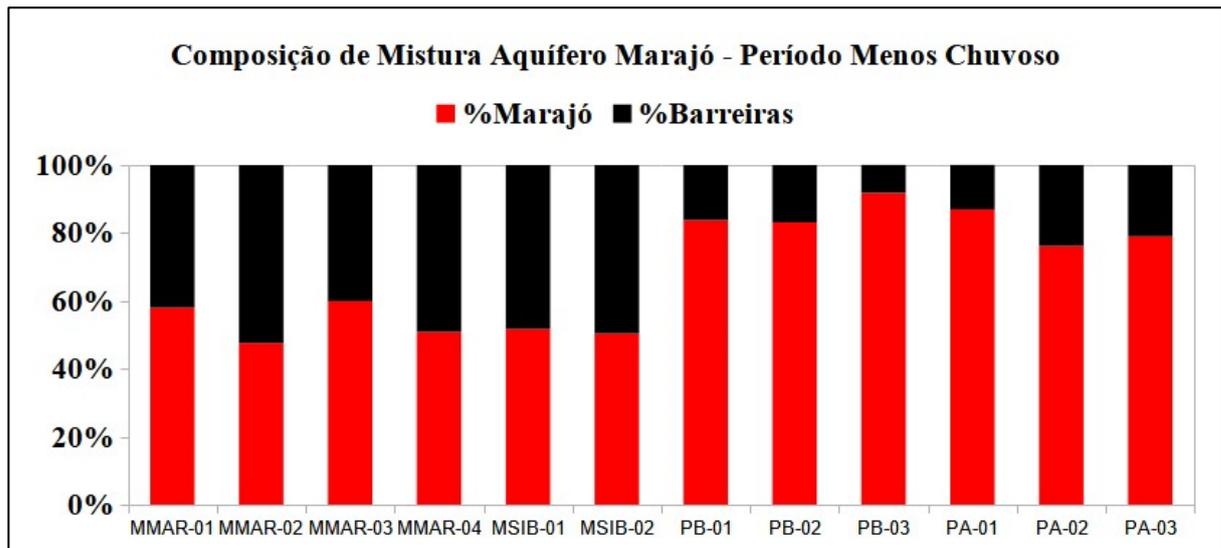


Figura 36 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó a partir da mistura com o aquífero Barreiras no período menos chuvoso.

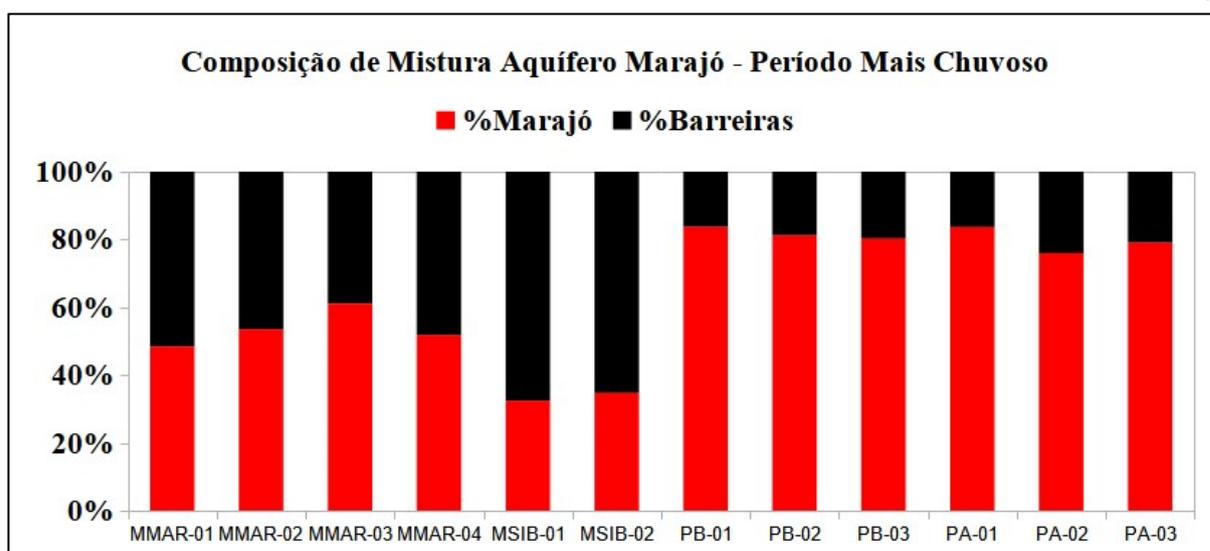


Figura 37 - Gráfico das porcentagens da composição de mistura do aquífero Marajó a partir da mistura com o aquífero Barreiras no período mais chuvoso.

O primeiro cenário (o qual inclui as concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com valores anômalos na seleção do membro final do aquífero Barreiras) foi o único cenário que apresentou resultados coerentes para os pontos BA-03 e BB-03 (dados compilados). Os demais cenários extrapolaram os limites da modelagem. Isto sugere que nestes pontos as águas apresentam pouca influência da água meteórica e maior influência do aquífero Barreiras. Ou há influência de um terceiro membro final. Todos os critérios de escolha dos membros finais e cenários estão descritos na seção 3.6 da seção dos materiais e métodos.

O segundo cenário (no qual há a exclusão das concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  com valores anômalos para seleção do membro final do aquífero Barreiras) foi o cenário no qual se demonstraram maiores variações nas proporções da modelagem, semelhante à variação que ocorreu nas razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  que refletem o padrão sazonal de recarga das águas meteóricas. Portanto, considerando este critério o segundo cenário foi o que se mostrou mais adequado para representar a modelagem de mistura do aquífero Barreiras, cujos resultados são apresentados na tabela 11 e nas figuras 34 e 35.

O aquífero Barreiras apresentou a maior variação de resultados na modelagem. Tanto no período seco, quanto no período chuvoso. Isto se explica primeiro, pela natureza não confinada do aquífero que é livre a semiconfinado. Segundo, pela própria heterogeneidade e variação espacial da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (figura 30).

O terceiro cenário apresentou resultados que representam melhor a modelagem de mistura que ocorre no aquífero Marajó caracterizado por ter concentrações baixas de cloreto e nitrato ausente. Pois o terceiro cenário é o mais restritivo dos três, uma vez que minimiza a

possibilidade de influência de uma contaminação por cloreto e nitrato de acordo com os limites de Teramoto *et al.* (2021). Além disso, os resultados da modelagem geoquímica do terceiro cenário incluem a modelagem do aquífero Marajó proposta anteriormente de 10% do aquífero Barreiras com 90 % do Marajó (Apêndice A – Tabela 16). Adicionalmente os resultados do terceiro cenário da modelagem geoquímica demonstram variações espaciais e sazonais que refletem mais acuradamente as variações que ocorrem hidrogeologicamente.

De tal forma, esta modelagem geoquímica demonstra resultados coerentes com trabalhos anteriores bem como inova com a utilização da equação de mistura do estrôncio demonstrando um detalhamento maior das proporções de mistura.

#### 5.4.2 Modelagem Utilizando Hidrogeoquímica

A partir da modelagem geoquímica, as proporções obtidas foram testadas na modelagem hidrogeoquímica e demonstradas graficamente no diagrama de Schoeller nas figuras 38 e 39, juntamente às amostras representativas da água meteórica e dos aquíferos Barreiras, Marajó e Pirabas. A seguir, na tabela 12 estão descritos os valores dos membros finais de cada íon (mEq/L) obtidos, e o resultado dos cálculos da modelagem nos períodos menos e mais chuvoso.

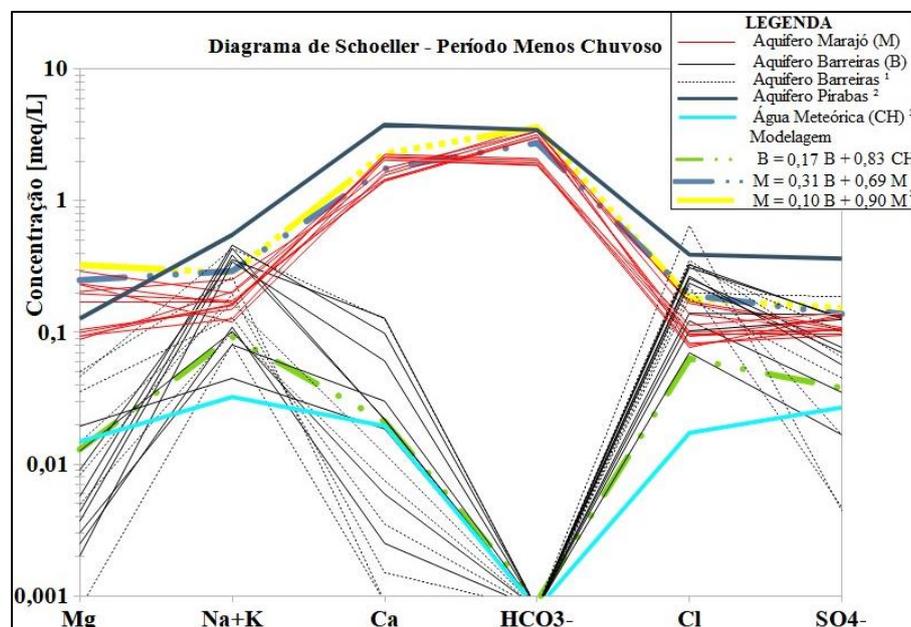


Figura 38 - Diagrama de Schoeller dos aquíferos Marajó e Barreiras no período menos chuvoso. 1-Aquífero Barreiras com possíveis contaminação de cloreto e nitrato; 2- (Oliveira Filho 2012). 3 Sanjad (2007).

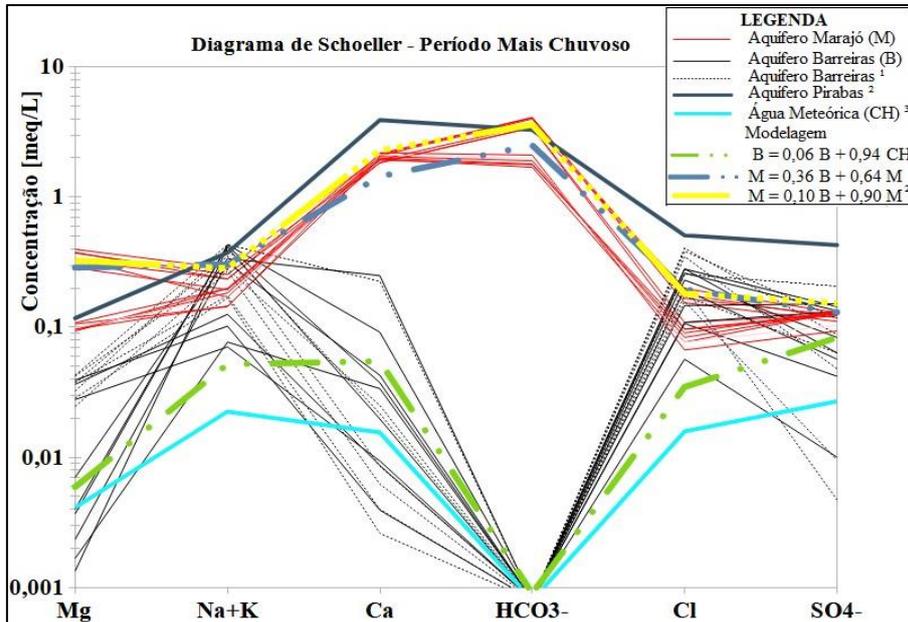


Figura 39 - Diagrama de Schoeller das águas subterrâneas dos Marajó e Barreiras no período mais chuvoso. 1- Aquífero Barreiras com possíveis contaminação de cloreto e nitrato 2- (Oliveira Filho 2012). 3 Sanjad (2007).

Tabela 12 - Membros finais e resultados da modelagem hidrogeoquímica de mistura dos aquíferos Barreiras e Marajó.

		Período Menos Chuvoso					
		Mg <sup>2+</sup>	Na+K	Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Membros Finais	Água Meteórica (CH) <sup>2</sup>	0,0148	0,0450	0,0207	0,0000	0,0281	0,0268
	Aquífero Barreiras (B)	0,0040	0,3200	0,0227	0,0000	0,2300	0,0900
	Aquífero Marajó (M)	0,3612	0,2791	2,5340	3,9991	0,1751	0,1600
Modelagem	Barreiras = 0,17B + 0,82CH	0,0129	0,0927	0,0211	0,0000	0,0631	0,0378
	Marajó = 0,31B + 0,69M	0,2493	0,2919	1,7474	2,7468	0,1923	0,1381
	Marajó = 0,10B + 0,90M <sup>1</sup>	0,3255	0,2832	2,2829	3,5993	0,1806	0,1530
		Período Mais Chuvoso					
		Mg <sup>2+</sup>	Na+K	Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Membros Finais	Água Meteórica (CH) <sup>2</sup>	0,0060	0,0358	0,0559	0,0009	0,0231	0,0829
	Aquífero Barreiras (B)	0,0040	0,2950	0,0350	0,0009	0,2098	0,0850
	Aquífero Marajó (M)	0,4754	0,3093	2,3760	4,1570	0,1850	0,1600
Modelagem	Barreiras = 0,06B + 0,94CH	0,0059	0,0518	0,0546	0,0009	0,0347	0,0830
	Marajó = 0,36B + 0,64M	0,3046	0,3041	1,5280	2,6514	0,1940	0,1328
	Marajó = 0,10B + 0,90M <sup>1</sup>	0,4282	0,3079	2,1419	3,7413	0,1875	0,1525

1-(Oliveira Filho 2012) 2-(Sanjad 2006)

Nos dois diagramas, tanto no período menos chuvoso quanto no mais chuvoso, é

possível perceber a que a modelagem hidrogeoquímica concorda com o resultado da modelagem geoquímica obtida para o Aquífero Barreiras (segundo cenário). Semelhantemente, a modelagem hidrogeoquímica concorda com o resultado da modelagem geoquímica obtida para o Aquífero Marajó (terceiro cenário). Da mesma forma, a proporção anteriormente proposta nos outros trabalhos regionais para o aquífero Marajó (10% Barreiras + 90 % do Marajó) concordou com a modelagem hidrogeoquímica.

As águas rasas do aquífero Barreiras apresentaram a impressão digital dos principais íons no diagrama de *Schoeller* com picos de cloreto e sódio apresenta amplo espalhamento vertical na escala logarítmica (eixo Y). A assinatura iônica é similar àquela das águas meteóricas.

Diferentemente, as águas mais profundas do aquífero Marajó apresentou impressão digital dos principais íons demonstra picos de cálcio e bicarbonato e comportamento mais uniforme e menos espalhamento vertical comparado ao aquífero Barreiras.

Ao comparar a assinatura iônica do aquífero Marajó com a assinatura do *background* do aquífero Pirabas (Fig. 2) é perceptível uma diferença mais acentuada entre os aquíferos no período menos chuvoso. Com o aquífero Pirabas apresenta, no período menos chuvoso, maiores valores de Na+K, Ca,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e Cl o aquífero Marajó apresentando maiores concentrações de Mg. Enquanto no período mais chuvoso o aquífero Marajó apresenta maiores valores de Mg e  $\text{HCO}_3^-$  e o aquífero Pirabas apresenta maiores valores de Na+K, Ca,  $\text{SO}_4^{2-}$  e Cl.

## 5.5 DISCUSSÃO

Considerando os parâmetros analisados neste trabalho aqueles que apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os aquíferos Barreiras e Marajó em ambos os períodos sazonais foram: o pH, condutividade, STD, ferro total, sílica, cloreto, magnésio, potássio, cálcio e estrôncio. O nitrato apresentou um padrão distinto, uma vez que são praticamente ausentes no aquífero Marajó e apresentam altas concentrações no aquífero Barreiras.

Os parâmetros cálcio, bicarbonato, magnésio e estrôncio apresentaram maiores concentrações no aquífero Marajó provavelmente pela dissolução de minerais como a calcita, dolomita e aragonita que são minerais ricos nestes elementos. Bem como STD e condutividades elevados no aquífero Marajó evidenciam o tipo de água mais mineralizada e antiga encontrada nas camadas mais profundas.

Comparando os parâmetros que diferenciaram os aquíferos Barreiras e Marajó em termos estatisticamente significativos com os parâmetros apontados na PCA, conclui-se que  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH,  $\text{Sr}^{2+}$ , STD, condutividade e profundidade são os parâmetros mais prováveis de obter um resultado efetivo para diferenciação dos aquíferos.

O sódio apresentou diferença estatisticamente significativa entre os aquíferos apenas no período menos chuvoso, portanto sugere similaridade entre os aquíferos no período mais chuvoso que pode ser atribuída ao processo de recarga das águas meteóricas.

As águas rasas do aquífero Barreiras apresentaram fácies cloretada sódica, pH ácido e baixas condutividades e STD. Os quais são similares aos respectivos parâmetros das águas meteóricas e, portanto, do ponto de vista hidrogeoquímico evidenciam a origem do aquífero Barreiras a partir da recarga das águas meteóricas, uma vez que ambas as águas apresentam características de água pouco mineralizadas. Pois estão situados próximos um ao outro no diagrama de *Piper e Durov*, na respectiva região de águas cloretadas sódicas.

A impressão digital dos íons do aquífero Barreiras apresenta amplo espalhamento vertical no diagrama de *Schoeller*, isto é a característica de um aquífero mais vulnerável a uma possível de contaminação ou mistura de águas originárias de diversas fontes. A hipótese de contaminação é mais plausível, uma vez que a origem principal de recarga das águas rasas é de águas meteóricas bastante similares a fácies cloretada sódica. Aliado ao fato de que águas do Barreiras apresentaram consideráveis concentrações de nitrato que sugerem contaminação por fontes antrópicas superficiais como fossas sépticas.

O fato de as águas profundas do aquífero Marajó apresentarem fácies bicarbonatada cálcica, pH próximo ao neutro e altas condutividades elétricas e STD, está relacionado à concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  dissolvidos na água. Estes são provenientes da dissolução minerais como calcita, existentes na formação Marajó que liberam cálcio e bicarbonato para as águas, alcaliniza o pH tornando-o de neutro a básico e aumentam a condutividade e STD. Os quais evidenciam a mineralização da água e a interação desta com as rochas do aquífero por onde a água infiltrou, lixiviou e percolou. A similaridade hidrogeoquímica das águas do aquífero Marajó com o aquífero Pirabas se justifica pela existência de conteúdo carbonático que ambas as rochas das respectivas formações possuem. Porém em concentrações diferentes, sendo a Formação Pirabas a que possui maior conteúdo carbonático comparado ao conteúdo carbonático menor da Formação Marajó.

A impressão digital dos íons das águas do aquífero Marajó apresenta comportamento mais uniforme e agrupamento horizontal das linhas no diagrama de *Schoeller*, e é interpretado

como um aquífero menos vulnerável e mais confinado que é esperado para águas mais profundas. Além disso, não foram detectadas concentrações de nitrato neste aquífero, corroborando para a hipótese de um aquífero minimamente contaminado.

No aquífero Barreiras no período menos chuvoso as razões mais radiogênicas se aproximam do membro final da rocha da Formação Barreiras que possui razões mais radiogênicas. Pois esta formação é de origem continental da qual, provavelmente, provém sua razão mais radiogênica e explica o empobrecimento (concentração de Sr) deste elemento na formação e no aquífero. Diferentemente, no período mais chuvoso, ocorre a grande variação sazonal nas águas subterrâneas do aquífero Barreiras, cujos valores da razão isotópica diminuem consideravelmente para razões menos radiogênicas por influência das águas meteóricas, provavelmente pelo processo de recarga destas águas meteóricas.

Por sua vez as águas do aquífero Marajó apresentam uma pequena variação sazonal isotópica, que apesar de pequena é estatisticamente significativa. Portanto esta variação significativa aponta para uma maior influência sazonal de recarga pela entrada da água do aquífero Barreiras no período mais chuvoso.

As razões isotópicas do aquífero Marajó apresentam semelhanças em relação às razões isotópicas dos microfósseis da Formação Pirabas e *background* do aquífero Pirabas. A princípio, esta similaridade parece contraditória porque a Formação Marajó apresenta uma composição mais siliciclástica e menor conteúdo carbonático comparado com a Formação Pirabas. No entanto, isto pode ser explicado a partir dos motivos discutidos nos seguintes parágrafos.

Em primeiro lugar, as Formações Marajó e Pirabas se depositaram em ambientes com grande influência marinha onde ocorreu a deposição carbonática. De tal maneira que o conteúdo carbonático da Formação Marajó apresenta os valores da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  bastante similares aos da Formação Pirabas como evidenciado pela razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nas águas subterrâneas dos aquíferos Marajó e Pirabas. Tal similaridade pode ser explicada a partir da hipótese de cronocorrelação (formação em tempos geológicos semelhantes) das formações aliado ao fato de o comportamento geoquímico do estrôncio nos oceanos ser constante ao longo de determinado tempo geológico, uma vez que o tempo de residência do estrôncio nos oceanos é maior que o tempo de renovação das águas marinhas. Logo formações geológicas que se depositaram em regiões próximas apresentam uma proximidade na escala do tempo geológico tendem a ter uma composição isotópica de Sr similar.

Em segundo lugar, o material siliciclástico da Formação Marajó de origem continental,

geralmente é mais pobre em estrôncio apresentando uma razão geralmente mais radiogênica. E também, o material siliciclástico é mais resistente à lixiviação quando comparado com o material carbonático que é muito mais fácil de ser lixiviado e dissolvido na água. Para fortalecer esta interpretação basta lembrar da fácies hidroquímica da Formação Marajó que é bicarbonatada cálcica que é originada da dissolução de minerais como calcita que liberam o Ca e  $\text{HCO}_3^-$ , além disso os minerais carbonáticos são naturalmente enriquecidos em estrôncio. Logo, além da facilidade de lixiviação da calcita ela também será a maior fonte de Sr menos radiogênico para a água, tornando assim a razão mais semelhante à dos carbonatos.

É provável que ao realizar análises isotópicas minuciosas em macrofósseis (carbonáticos) e rochas coletados da Formação Marajó obtenha-se um detalhamento maior da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em virtude da composição da rocha. De tal forma, a análise de rocha total apresentaria razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mais radiogênica pela composição de material siliciclástico (empobrecido em Sr) de origem continental depositado no ambiente estuarino. Ao passo que, a análise da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  por lixiviação sequencial (a qual simula a dissolução preferencial dos minerais carbonáticos mais susceptíveis ao intemperismo) apresentaria nas frações mais lixiviáveis uma razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  menos radiogênica similar à que é encontrada na água do aquífero Marajó e Pirabas que é também similar à dos carbonatos. Porque a Formação Marajó também possui conteúdo carbonático.

Após demonstrar a utilidade da geoquímica isotópica para modelagem de mistura de águas subterrâneas associado à hidrogeoquímica é necessário considerar as limitações da modelagem. Uma das principais limitações é o fato de o modelo ser binário e simplificado que pode e deve ser adaptado. Uma vez que existem no arcabouço tectônicos diversas falhas normais e interdigitação entre as formações, que possivelmente interconecta os aquíferos. Além disso existem variações locais que são evidenciadas nas proporções obtidas pontualmente. De tal forma, as variações locais de porosidade e permeabilidade das camadas aquíferas também podem ser outro fator limitante para a modelagem geoquímica.

Uma outra limitação importante que deve ser considerada neste trabalho é que não há um local pontual com poço em que se é possível obter informações hidrogeoquímicas e de razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dos aquíferos Barreiras e Marajó simultaneamente. Isto seria uma situação ideal que permitiria sistematizar todo o modelo de mistura com uma maior precisão e diminuir o erro do modelo. Alternativamente, os três cenários em que a modelagem foi realizada incluem a possibilidade das variações naturais e dos erros que naturalmente fazem parte da modelagem. Outro fator que enriqueceria a modelagem seria um detalhamento maior

da variação sazonal isotópica do estrôncio na água meteórica que neste trabalhos se considerou a que estava disponível como representativa dos dois períodos. Apesar das limitações, esta é a primeira pesquisa na região a integrar a modelagem hidrogeoquímica com a geoquímica isotópica do estrôncio apresentando resultados satisfatórios que concordam com as pesquisas anteriores.

## 6 CONCLUSÃO

O aquífero Barreiras apresentou altas concentrações de nitrato associado aos aquíferos livres, pH ácido e fácies cloretada sódica com razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mais radiogênica no período menos chuvoso similar às rochas continentais e menos radiogênicas similar às águas meteóricas no período mais chuvoso sugerindo os processos de recarga.

O aquífero Marajó apresentou comportamento confinado, pH neutro e fácies bicarbonatada cálcica com algumas diferenças na assinatura dos íons comparado ao aquífero Pirabas. As razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  do aquífero Marajó foram menos radiogênicas e similares aos macrofósseis carbonáticos. Também apresentou pequenas variações nas razões isotópicas em ambos os períodos sazonais que sugerem uma proporção de mistura maior com o aquífero Barreiras no período mais chuvoso.

Os resultados da modelagem estimam que há uma maior contribuição da água meteórica no período mais chuvoso no aquífero Barreiras. Assim como há uma maior proporção de mistura com o aquífero Barreiras no aquífero Marajó no período mais chuvoso.

A utilização da geoquímica isotópica do estrôncio e da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  associada à hidrogeoquímica para modelagem de mistura de água mostrou-se uma ferramenta eficaz ao apresentarem resultados que concordam um com o outro.

Os objetivos propostos para a pesquisa foram cumpridos obtendo-se resultados adicionais satisfatórios que contribuem para um detalhamento maior do assunto na área de estudo.

Ao considerar as informações obtidas acerca da ocorrência de misturas entre os aquíferos e os diferentes níveis vulnerabilidades existentes. A inserção de novas informações do contexto geológico regional acerca da diferenciação entre as formações Marajó e Pirabas propiciaram a existência de novas interpretações no campo da geoquímica isotópica do estrôncio aplicado ao entendimento da dinâmica de interação entre os aquíferos. Bem como contribuiu para um detalhamento maior regional desta área de estudo com potencial de contribuir com conhecimentos e precursores de políticas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos explorados em grandes quantidades.

## REFERÊNCIAS

- Allègre C.J., Dupré B., Nègrel P., Gaillardet J. 1996. Sr-Nd-Pb isotopes systematics in Amazon and Congo River systems: Constrains about erosion processes. *Chemical Geology*, **131**: 93-112.
- Allègre C.J. 2008. *Isotope geology*. Cambridge, Cambridge University Press. 512p.
- Álvares C.A., Stape J.L., Sentelhas P.C., Gonçalves J.D.M., Sparovek G. 2013. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22** (6): 711-728.
- Agência Nacional de Águas – ANA. 2011. *Guia de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. São Paulo - SP, CETESB. 326p.
- Agência Nacional de Águas - ANA. 2018. *Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA: Relatório Final*. Brasília,DF, Perfil Engenharia e Ambiente S.A.
- Antonioli L., Tavora V.A., Dino R. 2015. Palynology of carinoliths and limestones from the Baunilha Grande ecofacies of the Pirabas Formation (Miocene of Pará state, northeastern Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **62**:134–147. doi:10.1016/j.jsames.2015.05.005.
- American Public Health Association – APHA. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th ed. Washington, American Public Health Association. 140p.
- Bakari, S. S., Aagaard, P., Vogt, R. D., Ruden, F., Johansen, I., Vuai, S. A. 2013. Strontium isotopes as tracers for quantifying mixing of groundwater in the alluvial plain of a coastal watershed, south-eastern Tanzania. *Journal of Geochemical Exploration*, **130**, 1-14.
- Belúcio E.F. 2001. *Estudo da razão isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em macrofósseis da formação Pirabas, Nordeste do estado do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 58p.
- Banner J.L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth Science Reviews*, **65**: 141-194.
- Bermerguy R.L., Costa J.B.S., Hasui Y., Borges M.S. 1995. Tectônica e paleogeografia da calha do rio Amazonas. In: SNET, 5º Simp. Nac. Est. Tec., Sul, *Anais[...]*. Gramado, RS, p. 419-420.
- Bastos T.X., Pacheco N.A., Nechet D., Sá T.D.A. 2002. *Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos*. Belém, Embrapa Amazônia Oriental. (Documentos, 128).

Bordalo A.O., Moura C.A.V., Scheller T. 2007. Determinação da composição isotópica de estrôncio em águas naturais: exemplos de sua aplicação em águas subsuperficiais da zona costeira na região Bragantina-PA. *Química Nova*, **30**: 821-827.

Borges M.S., Costa J.B.S., Bermeguy R.L., Paranhos Júnior C.A., Hasui Y. 1995. A esculturação da paisagem do litoral do norte do Brasil e sua relação com movimentos neotectônicos do Quaternário. In: 5º SNET, Simp. Nac. Est. Tec., Sul. *Anais[...]*. Gramado, RS, p. 423-424.

Cabral N.M.T. 2004. *Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 278 p.

Capo R.C., Stewart B.W., Chadwick O.A. 1992. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods. *Geoderma*, **82**: 197-225.

Carvalho F.I.M., Dantas Filho H.A., Dantas K.D.G.F. 2019. Simultaneous determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater by GC-FID after solid-phase extraction. *SN Applied Sciences*, **1**(7): 1-12.

Carvalho W.G. 2001. *Caracterizações Químicas dos Aquíferos da Formação Pirabas no Conjunto COHAB / Distrito de Icoaraci - Pará, Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 41 p.

Costa C.E.A.D.S., & Blanco C.J.C. 2018. Influência da variabilidade climática sobre a erosividade em Belém (PA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, **33**, 509-520.

Costa F.R. 2004. *Influência da Neotectônica sobre os arranjos geométricos dos Aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 173 p.

Costa J., Hasui, Y., Bermeguy R. L., Soares-Júnior A. V., Villegas J. 2002. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **74**(3), 519-531.

Costa J.B.S., Bermeguy R.L., Borges M.S., Costa A.R., Travassos W., Mioto J., Igreja H.L.S. 1993. Aspectos fundamentais da neotectônica na Amazônia Brasileira. In: SIQA. Simp. Int. Quart. Amaz., Norte, 1, *Anais*, p. 103-106.

Costa J.B.S. 1996. A neotectônica na Amazônia. In: SGA, Simp. Geol., Norte, 5, *Anais*, p. 35-38.

Costa J.B.S., Bermeguy R.L., Hasui Y., Borges M.S., Ferreira Júnior C.R.P., Bezerra P.E.L., Costa M.L., Fernandes J.M.G. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, **4**: 23-44.

Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**: 146-160.

Costa M.L. & Horbe A.M.C. 1995. Pedras de ferro de interface areia-argila no perfil laterítico da ilha de Mosqueiro (Região Norte do Brasil). *Caderno de Geociências – IBGE*, **14**: 61-68

Christensen J.N., Dafflon, B., Shiel A.E., Tokunaga T.K., Wan J., Faybishenko, B., Hubbard S.S. 2018. Using strontium isotopes to evaluate the spatial variation of groundwater recharge. *Science of the Total Environment*, **637**, 672-685.

Custodio E. & Llamas M.R. 1976. *Hidrología subterránea*. Barcelona, Omega. v.2.

Dickin A P. 2018. *Radiogenic isotope geology*. Cambridge, Cambridge University Press. 481p.

Foley D.D., McKenzie G.D., Utgard R.O. 2009. *Investigations in Environmental Geology.....*

Góes A.M., Rossetti D.F., Nogueira A.C.R., Toledo P.M. 1990. *Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Pará*. Belém, Boletim, MPEG 2, 15p.

Goldstein S.L. & Jacobsen S.B. 1988. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, **87**: 249-265.

Grasshoff K. 1964. On the determination of silica in sea water. *Deep-Sea Res*, **11**(4), 74-81.

Han G. & Liu C.Q. 2006. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China. *Science of the Total Environment*, **364**: 165-174.

Han G. Tang Y., Wu Q., Tan Q. 2010. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in karst virgin forest, Southwest China. *Atmospheric Environment*, **44**: 174-181.

Hasui Y. 1990. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: SBG, Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro. Belo Horizonte/MG. p. 1-31.

Herut B., Starinsky A., Katz A. 1993. Strontium in rainwater from Israel: Sources, Isotopes and chemistry. *Earth and Planet*, **120**:77-84.

Hirata R., Zoby J.L.G., Oliveira F.R.D. 2017. Ground water: strategic or emergency reserve. In: *Waters of Brazil*. Cham, Springer. p. 119-136.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2010. *Censo de 2010*.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. 2020. *Cidades*.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2021. *Estimativas da população em 2021*.

Imbiriba Junior, M., Nogueira A.C.R., Sena C., Góes, A.M., Bandeira J., Soares J.L., Sundal A. 2021. Hydrostratigraphic redefinition of the subsurface from Eastern Amazonian coast, Brazil: The Marajó Aquifer. *In: 47 th IAH, Congress Brasil. Abstract*. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22588>.

Khan M. M. A. & Umar R. 2010. Significance of silica analysis in groundwater in parts of Central Ganga Plain, Uttar Pradesh, India. *Current science*, 1237-1240.

Lira B.R.P., Lopes L.D.N.A., das Chaves J.R., Santana L.R., Fernandes L.L. 2020. Identificação de Homogeneidade, Tendência e Magnitude da Precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. *Anuário do Instituto de Geociências*, **43**(4), 426-439.

Lopes R.M., Mesquita K.F.C., Santos M.D.L.S., Pereira J.A.R. 2017. Qualidade da água consumida na Ilha do Mosqueiro, Belém-PA. *Revista DAE*. DOI: 10.4322/dae.2016.024.

Matta M.A.S. 2002. *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 292p.

Mazor, E. 2003. *Chemical and isotopic groundwater hydrology* (Vol. 98). CRC press.

Miao Z., Brusseau M. L., Carroll K. C., Carreón-Diazconti C., Johnson B. 2012. Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environmental Geochemistry and Health*, **34**(4): 539-550.

Moizinho G.R. 2021. *Assinatura isotópica da Formação Barreiras na borda Leste da Bacia do Marajó e Plataforma Bragantina: fontes e implicações para a paleogeografia da Amazônia Oriental no Mioceno*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília 94p.

Moizinho G.R., Vieira L.C., Santos R.V., Nogueira A.C.R., Dantas E.L., Roddaz M. 2022. Provenance of Miocene-Pleistocene siliciclastic deposits in the Eastern Amazonia coast (Brazil) and paleogeographic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 587, 110799.

Mukherjee A., Scanlon B.R., Aureli A., Langan S., Guo H., McKenzie A.A. (eds.). 2020. *Global groundwater: source, scarcity, sustainability, security, and solutions*. [S.l.], Elsevier.

Musgrove M. 2021. The occurrence and distribution of strontium in US groundwater. *Applied Geochemistry*, 126, 104867.

Négreil, P., Petelet-Giraud, E., Widory, D. 2004. Strontium isotope geochemistry of alluvial groundwater: a tracer for groundwater resources characterisation. *Hydrology and Earth System Sciences*, **8**(5), 959-972.

Négreil P. & Petelet-Giraud E. 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). *Journal of Hydrology*, **305**(1-4), 99-119.

Négreil P. & Roy S. 1998. *Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study*

Négreil P., Millot R., Roy S., Guerrot C., Pauwels H. 2010. Lead isotopes in groundwater as an indicator of water–rock interaction (Masheshwaram catchment, Andhra Pradesh, India). *Chemical Geology*, **274**: 136-148.

Nogueira A.C.R., Amorim K.B., Goes A.M., Truckenbrodt W., Petri S., Nogueira A.A.E., Bandeira J., Soares J.L., Baía L.B., Imbiriba Júnior M., Bezerra I.S., Ribas C.C., Cracraft J. 2021. Upper Oligocene-Miocene deposits of Eastern Amazonia: Implications for the collapse of Neogene carbonate platforms along the coast of northern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **563**, 110178.

Oliveira B.P.P.de. 2019 *Hidroquímica E Caracterização Isotópica ( $^{87}\text{sr}/^{86}\text{sr}$ ) Dos Sistemas Aquíferos Barreiras E Pirabas Nos Municípios De São Francisco Do Pará E Igarapé-Açu, Nordeste Do Pará*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 72p.

Oliveira J.R., Souza Leal A., Tancredi A.C.F.N.S. 2001. *Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*. Belém, CPRM, 115 p.

Oliveira Filho O.B.Q. 2012. *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 comparativos nos Municípios de Benevides e Capanema (PA)*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 98p.

Oliveira Filho O.B.Q. & Galarza M.A. 2013. 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 comparativos nos Municípios de Benevides e Capanema (PA). *Contribuições à Geologia da Amazônia*, **8**, 22.

Oliveira Filho O.B.Q.de, Galarza M.A., Silva W.C.M.da. 2018. Caracterização Hidrogeoquímica Dos Sistemas Aquíferos Barreiras E Pirabas Da Região Metropolitana De Belém (RMB) E Investigação De Possíveis Misturas Entre As Águas. *Cadernos de Geociências*, **14**(1-2): 8–23. Disponibilizado em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/16777>.

Palheta E.S.M. 2008. *Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro-Pará empregado no conhecimento hídrico subterrâneo*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 241p.

Pará. 1995. Lei Complementar nº 27, de 19 de outubro de 1995. Institui a região metropolitana de Belém e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Pará*.

Pará. 2011. Lei Complementar nº 76, de 28 de dezembro de 2011. Altera a Lei Complementar nº 027/95 e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Pará*, Belém.

Paranhos P.F. 2010. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 94p.

Petri S. 1957. Foraminíferos Miocênicos da formação Pirabas. Boletim Da Faculdade De Filosofia Ciências E Letras, Universidade De São Paulo. *Geologia*, (16), 1-80. <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1957.121843>.

Plechacek A., Scott S.R., Gotkowitz M.B., Ginder-Vogel M. 2022. Strontium and radium occurrence at the boundary of a confined aquifer system. *Applied Geochemistry*, 105332.

Quaggio C.S., Gastmans D., Martins V.T.de Souza 2021. O que os isótopos de estrôncio nos ensinam sobre as águas subterrâneas. *Derbyana*, 42.

Quaggio C. S., Gastmans D., Martins V. T.de Souza, Gilmore T. E. 2022. Combined use of statistical Bayesian model and strontium isotopes deciphering the high complexity groundwater flow in the Guarani Aquifer System (GAS). *Applied Geochemistry*, **146**: 105473.

Rapant, S., Cvečková, V., Fajčíková, K., Sedláková, D., Stehlíková, B. 2017. Impact of calcium and magnesium in groundwater and drinking water on the health of inhabitants of the Slovak Republic. *International journal of environmental research and public health*, 14(3), 278.

Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, England, 352 p.

Rossetti D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**(1): 77-89.

Rossetti D.F. 2006. Evolução Sedimentar Miocênica nos estados do Pará e Maranhão. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 6, p. 7-18.

Rossetti D.F., Góes A.M., Trunckenbrodt W. 1990. A influência marinha nos Sedimentos Barreiras. Belém, *MPEG*, Boletim 2, 12 p.

Rossetti D.F., Truckenbrodt W., Góes A.M. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará. Belém, *MPEG*, Boletim 1, 49 p.

Rojas L.E.G., Soares, J.L., Nogueira A.A.E., Imbiriba Júnior M., Sena, C., Góes A.M., Bandeira J., Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W. 2021. *Establishing a subsurface hydrostratigraphy using Miocene foraminifera biostratigraphy in the Eastern Amazonian coast, Brazil*.

Sá J.H.S. 1969. Contribuição à Geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, Estado do Pará. Rio de Janeiro, UFRJ, *Boletim Geológico* 3:1- 15.

Sanjad, T. A. B. C. (2007). *Intemperismo tropical em fachadas azulejadas de edificações históricas em Belém do Pará*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 290 p.

Santos Júnior G.C. Dos. 2021. *Gravimetria E Estratigrafia Cenozoica Da Porção Onshore Da Bacia Do Marajó E Plataforma Bragantina, Nordeste Do Pará*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 30p

Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. 2023. *Sistema de Informações de Águas Subterrâneas*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/index.php>.

Silva I.R.F. da. 2015. *Caracterização Hidrogeoquímica E Isotópica ( $^{87}\text{sr}/^{86}\text{sr}$ ) Dos Sistemas Aquíferos Barreiras E Pirabas Superior Nos Municípios De Castanhal E Santa Maria Do Pará, Estado Do Pará*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 87p

Silva I.R.F.da. & Galarza M.A. 2017. Caracterização hidrogeoquímica e isotópica ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas Superior nos municípios de Castanhal e Santa Maria do Pará, estado do Pará. In: Lima A.M.M. de & Gorayeb P.S. de S. (org.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, SBGeo-Núcleo Norte, v.10, p. 83-98.

Silva T. A.da, Rosário F. F.do, Silva Júnior G. C. da. 2020. Environmental isotopes and hydrochemical tracers applied to hydrogeological conceptual modeling of the southwest portion of the Amazon Aquifer System (Acre, Brazil). *Applied Geochemistry*, 120, 104670.

Silva O.F. & Lowenstein P. 1988. Contribuição à Geologia da Folha de São Luiz (SA-23) no Estado do Pará. *Boletim MPEG*, Belém, 13: 1- 17.

Soares Júnior A.V., Hasui Y., Costa J.B.S., Machado F. B. 2011. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem atlântica equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. *Geociências*, 669-692.

Souza Filho P. W. M. 2000. Tectonic control on the coastal zone geomorphology of the northeastern Pará State. *Rev Bras Geocienc*, **30**: 523-526.

Teramoto, E. H., Stradioto, M. R., Chang, H. K. 2021. Modeling of hydrochemistry evolution in carbonatic–siliciclastic aquifer system in coastal environment. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-16.

Tundisi, J. G., & Tundisi, T. M. (2008). *Limnologia*. Oficina de textos.

Xu Z. & Han G. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, **43**(12): 1954-1961.

Xu Z., Li Y., Tang Y., Han G. 2009. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater at an urban site in Loess Plateau, Northwest China. *Atmospheric Reserarch*, **3**: 481-490.

Zalán P.V. & Matsuda N.S. 2007. Bacia do Marajó. *Boletim de Geociências da Petrobras*. **15**: 311–319.

Zakaria N., Anornu G., Adomako D., Owusu-Nimo F., Gibrilla A. 2021. Evolution of groundwater hydrogeochemistry and assessment of groundwater quality in the Anayari catchment. *Groundwater for Sustainable Development*, **12**: 100489.

## APÊNDICE A

Tabela 13 – Valores compilados das concentrações de Sr e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e informações adicionais

Medida TC	Poço/ Ponto	Período Menos Chuvas			Período Mais Chuvas			Aquífero / Geologia	Referência	Concentrações Acima do Limiar	
		Sr <sup>2+</sup> (µg/L)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Outlier	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Outlier			NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > 0,5 mg/L	Cl <sup>-</sup> > 15 mg/L
Média	MMAR-01	594,0	0,709431	não	515,0	0,709085	não	Marajó	-	não	não
Média	MMAR-02	505,0	0,709108	não	561,0	0,709092	não	Marajó	-	não	não
Média	MMAR-03	610,0	0,709210	não	631,0	0,709147	não	Marajó	-	não	não
Média	MMAR-04	533,0	0,709076	não	546,0	0,709021	não	Marajó	-	não	não
Média	MSIB-01	540,0	0,709503	não	367,3	0,709151	não	Marajó	-	não	não
Média	MSIB-02	529,0	0,709648	não	389,0	0,709470	não	Marajó	-	não	não
Mediana	BBNV-01	18,0	0,727098	não	22,0	0,708442	SIM	Barreiras	-	SIM	SIM
Mediana	BBNV-02	10,0	0,726475	não	12,0	0,707583	não	Barreiras	-	SIM	não
Mediana	BBNV-03	11,0	0,724325	não	8,0	0,707489	não	Barreiras	-	SIM	não
Mediana	BBNV-04	14,0	0,726264	não	14,0	0,708527	não	Barreiras	-	SIM	SIM
Mediana	BBNV-05	20,0	0,726250	não	9,0	0,707684	não	Barreiras	-	SIM	SIM
Mediana	BBNV-06	9,0	0,727039	não	12,0	0,708545	não	Barreiras	-	não	não
Mediana	BSIB-01	15,0	0,722907	não	12,0	0,708187	não	Barreiras	-	não	não
Mediana	BSIB-02	33,0	0,723284	SIM	32,0	0,708163	não	Barreiras	-	SIM	não
Mediana	BSIB-03	24,0	0,718633	não	11,0	0,709374	não	Barreiras	-	não	não
Mediana	BB-01	70,1	0,710025	não	70,1	0,708629	não	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BB-02	21,9	0,709677	não	21,9	0,705815	não	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BB-03	219,1	0,710217	SIM	210,3	0,709366	SIM	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	SIM
Mediana	BA-01	8,8	0,718607	não	8,8	0,707800	não	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BA-02	21,9	0,712348	não	21,9	0,711677	não	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BA-03	289,1	0,708525	SIM	289,1	0,708427	SIM	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BNB	8,8	0,714777	não	8,8	0,713396	não	Barreiras	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PB-01	814,9	0,709172	não	839,7	0,709016	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PB-02	809,0	0,709360	não	816,3	0,709069	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PB-03	883,5	0,709322	não	807,6	0,709057	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PA-01	841,2	0,709841	não	838,2	0,709207	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PA-02	749,2	0,709471	não	768,1	0,709094	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PA-03	774,0	0,709171	não	797,3	0,709157	não	Marajó	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PC-01	1.076,3	0,709449	não	1.159,5	0,708656	não	Pirabas Background	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	PC-02	855,8	0,709249	não	868,9	0,708971	não	Pirabas Background	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Média	ACH	6,1	0,705316	não	6,1	0,705316	não	Água Meteorica	(Oliveira Filho 2012)	não	não
Mediana	BCAS-01	53,0	0,722883	não	45,0	0,707908	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BCAS-02	29,0	0,716135	não	33,0	0,708730	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BCAS-03	31,0	0,714279	não	43,0	0,708018	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	não
Mediana	BCAS-04	29,0	0,716715	não	33,0	0,706548	não	Barreiras	(Silva 2017)	não	SIM
Mediana	BCAS-05	58,0	0,722370	não	66,0	0,709174	SIM	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-01	33,0	0,719663	não	34,0	0,708404	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-02	16,0	0,713745	não	16,0	0,709060	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-03	37,0	0,719990	não	41,0	0,708209	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-04	27,0	0,718915	não	30,0	0,707390	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-05	39,0	0,717880	não	44,0	0,708406	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	SIM
Mediana	BSMP-06	69,0	0,719223	não	70,0	0,707386	não	Barreiras	(Silva 2017)	SIM	não
Média	PSCAS-01	261,7	0,707684	não	227,3	0,707510	não	Marajó	(Silva 2017)	não	não
Mediana	BSF-02	9,6	0,712151	não	9,7	0,711824	não	Barreiras	(Oliveira 2019)	não	não
Mediana	BSF-03	8,8	0,713824	não	9,3	0,713675	não	Barreiras	(Oliveira 2019)	não	não
Mediana	BSF-04	16,8	0,712385	não	15,4	0,712324	não	Barreiras	(Oliveira 2019)	não	não
Mediana	BIA-03	12,1	0,711383	não	13,3	0,711024	não	Barreiras	(Oliveira 2019)	não	não
Média	PsSF-01	90,7	0,710661	não	88,0	0,710518	não	Pirabas	(Oliveira 2019)	não	não
Média	PsIA-01	132,9	0,709259	não	128,2	0,709162	não	Pirabas	(Oliveira 2019)	não	não
Média	PsIA-02	45,3	0,710963	não	50,6	0,711007	não	Pirabas	(Oliveira 2019)	não	não
Média	PsIA-04	94,7	0,710466	não	89,7	0,710477	não	Pirabas	(Oliveira 2019)	não	não
Média	PsIA-05	59,8	0,710746	não	51,0	0,710805	não	Pirabas	(Oliveira 2019)	não	não

Medida TC: Medida de tendência central

Tabela 14 - Primeiro cenário da modelagem geoquímica com os valores dos membros finais escolhidos e as proporções de mistura entre os membros finais calculadas em cada ponto.

PRIMEIRO CENÁRIO									
Modelagem - Menos Chuvoso					Modelagem - Mais Chuvoso				
Membro Final Escolhido					Membro Final				
Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr		Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	
Água Meteórica	ACH	6,10	ACH	0,705316	Água Meteórica	ACH	6,10	ACH	0,705316
Barreiras	BA03	289,15	BBNV-01	0,727300	Barreiras	BA03	289,15	BNB	0,716219
Marajó	PB03	955,06	PA03	0,708571	Marajó	PB03	990,11	MMAR01	0,708588

Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Água Meteórica			A=Barreiras	B=Água Meteórica
BBNV-01	Barreiras/ A=Barreiras B=Água Meteórica	4%	96%	BBNV-01	Barreiras/ A=Barreiras B=Água Meteórica	6%	94%
BBNV-02		1%	99%	BBNV-02		2%	98%
BBNV-03		2%	98%	BBNV-03		1%	99%
BBNV-04		3%	97%	BBNV-04		3%	97%
BBNV-05		5%	95%	BBNV-05		1%	99%
BBNV-06		1%	99%	BBNV-06		2%	98%
BSIB-01		3%	97%	BSIB-01		2%	98%
BSIB-02		9%	91%	BSIB-02		9%	91%
BSIB-03		6%	94%	BSIB-03		2%	98%
BB-01		22%	78%	BB-01		22%	78%
BB-02		5%	95%	BB-02		6%	94%
BB-03		73%	27%	BB-03		71%	29%
BA-01		1%	99%	BA-01		1%	99%
BA-02		5%	95%	BA-02		6%	94%
BA-03		97%	3%	BA-03		99%	1%
BNB		1%	99%	BNB		1%	99%
BCAS-01		17%	83%	BCAS-01		14%	86%
BCAS-02		8%	92%	BCAS-02		9%	91%
BCAS-03		9%	91%	BCAS-03		13%	87%
BCAS-04		8%	92%	BCAS-04		9%	91%
BCAS-05		18%	82%	BCAS-05		21%	79%
BSMP-01		9%	91%	BSMP-01		10%	90%
BSMP-02		3%	97%	BSMP-02		3%	97%
BSMP-03		11%	89%	BSMP-03		12%	88%
BSMP-04		7%	93%	BSMP-04		8%	92%
BSMP-05		12%	88%	BSMP-05		13%	87%
BSMP-06	22%	78%	BSMP-06	22%	78%		

Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Marajó			A=Barreiras	B=Marajó
MMAR-01	Marajó/ A=Barreiras B=Marajó	55%	45%	MMAR-01	Marajó/ A=Barreiras B=Marajó	68%	32%
MMAR-02		68%	32%	MMAR-02		61%	39%
MMAR-03		52%	48%	MMAR-03		51%	49%
MMAR-04		64%	36%	MMAR-04		64%	36%
MSIB-01		63%	37%	MSIB-01		89%	11%
MSIB-02		65%	35%	MSIB-02		86%	14%
PB-01		21%	79%	PB-01		21%	79%
PB-02		22%	78%	PB-02		25%	75%
PB-03		11%	89%	PB-03		26%	74%
PA-01		17%	83%	PA-01		22%	78%
PA-02		31%	69%	PA-02		32%	68%
PA-03		27%	73%	PA-03		28%	72%
PSCAS-01		88%	12%	PSCAS-01		109%	-9%

Tabela 15 - Segundo cenário da modelagem geoquímica com os valores dos membros finais escolhidos e as proporções de mistura entre os membros finais calculadas em cada ponto.

SEGUNDO CENÁRIO									
Modelagem - Menos Chuvoso					Modelagem - Mais Chuvoso				
Membro Final Escolhido					Membro Final				
Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr		Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	
Água Meteorólica	ACH	6,10	ACH	0,705316	Água Meteorólica	ACH	6,10	ACH	0,705316
Barreiras	BBNV-02	95,00	BBNV-01	0,727300	Barreiras	BCAS05	87,00	BB03	0,709984
Marajó	PB03	955,06	PA03	0,708571	Marajó	PB03	990,11	MMAR01	0,708588

Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Água Meteorólica			A=Barreiras	B=Água Meteorólica
BBNV-01		14%	86%	BBNV-01		20%	80%
BBNV-02		5%	95%	BBNV-02		7%	93%
BBNV-03		6%	94%	BBNV-03		2%	98%
BBNV-04		9%	91%	BBNV-04		10%	90%
BBNV-05		16%	84%	BBNV-05		4%	96%
BBNV-06		3%	97%	BBNV-06		7%	93%
BSIB-01		10%	90%	BSIB-01		7%	93%
BSIB-02		30%	70%	BSIB-02		32%	68%
BSIB-03		20%	80%	BSIB-03		6%	94%
BB-01		70%	30%	BB-01		79%	21%
BB-02		17%	83%	BB-02		19%	81%
BB-03		233%	-133%	BB-03		252%	-152%
BA-01	Barreiras/ A=Barreiras B=Água Meteorólica	3%	97%	BA-01	Barreiras/ A=Barreiras B=Água Meteorólica	3%	97%
BA-02		17%	83%	BA-02		20%	80%
BA-03		310%	-210%	BA-03		349%	-249%
BNB		3%	97%	BNB		3%	97%
BCAS-01		52%	48%	BCAS-01		48%	52%
BCAS-02		25%	75%	BCAS-02		33%	67%
BCAS-03		28%	72%	BCAS-03		45%	55%
BCAS-04		25%	75%	BCAS-04		33%	67%
BCAS-05		58%	42%	BCAS-05		74%	26%
BSMP-01		30%	70%	BSMP-01		34%	66%
BSMP-02		11%	89%	BSMP-02		12%	88%
BSMP-03		34%	66%	BSMP-03		43%	57%
BSMP-04		23%	77%	BSMP-04		29%	71%
BSMP-05		37%	63%	BSMP-05		47%	53%
BSMP-06		70%	30%	BSMP-06		79%	21%

Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Marajó			A=Barreiras	B=Marajó
MMAR-01		42%	58%	MMAR-01		53%	47%
MMAR-02		52%	48%	MMAR-02		47%	53%
MMAR-03		40%	60%	MMAR-03		40%	60%
MMAR-04		49%	51%	MMAR-04		49%	51%
MSIB-01		48%	52%	MSIB-01		69%	31%
MSIB-02		50%	50%	MSIB-02		67%	33%
PB-01	Marajó/ A=Barreiras B=Marajó	16%	84%	PB-01	Marajó/ A=Barreiras B=Marajó	17%	83%
PB-02		17%	83%	PB-02		19%	81%
PB-03		8%	92%	PB-03		20%	80%
PA-01		13%	87%	PA-01		17%	83%
PA-02		24%	76%	PA-02		25%	75%
PA-03		21%	79%	PA-03		21%	79%
PSCAS-01		279%	-179%	PSCAS-01		85%	15%

Tabela 16 - Terceiro cenário da modelagem geoquímica com os valores dos membros finais escolhidos e as proporções de mistura entre os membros finais calculadas em cada ponto.

TERCEIRO CENÁRIO									
Modelagem - Menos Chuvoso					Modelagem - Mais Chuvoso				
Membro Final Escolhido					Membro Final				
Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr		Aquífero	Sr <sup>2+</sup> (µg/L)		<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	
Água Meteórica	ACH	6,10	ACH	0,705316	Água Meteórica	ACH	6,10	ACH	0,705316
Barreiras	BB01	83,20	BBNV06	0,727219	Barreiras	BB01	70,10	BSIB-03	0,709849
Marajó	PB03	955,06	PA03	0,708571	Marajó	PB03	990,11	MMAR01	0,708588

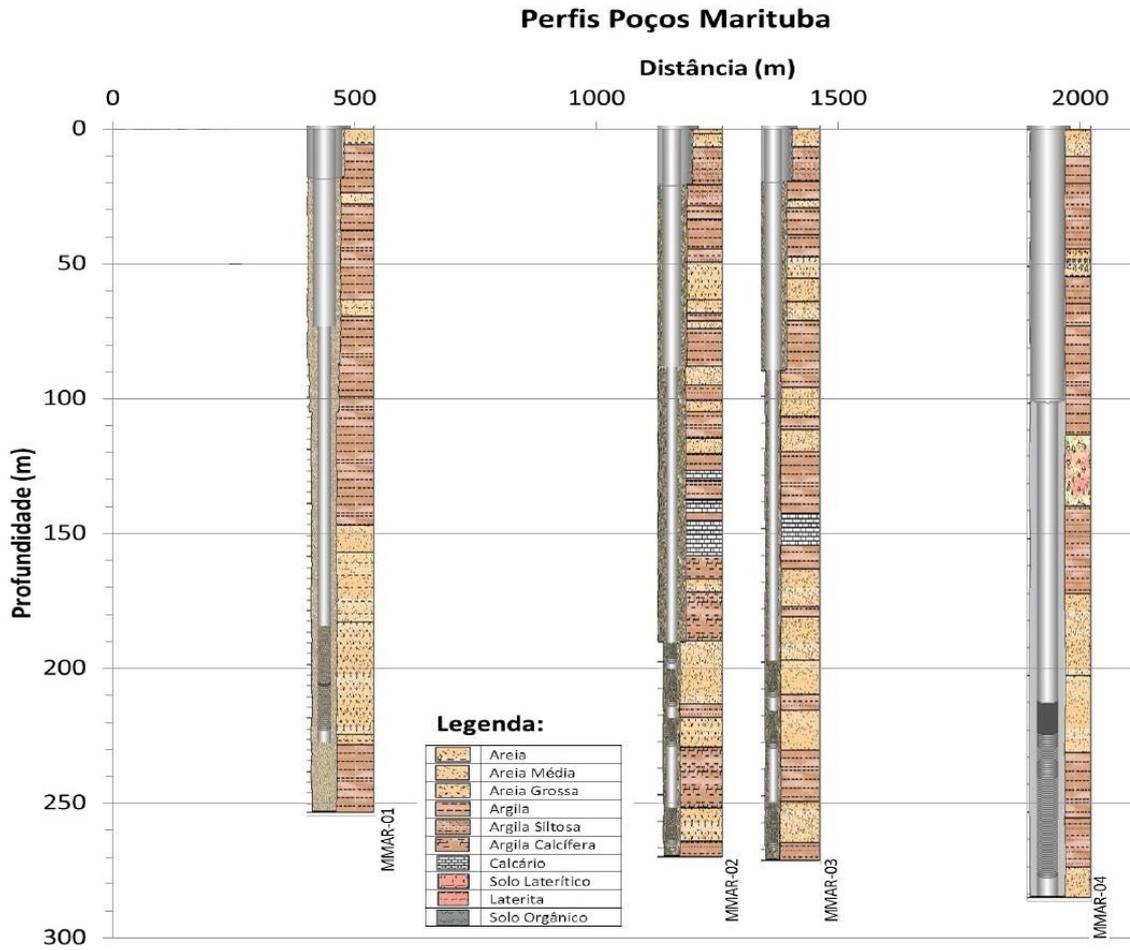
  

Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Água Meteórica			A=Barreiras	B=Água Meteórica
BBNV-01		16%	84%	BBNV-01		25%	75%
BBNV-02		5%	95%	BBNV-02		9%	91%
BBNV-03		7%	93%	BBNV-03		3%	97%
BBNV-04		10%	90%	BBNV-04		12%	88%
BBNV-05		18%	82%	BBNV-05		5%	95%
BBNV-06		4%	96%	BBNV-06		8%	92%
BSIB-01		12%	88%	BSIB-01		9%	91%
BSIB-02		35%	65%	BSIB-02		40%	60%
BSIB-03		23%	77%	BSIB-03		8%	92%
BB-01		81%	19%	BB-01		100%	0%
BB-02		20%	80%	BB-02		25%	75%
BB-03		269%	-169%	BB-03		319%	-219%
BA-01		4%	96%	BA-01		4%	96%
BA-02	Barreiras/ A=Barreiras	20%	80%	BA-02	Barreiras/ A=Barreiras	25%	75%
BA-03	B=Água Meteórica	357%	-257%	BA-03	B=Água Meteórica	441%	-341%
BNB		3%	97%	BNB		4%	96%
BCAS-01		61%	39%	BCAS-01		61%	39%
BCAS-02		29%	71%	BCAS-02		42%	58%
BCAS-03		32%	68%	BCAS-03		58%	42%
BCAS-04		29%	71%	BCAS-04		42%	58%
BCAS-05		67%	33%	BCAS-05		93%	7%
BSMP-01		35%	65%	BSMP-01		44%	56%
BSMP-02		13%	87%	BSMP-02		15%	85%
BSMP-03		40%	60%	BSMP-03		54%	46%
BSMP-04		27%	73%	BSMP-04		37%	63%
BSMP-05		42%	58%	BSMP-05		59%	41%
BSMP-06		81%	19%	BSMP-06		99%	1%

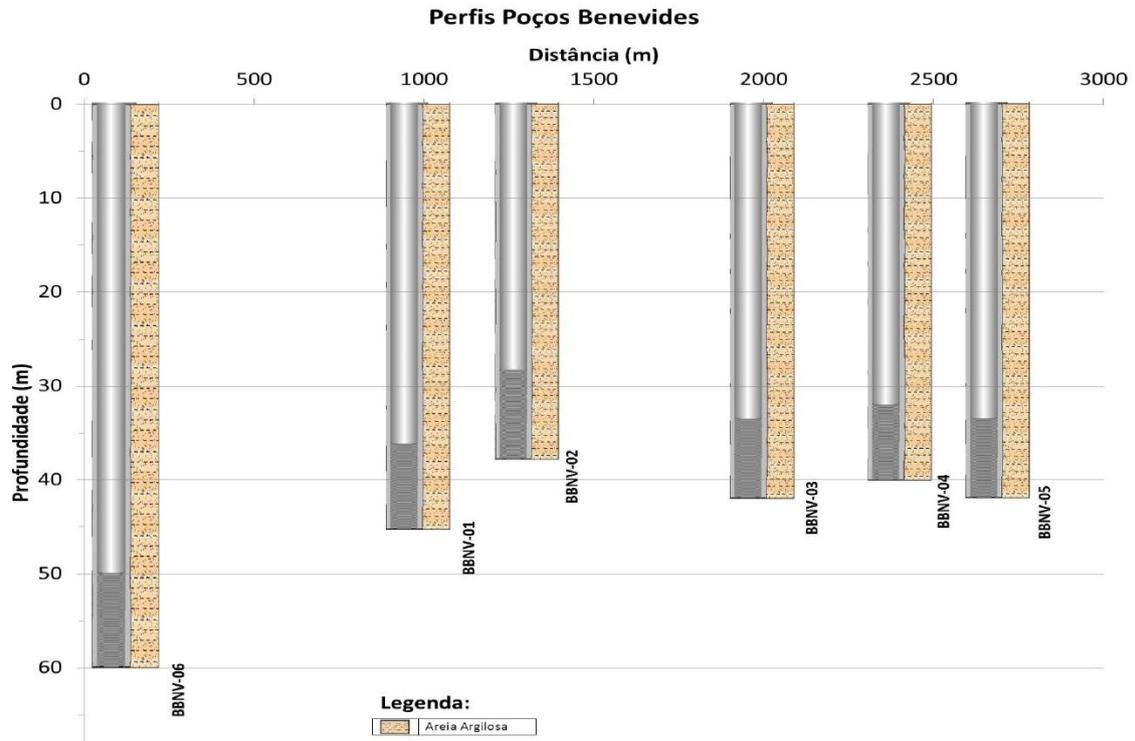
Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais		Amostra	Aquífero/Membros Finais	% Membros Finais	
		A=Barreiras	B=Marajó			A=Barreiras	B=Marajó
MMAR-01		41%	59%	MMAR-01		52%	48%
MMAR-02		52%	48%	MMAR-02		47%	53%
MMAR-03		40%	60%	MMAR-03		39%	61%
MMAR-04		48%	52%	MMAR-04		48%	52%
MSIB-01		48%	52%	MSIB-01		68%	32%
MSIB-02		49%	51%	MSIB-02		65%	35%
PB-01	Marajó/ A=Barreiras	16%	84%	PB-01	Marajó/ A=Barreiras	16%	84%
PB-02	B=Marajó	17%	83%	PB-02	B=Marajó	19%	81%
PB-03		8%	92%	PB-03		20%	80%
PA-01		13%	87%	PA-01		16%	84%
PA-02		24%	76%	PA-02		24%	76%
PA-03		21%	79%	PA-03		21%	79%
PSCAS-01		322%	-222%	PSCAS-01		83%	17%

Figura 40 – Perfis estratigráficos dos poços do aquífero Marajó em Marituba-PA



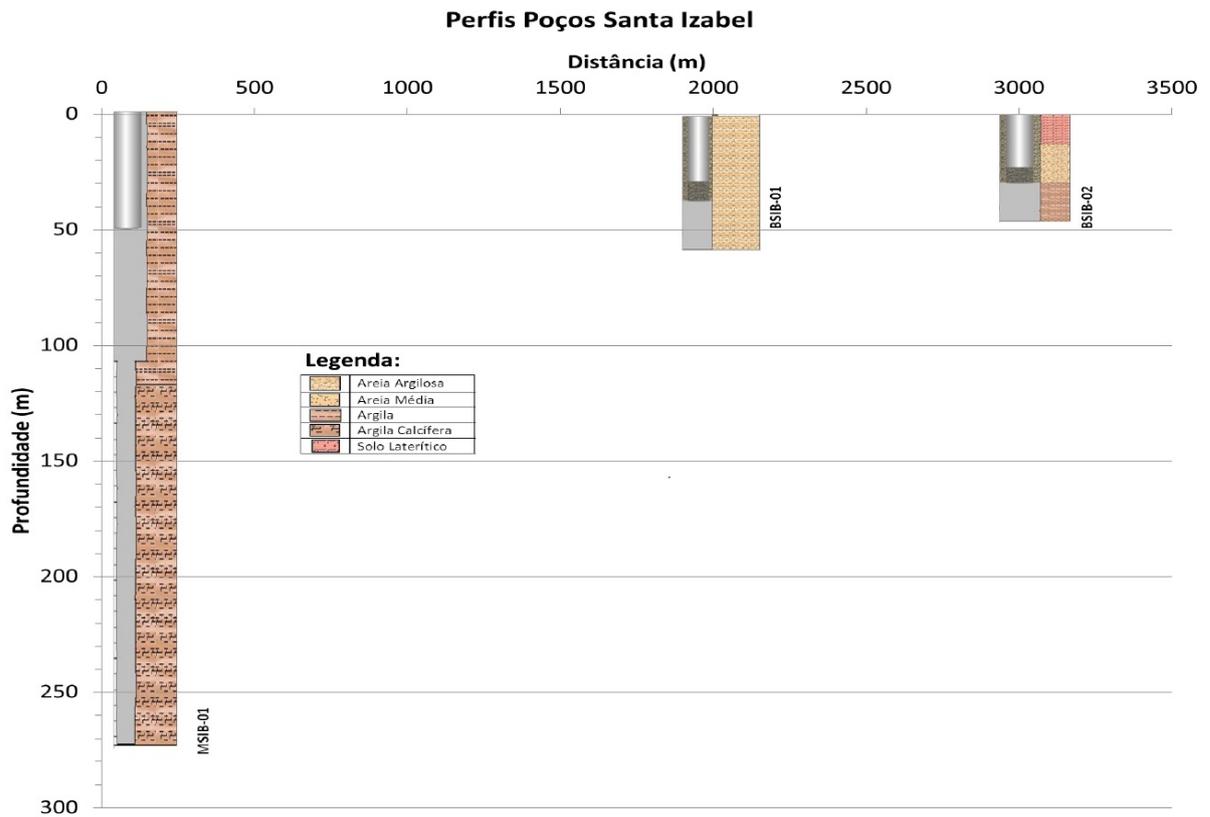
Fonte: SIAGAS-CPRM.

Figura 41 – Perfis estratigráficos dos poços do aquífero Barreiras em Benevides-PA



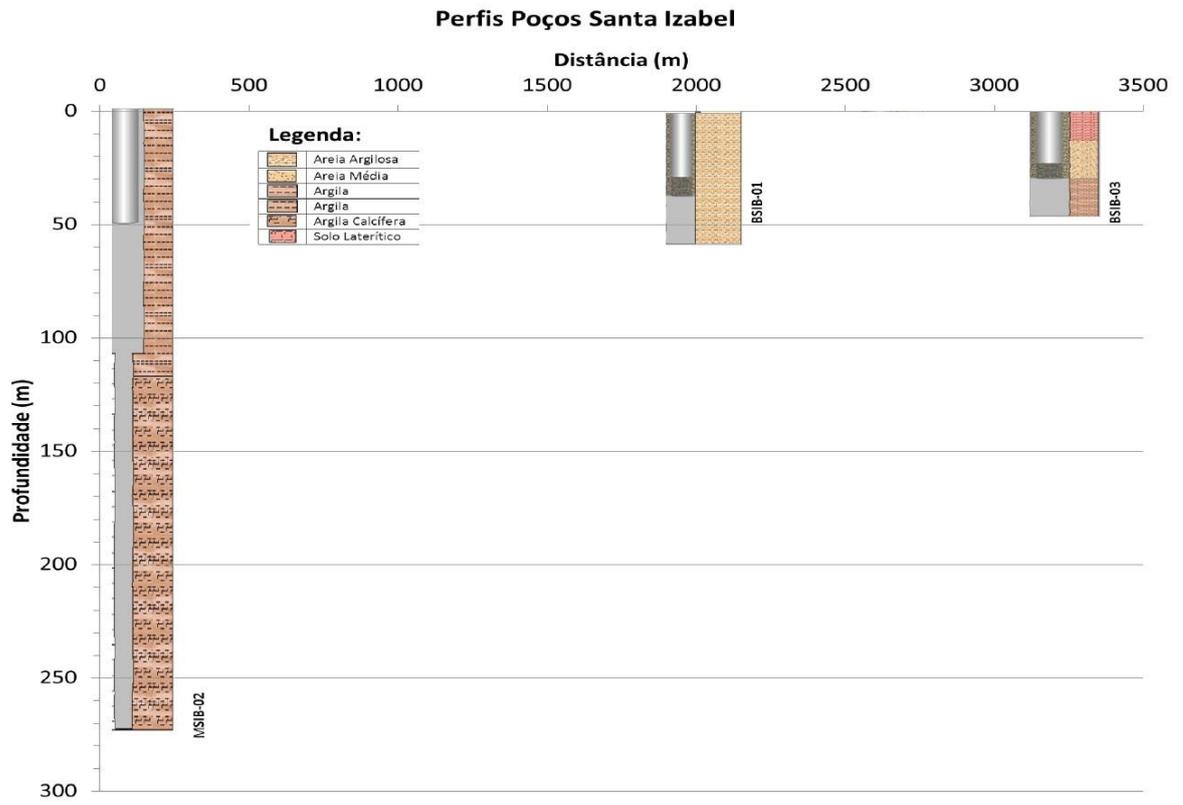
Fonte: SIAGAS-CPRM.

Figura 42 – Perfis estratigráficos dos poços dos aquíferos Barreiras e Marajó em Santa Izabel-PA.



Fonte: SIAGAS-CPRM.

Figura 43 – Perfis estratigráficos dos poços dos aquíferos Barreiras e Marajó em Santa Izabel-PA.



Fonte: SIAGAS-CPRM.



Ministério da Educação  
Universidade Federal do Pará  
Sistema de Bibliotecas

### DECLARAÇÃO DE AUTORIA

Autor: Francisco Áureo Noronha Filho

CPF: 065.575.963-81 Matrícula: 202101770001

Telefone: (91)9.8406-5121 e-mail: franciscoaureonoronha@gmail.com

Curso/Programa: Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica

Orientador: Marco Antonio Galarza Toro

Coorientador: \_\_\_\_\_

Data da Defesa: \_\_\_\_\_

Título/Subtítulo: Variação Sazonal Isotópica De Estrôncio E Hidrogeoquímica Dos Sistemas Aquíferos Barreiras E Marajó Na Borda Leste Da Bacia Do Marajó

Tipo do documento: ( ) TCC<sup>1</sup> ( ) TCCE<sup>2</sup> (X) Dissertação ( ) Tese ( ) Artigo Científico

( ) Livro ( ) Capítulo de livro ( ) Outro: \_\_\_\_\_

Declaro que, para os devidos fins, o presente trabalho é de minha autoria e que estou ciente:

- Dos Artigos 297 a 299 do Código Penal, Decreto-Lei n. 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, que dispõe sobre os Direitos Autorais;
- Do Regimento Interno da Universidade Federal do Pará;
- Da lei 12.527 de novembro de 2011, que trata da Lei de Acesso à Informação;
- Da utilização da licença pública internacional *Creative Commons 4.0*;
- Que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão da mesma como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação referencial.

Francisco Áureo Noronha Filho

Autor

31/01/2024, Belém-PA

Local e Data

<sup>1</sup> Trabalho de Conclusão de Curso

<sup>2</sup> Trabalho de Conclusão de Especialização



Ministério da Educação  
Universidade Federal do Pará  
Sistema de Bibliotecas

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO E DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO EXCLUSIVA PARA  
PUBLICAÇÃO DIGITAL NO PORTAL INSTITUCIONAL DE ACESSO ABERTO DA UFPA**

1. **Tipo de documento:** ( ) TCC<sup>3</sup> ( ) TCCE<sup>4</sup> (X) Dissertação ( ) Tese ( ) Artigo  
Científico ( ) Livro ( ) Capítulo de Livro ( ) Trabalho Apresentado em evento

**2. Informações sobre a obra:**

Autor: Francisco Áureo Noronha Filho

RG: 2007745621-6 CPF: 065.575.963-81 E-mail: franciscoaureonoronha@gmail.com Telefone: (91)9.8406-5121

Curso/Programa: Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica

Orientador: Marco Antonio Galarza Toro Coorientador: \_\_\_\_\_

Título do documento:

Variação Sazonal Isotópica De Estrôncio E Hidrogeoquímica Dos Sistemas Aquíferos Barreiras E Marajó Na Borda Leste Da Bacia Do Marajó

Data da defesa: \_\_\_\_\_ Área do Conhecimento: \_\_\_\_\_

Agência de Fomento (se houver): \_\_\_\_\_

**3. Informação de disponibilização do documento:**

Restrição para publicação: ( ) Total ( ) Parcial (X) Sem restrição

Justificativa de restrição total\*: \_\_\_\_\_

Em caso de restrição parcial, especifique os capítulos restritos: \_\_\_\_\_

A partir de qual data esse documento poderá ser disponibilizado: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**4. Permissões<sup>5</sup>**

Permite o uso comercial da obra? ( ) Sim (X) Não / Permitir modificações na obra? ( ) Sim (X) Não

O documento está sujeito a patentes? ( ) Sim (X) Não

**5. T&D defendidas fora da instituição**

É Tese ou Dissertação defendida fora da UFPA? ( ) Sim (X) Não

31/01/2024, Belém-PA

Local e Data

Francisco Áureo Noronha Filho

Assinatura do autor

Francisco Áureo Noronha Filho

<sup>3</sup> Trabalho de Conclusão de Curso

<sup>4</sup> Trabalho de Conclusão de Curso em Especialização

<sup>5</sup> Creative Commons Internacional 4.0