

## CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM (RMB) E INVESTIGAÇÃO DE POSSÍVEIS MISTURAS ENTRE AS ÁGUAS

Olavo Bilac Quaresma de OLIVEIRA FILHO <sup>1</sup>  
Marco Antonio GALARZA TORO <sup>2</sup>  
Welliam Chaves Monteiro da SILVA <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eng. Ambiental, Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Mestre em Geologia e Geoquímica. Professor Assistente da Universidade do Estado do Amapá (UEAP). olavo1501@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Geólogo, Mestre e Doutor em Geologia e Geoquímica. Professor Adjunto da Universidade Federal do Pará (UFPA). antogt@ufpa.br

<sup>3</sup> Meteorologista, Mestre em Engenharia Agrícola, Doutor em Agronomia. Pesquisador Adjunto da UEAP. wcms00@gmail.com

**RESUMO.** A região metropolitana de Belém (RMB) é palco de intensa exploração de recursos hídricos subterrâneos, seja pelas companhias públicas que captam água do sistema aquífero Pirabas ou de poços residenciais que em geral captam água do sistema aquífero Barreiras. O estudo visou à caracterização hidroquímica das águas da RMB, para identificar misturas entre os dois principais sistemas aquíferos e suas vulnerabilidades. No sistema Barreiras os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  são os principais elementos presentes. No sistema Pirabas, os íons predominantes são o  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . Estudos estatísticos mostraram correlações entre os sistemas aquíferos ( $\geq 0,8$ ) e no modelamento geoquímico há evidência de certo grau de mistura entre os aquíferos (10%), conforme demonstra o diagrama de Schoeller, sugerindo misturas entre os aquíferos estudados, de forma mais evidente no período chuvoso.

**Palavras-chave:** Hidrogeoquímica, aquífero Pirabas, aquífero Barreiras, águas subterrâneas

**ABSTRACT.** *Hydrogeochemical characterization of the Barreiras and Pirabas Aquifers Systems of the the Metropolitan Region of Belém (MRB) and research of possible mixtures.* The metropolitan region of Belém (MRB) is scene of intense exploitation groundwater resources, whether by public companies collect water from the Pirabas aquifer or residential wells that generally capture water from the Barreiras Aquifer. This study aimed to characterize the hydrochemical these waters, to identify mixtures of the two main aquifer systems and their vulnerabilities. At Barreiras the  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  are the major elements present. In Pirabas, are the predominant ions  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ . Statistical studies show good correlations between aquifers ( $\geq 0.8$ ) and geochemical modeling is clearly evidence of a certain degree mix between aquifers (10%), as shown the Schoeller diagram, suggesting mixtures between the studied aquifers, most clearly in the rainy season.

**Keywords:** Hydrogeochemistry,, Pirabas and Barreiras Aquifers, Groundwater.

### INTRODUÇÃO

A água é uma substância fundamental para a sobrevivência dos seres vivos, nela surgiram às primeiras formas de vida, exercendo papel fundamental na evolução das espécies. De fato, há grande quantidade de água distribuída no planeta, porém menos de 3% da água do mundo é doce, restando menos de 1% com qualidade para o consumo (MATTA, 2002).

Os recursos hídricos são explotados em demanda crescente para diversas finalidades, muitas vezes fruto do crescimento desordenado, somando-se a isso a falta de políticas públicas que busquem menor impacto na qualidade das águas (MATTA, 2002).

Nesse contexto inserem-se várias capitais e distritos brasileiros, tal qual a Região Metropolitana de Belém (RMB), com uma população próxima a 2.000.000 de habitantes (municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Santa Bárbara do Pará,

Benevides e Santa Isabel do Pará) e diversos problemas, quer seja na distribuição de moradias como nas condições sanitárias da região. Matta (2002), Cabral (2004), Costa (2004) e Paranhos (2010) destacaram os riscos de contaminação de aquíferos devido à ocupação desordenada, bem como características geológicas peculiares na RMB.

Dentre as características geológicas peculiares da região nordeste do Pará, Costa (2004) e Palheta (2008) enfatizaram a influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos dos dois principais sistemas de águas subterrâneas na RMB (Sistemas Barreiras e Pirabas).

As falhas normais, por serem as superfícies potenciais de menor pressão, constituem-se num dos locais de maior favorabilidade para a recarga dos aquíferos por elas interceptados. Daí decorre uma grande preocupação no que diz respeito à possibilidade de contaminação desses aquíferos por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, haja vista muitas delas estarem

completamente oneradas pela ocupação humana sejam pela urbanização ou por atividade agrícola. E segundo estudo de Paranhos (2010) utilizando a hidrogeoquímica do sistema aquífero Pirabas em Icoaraci, foi observado possível mistura entre os aquíferos.

Diversas pesquisas hidrogeoquímicas e correlatos foram realizados na região de estudo, destacando-se Cabral (2004), Paranhos (2010), Bezerra (2012) e Silva (2015).

A área de interesse para o estudo compreende quatro sub-áreas: 1<sup>o</sup> – No distrito de Icoaraci em Belém onde foram amostrados 3 poços da SAAEB (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém), com poços de profundidade média de 150 a 270 metros, os quais correspondem ao sistema aquífero Pirabas, bem como 3 poços rasos, correspondentes ao sistema aquífero Barreiras; 2<sup>o</sup> – No município de Ananindeua, 3 poços profundos da COSANPA (Companhia de Saneamento do Pará), com poços de profundidade média similar aos poços da SAAEB (Aquífero Pirabas), mais 3 poços rasos nessa região, 3<sup>o</sup> – No município de Capanema, 2 poços rasos (15 a 40 metros), local de reconhecida recarga para o sistema aquífero Pirabas, 4<sup>o</sup> – No município de Benevides, em 1 poço raso de (25 metros), local de reconhecida recarga do aquífero Barreiras.

Realizou-se estudos entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, da hidrogeoquímica nas sub-áreas de Icoaraci e Ananindeua, bem como na região de Benevides e Capanema (para fins comparativos da região de recarga do aquífero Pirabas) durante um ciclo hidrológico completo, na tentativa de identificar misturas entre os aquíferos.

## CONTEXTO

### Contexto Geológico

A região nordeste do Pará apresenta uma cobertura sedimentar sobrejacendo a um embasamento cristalino, o qual apresenta rochas de variados graus de metamorfismo, como gnaisses, quartzitos, xistos e filitos.

No quadro 1 observa-se a proposta de integralização de dados segundo Sauma Filho (1996), no qual a seqüência sedimentar do Terciário compreende o Grupo Barreiras de origem essencialmente continental e a Formação Pirabas, de origem marinha.

### Neotectônica do Nordeste Paraense e de Belém

Até a década de 70 acreditava-se que a região nordeste do Pará, assim como outras áreas de idade cenozóica no Brasil, fosse estável, sem indícios de tectonismo recente (PALHETA, 2008). Entretanto, após investigações de campo e análise por sensoriamento remoto identificou-se feições e estruturas tectônicas que acrescentaram uma nova perspectiva quanto ao processo neotectônico do nordeste do Pará. Foram realizados estudos no qual estabeleceram-se relações de neotectonismo com diversas áreas da Amazônia (BORGES et al., 1995; COSTA et al., 1991; COSTA, 1996; COSTA et al., 1996; COSTA, 2004; PALHETA, 2008).

Segundo Bemerguy et al. (1995) duas grandes movimentações neotectônicas caracterizaram a região nordeste do Pará, considerando os intervalos do Mioceno-Plioceno e Pleistoceno-Holoceno.

#### Mioceno - Plioceno

As manifestações neotectônicas, na região nordeste do Pará, em geral, são caracterizadas pelo desenvolvimento de estruturas transtensivas (COSTA et al., 1996; PALHETA, 2008). Estas falhas transtensivas ocorrem nas regiões da ilha de Marajó, Belém, Ipixuna do Pará e zonas litorâneas. Segundo Palheta (2008) compreendem falhas mestras normais, lítricas e planares, na direção NW-SE, inclinadas para NE, as quais estruturam a bacia na qual foram depositados os sedimentos da seqüência Pirabas-Barreiras.

De acordo com Costa et al. (1996) e Palheta (2008), a evolução tectono-sedimentar dessa bacia de afastamento é relacionada a duas fases:

1) avanço do mar Pirabas controlado pelas falhas normais (NW-SE) e conseqüentemente a sedimentação dos carbonatos da Formação Pirabas;

**Quadro 1** – Coluna Estratigráfica da Cobertura Sedimentar da Região Nordeste do Pará

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
Cenozóico	Quaternário	Holoceno	Sedimentos modernos	Sedimentos recentes quartzosos com matéria orgânica; argila, silte e areia.
		Pleistoceno	Pós-Barreiras	Sedimentos areno-argilosos inconsolidados, quartzosos, siltico-argilosos com arenitos ferruginosos intercalados.
	Terciário	Mioceno-pleioceno	Formação Barreiras	Arenitos de granulometria variada, mal selecionados, argilosos, intercalados a siltitos e argilosos de cores variadas, tendo-se ainda níveis de concreções ferruginosas.
		Oligo-mioceno	Formação Pirabas	Calcários e margas, intercalados com folhelhos cinza-esverdeados e arenitos calcíferos.

Fonte: Sauma Filho (1996).

2) movimentações sucessivas ao longo das falhas normais, que geraram a deposição da seqüência siliciclástica da Formação Barreiras. As falhas transcorrentes dextrais NE-SW, que também atuaram durante a evolução da bacia, podem ser responsáveis pelo controle da distribuição das seqüências sedimentares na direção NW-SE.

#### **Pleistoceno – Holoceno**

Durante essa época, ocorreu o surgimento no nordeste paraense de diversas estruturas romboédricas transtensivas, de dimensões variadas, assimétricas e simétricas, representadas por falhas transcorrentes dextrais E-W que se interligam por meio de falhas normais NW-SE, NNW-SSE e N-S, definindo bacias de afastamento (COSTA et al., 1996, PALHETA, 2008).

Ainda segundo Palheta (2008) a movimentação das falhas normais provocou a distribuição, em faixas alternadas, das formações Ipixuna e Barreiras. Expôs isolada a Formação Pirabas em meio a Formação Barreiras; promoveu o basculamento da Ilha de Marajó; possibilitou a deposição da seqüência Pós-Barreiras; gerou formação de arcos, de cotovelos, de segmentos retos, de capturas e de segmentos meandantes na rede de drenagem (Fig. 1).

Já em estudo de Igreja et al. (1990), a região de Belém é definida por duas direções principais de

feixes de falhas, que são as zonas normais NE-SW e Zonas transferentes NW-SE.

#### **Zonas normais NE-SW**

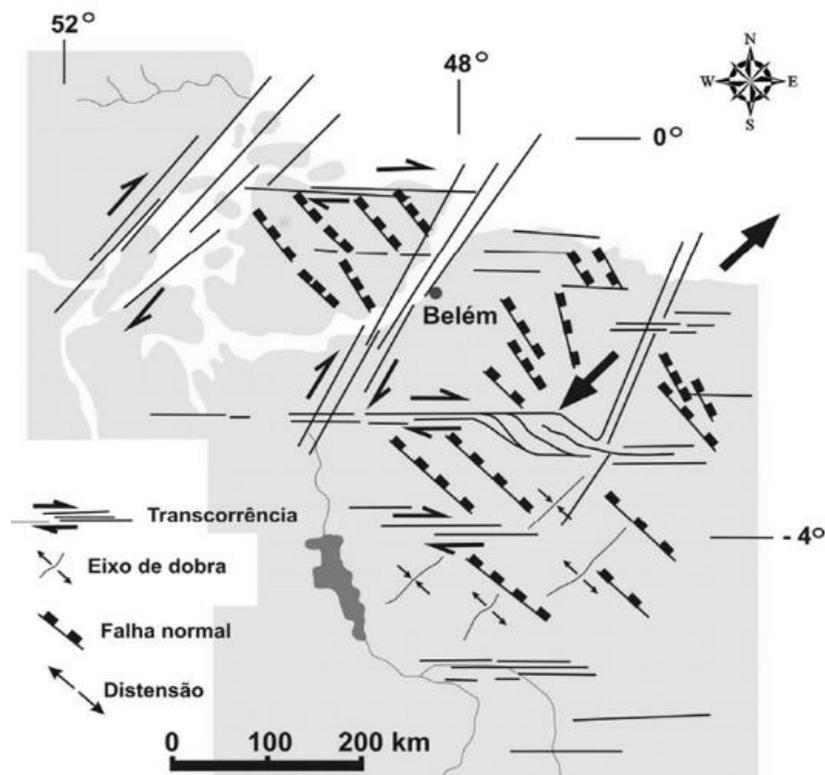
Segundo Palheta (2008) são falhas normais N50°-60°E com mergulhos fortes para NW. São caracterizadas por rotações nas camadas sedimentares impostas nas estruturas primárias e nos níveis lateríticos da Formação Barreiras, com inclinações de até 30° em direção ao continente, no sentido SE.

#### **Zonas Transferente NW-SE**

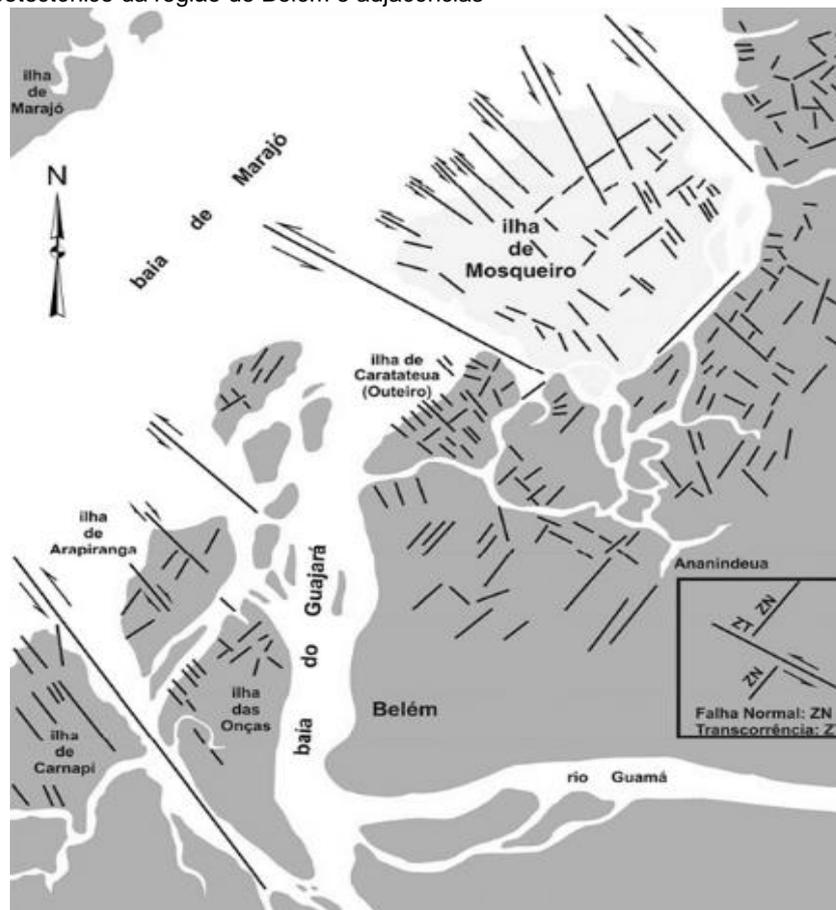
Palheta (2008) afirma que são falhas transcorrentes dispostas nas direções N45°-55°W com mergulhos subverticais que recortam litotipos, principalmente argilosos. Estas falhas são definidas por estruturas hidroplásticas como cataclasitos foliados descontínuos, porções elipsoidais menos deformadas posicionadas ao longo das zonas transcorrentes, e fragmentados de argilitos gerados por interseção de falhas.

Considerando o estudo de Igreja et al. (1990), as falhas normais (NE-SW) permitiram regionalmente posicionar a direção NW-SE como a de maior estiramento. De posse da informação, Igreja et al. (1990) elaboraram um modelo esquemático do arranjo neotectônico da região de Belém e adjacências, conforme Figura 2.

**Figura 1.** Estruturas paleogenas-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).

**Figura 2.** Modelo neotectônico da região de Belém e adjacências

Fonte: Igreja et al. (1990); Palheta (2008).

A partir do estudo de Costa (2004), o qual se baseia na análise de drenagem da RMB e na geometria dos aquíferos a partir de falhas normais, pode-se evidenciar a influência da neotectônica devido à similaridade de arranjo (Fig. 3). E segundo Pinheiro (2009), a correlação de poços situados em um mesmo bloco individual demonstra que as camadas geológicas que ocorrem em cada um deles têm atitudes distintas, certamente influenciadas pela atuação de processos neotectônicos.

Por serem falhas normais superfícies potenciais de menor tensão, elas constituem um dos locais mais favoráveis para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas, pois as falhas e fraturas abertas são condutos dos sistemas hidrogeológicos.

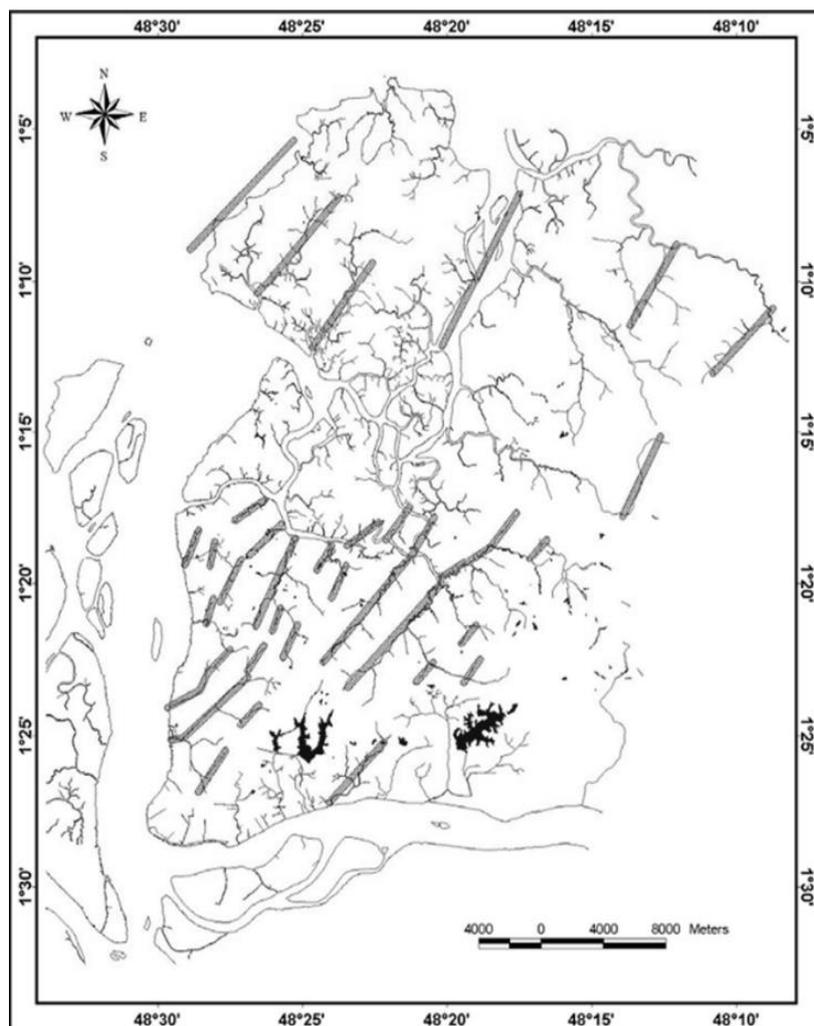
### Hidrogeologia

Os principais sistemas hidrogeológicos no nordeste paraense, de forma geral são conhecidos como sistema hidrogeológico Pirabas, sistema hidrogeológico Barreiras e o sistema hidrogeológico Pós-Barreiras (SAUMA FILHO, 1996).

O sistema Pirabas, localizado em rochas das formações homônimas, corresponde à unidade aquífera inferior, formada por dois sistemas aquíferos do tipo multicamada, denominados inicialmente de Pré-Pirabas e Pirabas e depois modificados por Matta (2002) para Pirabas Inferior e Pirabas Superior.

### *Pirabas Inferior*

O sistema hidrogeológico mais profundo é o Pirabas Inferior, sendo composto predominantemente de uma sequência rítmica onde arenitos de cor cinza-esbranquiçado, granulação fina à conglomerática, se intercalam com camadas mais espessas de argilitos e siltitos avermelhados. Formam um sistema estratificado e confinado pelo pacote sobrejacente, e, se caracterizam por uma permeabilidade vertical variável. Estes aquíferos estão localizados a profundidades superiores a 180 m e apresentam características hidráulicas que permitem caracterizá-los como excelentes; suas vazões podem chegar ou mesmo superar valores de 300 m<sup>3</sup>/h (PARANHOS, 2010).

**Figura 3.** Mapa de prováveis áreas principais de recarga na RMB, localizadas ao longo do traçado de falhas normais

Fonte: Costa (2004).

### ***Pirabas Superior***

O primeiro sistema hidrogeológico, denominado de Pirabas Superior, é caracterizado por argilitos calcíferos de cor cinza-esverdeado e calcário duro, de coloração cinza claro, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, siltitos e arenitos no intervalo de profundidade de 70 a 180 metros. O potencial desse aquífero é moderado, entretanto, verificam-se permeabilidades relativamente altas nos arenitos de granulação mais grossa.

Do ponto de vista da qualidade das águas, apresentam água de boa qualidade, não havendo restrição para o consumo humano. O conteúdo de sólidos totais dissolvidos oscila entre 242 e 383 mg/L, a dureza total (em CaCO<sub>3</sub>) varia entre 110 a 235 mg/L, com uma média de 165 mg/L CaCO<sub>3</sub> (PARANHOS, 2010). Segundo a classificação de Boyd (1990), são águas moderadamente dura a dura. O manganês e o ferro, dependendo da área onde o poço foi construído apresentam concentrações baixas (PARANHOS, 2010).

### ***Sistema Barreiras***

Aparece em profundidades de 25 a 90 metros, com camadas aquíferas em torno de 70 metros de profundidade, de natureza livre a confinada, neste caso pela presença de camadas argilosas sucessivamente intercaladas com areias, com vazões entre 10 e 70 m<sup>3</sup>/h. Possui certo grau de vulnerabilidade, e um dos principais problemas é o teor excessivo de ferro (acima de 0,3 mg/L), fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde nº 2.914/2011 (MATTA, 2002; CABRAL, 2004).

### ***Sistema Pós-Barreiras***

É formado por camadas de rochas argilo-arenosas, inconsolidadas, que ocorrem até os primeiros 25 metros de profundidade. Esses aquíferos apresentam um fraco potencial hidrogeológico. Apresentam caráter livre a semiconfinado, mostrando grande vulnerabilidade atestada por altos índices de nitrato e amônia (MATTA, 2002; CABRAL, 2004).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Localização dos Pontos

As amostragens foram realizadas em regime bimestral de Julho-Agosto de 2010 a Maio-Junho de 2011 caracterizando um ciclo hidrológico completo, contemplando os meses chuvosos e meses mais secos. Considerando o referido período, totalizou-se (6) seis campanhas de coleta (Fig. 4).

A nomenclatura das siglas da Figura 4 são as seguintes: PC (Aquífero Pirabas - Poços Capanema); BNB (Aquífero Barreiras - Poço Benevides); BB (Aquífero Barreiras - Poços Belém); BA (Aquífero Barreiras - Poços Ananindeua); PB (Aquífero Pirabas - Poços Belém); PA (Aquífero Pirabas - Poços Ananindeua); ACH (Água da Chuva); RFB (Rocha da Formação Barreiras) e RFP (Rocha da Formação Pirabas).

Adotaram-se as campanhas de Julho-Agosto/2010, Setembro-Outubro/2010 e Maio-Junho/2011, como período seco, enquanto Novembro-Dezembro/2010, Janeiro-Fevereiro/2011

e Março-Abril/2011 foram considerados para efeito de análise e cálculo como período chuvoso.

Para o estudo da química das águas do aquífero Barreiras e Pirabas, em Ananindeua e Icoaraci, foram escolhidos 3 poços em cada unidade aquífera: em Ananindeua serão utilizados 3 poços profundos na COSANPA e 3 poços rasos de particulares; em Icoaraci, foram utilizados 3 poços profundos da SAAEB, bem como 3 poços rasos de particulares, totalizando 6 amostras em cada sub-área, 12 amostras no total (cada campanha de coleta), foram realizados ainda coletas de 2 amostras em poços rasos em Capanema (Aquífero Pirabas) e em 1 poço raso de Benevides (Aquífero Barreiras). Ressalta-se que para efeito de análise gráfica foram individualizados em Poços Barreiras e Pirabas.

Na figura 5 consta um perfil litológico da RMB, sendo que os poços amostrados tanto da seção hidrogeológica mais rasa (Barreiras), quanto as mais profundas (Pirabas) estão presentes na respectiva ilustração.

**Figura 4.** Mapa de localização e de amostragem da área de trabalho (Belém – Distrito de Icoaraci, e Ananindeua), mostrando os pontos de backgrounds Benevides e Capanema

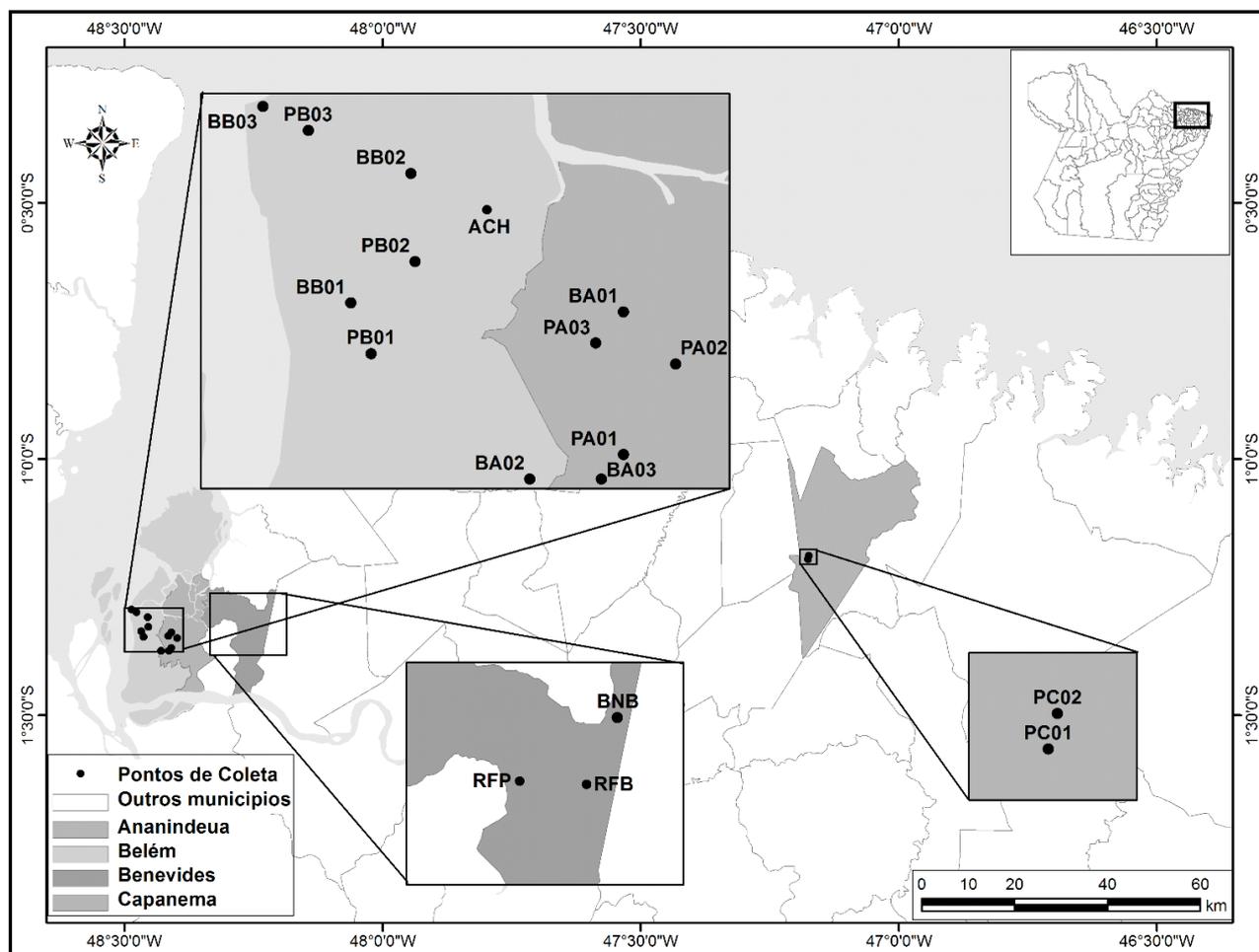
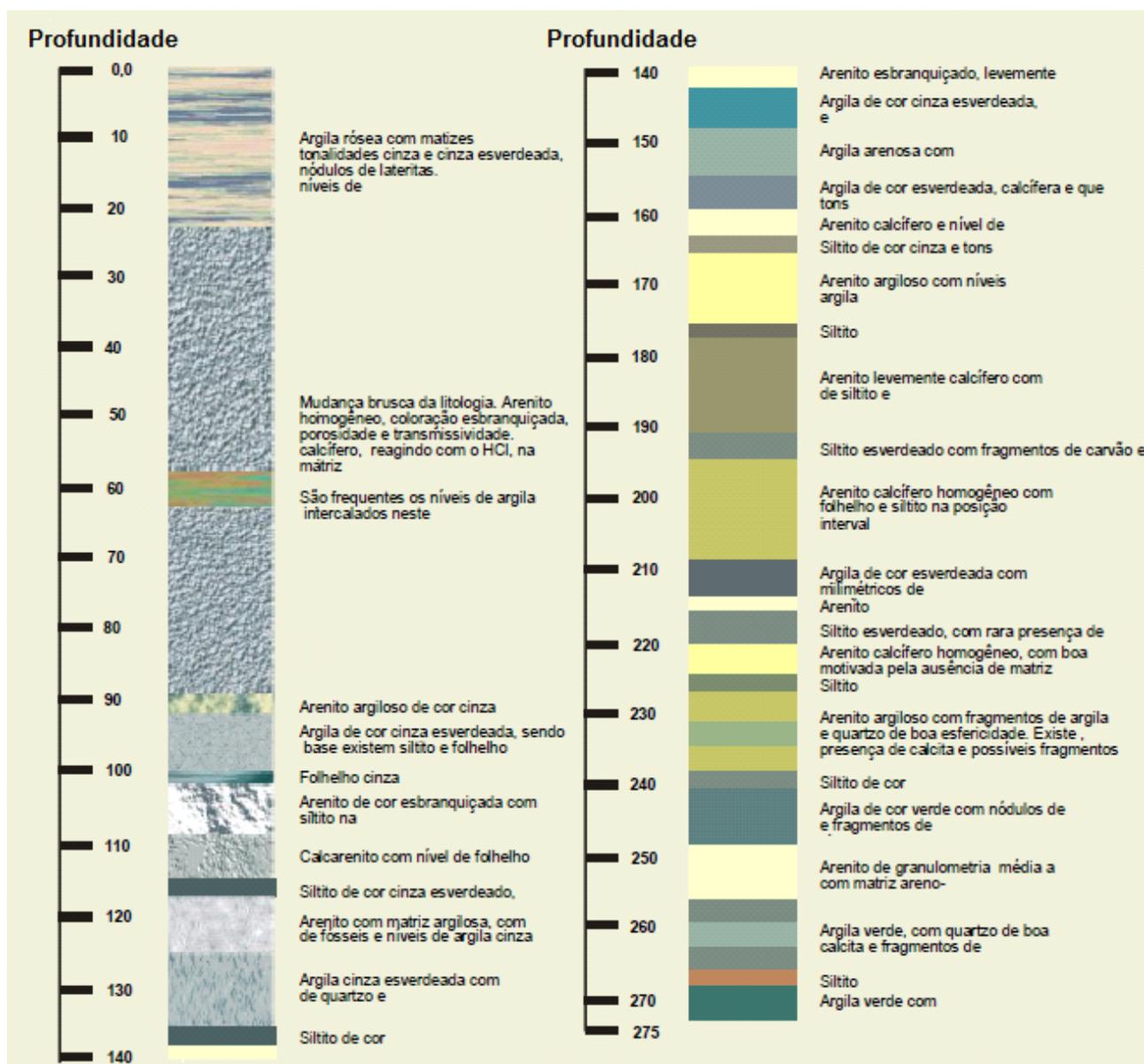


Figura 5. Perfil Litológico da Região Metropolitana de Belém (RMB)



Fonte: Adaptado de (COSTA, 2004)

### Parâmetros Físico-Químicos

Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos in situ (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos), por meio do equipamento Orion modelo 920A, em seguida foram acondicionadas em baixa temperatura para transporte até o laboratório de hidroquímica do Instituto de Geociências (IG) da UFPA, para análise de Bicarbonato, Ferro Total, Sílica. Ressalta-se que os elementos maiores (Si, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, Cl, N) foram realizados no laboratório de cromatografia do IG, da UFPA.

### Bicarbonato

Para determinar a concentração de Bicarbonato encontra-se inicialmente a alcalinidade total, determinada por meio do método titulométrico com  $H_2SO_4$  (0,02N), padronizado, pipetando 100 mL das amostras e o mesmo volume aplicado para um branco obtido com água destilada. Como indicadores foram usados a fenolftaleína e o alaranjado de metila, e os resultados expressos em mg/L de  $CaCO_3$ . A concentração de bicarbonato foi determinada a partir dos valores numéricos da alcalinidade total, que são multiplicados pela constante 1,22 (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1976).

### **Ferro Total**

Para determinar a concentração de Ferro Total utilizou-se o método da orto-fenantrolina, com a determinação espectrofotométrica de ferro por meio do espectrofotômetro marca BECKMAN DU-6 com = 510 nm em cubeta de 1 cm. Nesse método, o ferro solúvel é reduzido a ferro ferroso com hidroxilamina em meio ácido e, em seguida, tratado com orto-fenantrolina em pH 3,2 a 3,3. A coloração do complexo vermelho-alaranjado é independente do pH (faixa 3 a 9). A concentração de ferro total é obtida mediante curva de calibração a partir de padrões pré-estabelecidos (CETESB, 1978).

### **Sílica**

A concentração de sílica foi obtida utilizando o método de Grasshoff (1964) combinando reagentes, ácido ascórbico e ácido oxálico com as seguintes finalidades: (i) para reduzir o excesso de molibdato presente, (ii) para reduzir a influência do fosfato presente na amostra.

### **Cátions e Ânions**

As concentrações de cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) foram determinadas por cromatografia líquida utilizando-se cromatógrafo de íons DIONEX DX-120. Para a análise de cátions utilizou-se coluna catiônica (CSRS ULTRACS12A DIONEX), eluente 20 Mm MSA (Ácido Metanosulfônico) e fluxo 1,0 mL  $\text{min}^{-1}$ . Para análise dos ânions utilizou-se a coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 DIONEX), como eluente solução 3,5 mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3/1,0$  mM  $\text{NaHCO}_3$  e fluxo 1,2 mL  $\text{min}^{-1}$ .

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das médias analíticas dos parâmetros analisados, considerando o período sazonal.

No período seco e chuvoso os diversos parâmetros analisados sofreram variação, com ligeira queda das concentrações iônicas no período chuvoso, fruto da diluição e conseqüente diminuição dos íons em solução. O balanço iônico das amostras de poços no Barreiras atingiram um erro máximo de 13,2 % na amostra BA-03, estando dentro do limite aceitável segundo Custódio e Llamas (1976), pela dificuldade de mensurar concentrações iônicas em amostras de baixas concentrações de elementos. Enquanto no Pirabas, o erro máximo foi na amostra BP-01 com 8,7%, erro permissível, ainda conforme estudo de Custódio e Llamas (1976).

O parâmetro STD demonstra com clareza a diferença entre os dois sistemas aquíferos, no qual a quantidade de íons e substâncias dissolvidas nas águas do sistema Pirabas é muito superior à do Barreiras. Isso se deve ao tempo de percolação e residência das águas nestes aquíferos. A alta

concentração de  $\text{HCO}_3^-$  reflete a grande disponibilidade deste eletrólito no Pirabas devido à dissolução da calcita.

No sistema Barreiras, as águas apresentam pH relativamente baixo, refletindo a pouca ou nenhuma disponibilidade de  $\text{HCO}_3^-$  em solução.

Conforme a tabela 1 não foi detectado o parâmetro  $\text{HCO}_3^-$ , tal motivo ocorre pela faixa de pH obtidos (abaixo de 5,7) conforme Fenzl (1986), todavia é importante destacar que esse ânion foi detectado nas águas do Barreiras em outros estudos realizados em Belém. Cabral e Maia (2006) determinaram concentração média de 0,66 meq  $\text{L}^{-1}$ . Já Cortez et al. (2000) encontraram valor máximo de 0,04 meq  $\text{L}^{-1}$ , refletindo as condições físico-químicas regionais das águas do Barreiras.

O parâmetro  $\text{NO}_3^-$  é detectado nas águas do sistema Barreiras, sua presença dá-se principalmente pela descarga de esgotos e detergentes no aquífero que segundo Bezerra (2012) é fundamental para o aparecimento do referido parâmetro). Isso é reforçado pelo parâmetro  $\text{NH}_4^+$  que é uma forma nitrogenada reduzida do  $\text{NO}_3^-$  que indica poluição recente. O  $\text{NH}_4^+$  foi detectado nas águas dos poços Barreiras, demonstrando a sua vulnerabilidade. No Pirabas, não foram detectados valores destes dois parâmetros.

Na Figura 6A é apresentado o comportamento sazonal da sílica, expresso na forma de  $\text{SiO}_2$ , observando valores nas águas dos poços Barreiras que variam entre 0,85 a 7,60 mg  $\text{L}^{-1}$ , enquanto que os valores encontrados nas águas do sistema Pirabas oscilaram entre 6,06 a 16,02 mg  $\text{L}^{-1}$ . Ressalta-se que em rochas carbonáticas é comum a presença de sílica amorfa relacionada à presença de carapaças de diatomáceas, refletindo o valor encontrado no sistema aquífero Pirabas.

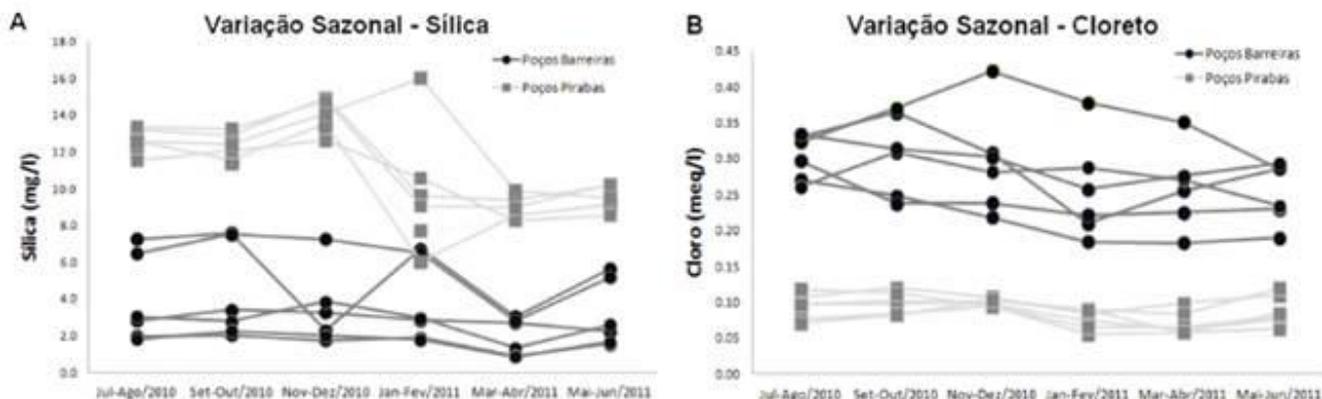
Segundo Custódio e Llamas (1976) a maioria das águas naturais têm de 1 a 40 mg  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{SiO}_2$ , podendo chegar até 100 mg  $\text{L}^{-1}$  em águas bicarbonatadas sódicas, sendo provável que maior parte da sílica nas águas subterrâneas esteja com  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , em parte dissolvida e em parte coloidal, dependendo do pH.

Na Figura 6B é observado o íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ). Ele está presente nas águas subterrâneas e pode ser originado a partir de várias fontes, como a dissolução de sais e minerais. Este ânion tem alta solubilidade, porém quando em solução permanece estável. Segundo Ramage (2005) a solubilidade dos sais de cloro em geral não envolve reações tipo oxidação/redução, tornando este elemento um dos mais móveis no ciclo geoquímico. Em subsuperfície é encontrado em depósitos sedimentares de ambiente marinho e desértico, em minerais como halita, carnalita, silvita, entre outros. As águas do sistema Barreiras mostraram valores de cloreto que variaram entre 0,18 a 0,42 meq  $\text{L}^{-1}$ , influenciados decisivamente pelo *input* atmosférico de água meteórica. As amostras do Pirabas variam de 0,05 a 0,12 meq  $\text{L}^{-1}$ .

**Tabela 1.** Parâmetros físicos e químicos das amostras estudadas nos períodos sazonais

Parâmetros		pH	Temp.	CE	Fe (t)	STD	Silica	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	
Unidades	Amostras	-	°C	µS/cm	meq L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>		meq L <sup>-1</sup>										
PERÍODO SECO	BARREIRAS	BB-01	4,34	29,40	17,94	0,01	63,67	2,83	ND	0,33	0,07	0,12	0,42	0,03	0,04	0,01	0,10	0,002
		BB-02	4,60	28,57	64,27	0,003	41,73	2,82	ND	0,24	0,06	0,07	0,33	0,01	0,01	0,00	0,06	0,001
		BB-03	5,71	29,27	34,69	0,01	54,00	1,85	ND	0,33	0,13	0,10	0,39	0,01	0,04	0,05	0,13	0,005
		BA-01	4,72	27,20	40,11	0,01	18,33	6,83	ND	0,25	0,08	0,07	0,42	0,02	0,01	0,001	0,02	0,001
		BA-02	5,67	28,07	31,37	0,001	10,33	6,38	ND	0,27	0,06	0,06	0,38	0,01	0,01	0,001	0,02	0,001
		BA-03	5,22	28,20	50,10	0,01	41,00	1,91	ND	0,31	0,10	0,13	0,33	0,03	0,03	0,01	0,13	0,006
	PIRABAS	PB-01	7,27	29,27	332,47	0,02	154,00	10,75	1,85	0,11	ND	0,14	0,16	ND	0,04	0,09	2,03	0,019
		PB-02	7,47	30,17	326,73	0,01	150,67	11,10	1,88	0,09	ND	0,13	0,09	ND	0,04	0,09	2,05	0,018
		PB-03	7,56	30,07	321,87	0,01	151,67	10,71	1,95	0,10	ND	0,14	0,13	ND	0,04	0,09	2,07	0,020
		PA-01	7,42	30,17	385,33	0,01	176,67	12,09	2,08	0,10	ND	0,10	0,11	ND	0,04	0,10	2,25	0,019
		PA-02	7,45	29,77	354,27	0,01	159,67	12,28	2,02	0,08	ND	0,10	0,12	ND	0,04	0,10	2,16	0,017
		PA-03	7,59	29,63	343,27	0,01	157,67	11,49	1,94	0,08	ND	0,13	0,12	ND	0,04	0,09	2,12	0,018
PERÍODO CHUVOSO	BARREIRAS	BB-01	4,66	28,97	13,94	0,01	65,00	2,93	ND	0,26	0,08	0,13	0,39	0,03	0,04	0,001	0,09	0,002
		BB-02	4,95	27,10	54,83	0,001	25,67	2,72	ND	0,20	0,05	0,06	0,31	0,01	0,01	0,001	0,04	0,0001
		BB-03	5,45	28,27	30,33	0,01	54,00	1,52	ND	0,38	0,13	0,12	0,40	0,04	0,03	0,04	0,22	0,005
		BA-01	5,39	27,40	34,57	0,01	16,00	4,01	ND	0,23	0,07	0,08	0,40	0,02	0,01	0,001	0,02	0,0001
		BA-02	5,37	27,73	20,80	0,00	11,00	5,52	ND	0,28	0,07	0,07	0,41	0,01	0,01	0,001	0,04	0,0001
		BA-03	5,04	28,13	58,70	0,001	35,67	1,54	ND	0,28	0,11	0,14	0,31	0,04	0,03	0,01	0,25	0,006
	PIRABAS	PB-01	7,31	29,90	342,33	0,02	162,33	9,63	1,78	0,10	ND	0,13	0,15	ND	0,04	0,09	1,93	0,019
		PB-02	7,45	29,43	329,67	0,01	156,00	9,37	1,69	0,08	ND	0,13	0,10	ND	0,04	0,10	1,96	0,019
		PB-03	7,76	29,57	287,33	0,01	135,33	10,48	1,80	0,09	ND	0,13	0,14	ND	0,05	0,10	1,99	0,018
		PA-01	7,46	29,80	360,67	0,01	169,67	11,31	2,10	0,07	ND	0,09	0,10	ND	0,05	0,11	2,19	0,019
		PA-02	7,36	30,03	339,33	0,01	159,67	10,93	1,99	0,07	ND	0,10	0,13	ND	0,05	0,10	2,11	0,018
		PA-03	7,37	30,23	332,33	0,01	157,00	13,33	1,90	0,08	ND	0,13	0,14	ND	0,06	0,11	2,05	0,018

ND = Não detectado; STD = Sólidos Totais Dissolvidos; CE = Condutividade Elétrica; t = total

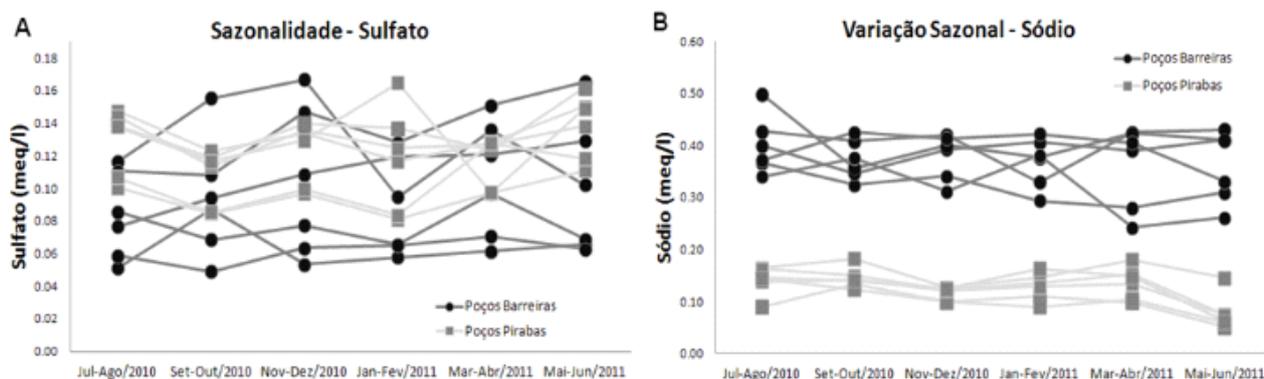
**Figura 6.** Diagramas de variação sazonal: A) Sílica e B) íon Cloreto

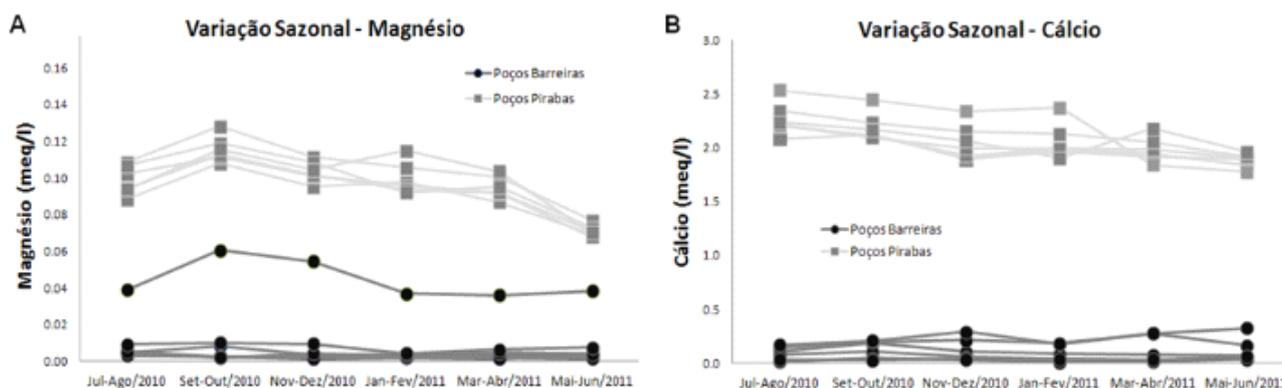
Em condições oxidantes as formas dominantes de enxofre são o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e sulfato ácido ( $\text{HSO}_4^-$ aq) os quais se apresentam estáveis, enquanto que em condições redutoras o íon sulfeto ( $\text{S}_2^-$ ) é a forma mais dominante nas águas subterrâneas, conforme Figura 7A. As águas dos poços Barreiras mostram valores de sulfato que oscilaram de 0,05 a 0,17 meq  $\text{L}^{-1}$ , enquanto que nas águas do sistema Pirabas os valores de sulfato estiveram na faixa de 0,08 a 0,16 meq  $\text{L}^{-1}$ , não havendo distinção da concentração do elemento nos diversos períodos de coleta em ambos os aquíferos.

Na figura 6B observa-se o comportamento do sódio, um dos metais alcalinos mais importantes e que está presente nas águas em decorrência da grande quantidade de minerais sódicos. Nas rochas ígneas, o sódio ocorre nos feldspatos, feldspatóides e alguns silicatos ferromagnesianos alcalinos. Nos sedimentos, o sódio pode ainda estar presente como impureza nos minerais autigênicos (cimento)

de rochas clásticas ou sob forma a de halita (RAMAGE, 2005). Conforme a Figura 7B, as águas dos poços Barreiras apresentam concentrações de  $\text{Na}^+$  variando de 0,24 a 0,50 meq  $\text{L}^{-1}$ , enquanto que nas águas do sistema Pirabas oscilou de 0,05 a 0,18 meq  $\text{L}^{-1}$ , isso se dá tanto pela contribuição da litologia (feldspatos) como também pelo input atmosférico que aumenta significativamente a concentração de  $\text{Na}^+$ .

Com a Figura 8A observa-se que o íon magnésio apresenta comportamento parecido ao cálcio (Fig. 8B), embora seja mais solúvel e difícil de precipitar. As águas subterrâneas apresentam teores mais frequentes de magnésio no intervalo de 0,08 a 3,29 meq  $\text{L}^{-1}$ . Nas águas do sistema Barreiras a variação na concentração do  $\text{Mg}^{2+}$  foi de 0,001 a 0,061 meq  $\text{L}^{-1}$ , enquanto nas águas do sistema Pirabas a variação foi de 0,68 a 0,128 meq  $\text{L}^{-1}$ . Esta diferença se dá pela presença de minerais fonte de magnésio, como a dolomita presente no ambiente carbonáticos.

**Figura 7.** Diagramas de variação sazonal: A) Sulfato e B) íon Sódio

**Figura 8.** Diagramas de variação sazonal: A) íon Magnésio e B) íon Cálcio

Segundo Paranhos (2010) o íon cálcio é freqüentemente encontrado como cátion principal na maioria das águas naturais. E os sais de cálcio possuem solubilidade moderada e/ou elevada, sendo muito comum precipitar como carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ . O cálcio é um constituinte da água e juntamente com o magnésio o principal responsável pela dureza. Apresenta-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato; nas águas subterrâneas, os teores de cálcio variam, em geral, entre 0,5 e 4,99 meq  $\text{L}^{-1}$ . A Figura 8B demonstra que nas águas dos poços Barreiras as amostras mostram concentrações que variaram de 0,01 a 0,33 meq  $\text{L}^{-1}$ , enquanto as amostras do sistema Pirabas oscilaram entre 1,78 a 2,53 meq  $\text{L}^{-1}$ .

A Tabela 2 apresenta os valores de concentração dos íons nas águas das amostras em poços dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas coletadas no verão e no inverno, considerando as médias (Julho de 2010 a Junho de 2011).

Os valores de pH das amostras apresentam grande diferença entre os sistemas aquíferos. Os valores no Barreiras refletem a disponibilidade de  $\text{H}^+$ , na forma de Ácido Silícico ( $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) e principalmente o ácido carbônico através da oxidação da matéria orgânica no horizonte A dos solos ( $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ). No caso do Pirabas o valor é fortemente afetado pela presença de bicarbonato oriundo da dissolução da calcita ( $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ).

Ainda na tabela 2 pode ser observado os valores das concentrações dos íons nos aquíferos Pirabas na área de recarga (Capanema), que apresentam uma tendência inversa. Na área de recarga as águas são mais básicas, há uma maior quantidade de íons dissolvidos, uma maior quantidade de STD e a condutividade elétrica é maior. Novamente a Sílica apresentou uma menor concentração que aquela observada nas amostras da RMB.

**Tabela 2.** Composição química das águas dos Aquíferos Barreiras e Pirabas, e *backgrounds* em Capanema e Benevides

Parâm.	Aquíferos Barreiras <sup>i</sup>				Aquíferos Pirabas <sup>ii</sup>				Capanema (Pirabas) <sup>iii</sup>		Benevides (Barreiras) <sup>iv</sup>	
	Mín.	Máx.	Período Seco <sup>4</sup>	Período Chuvoso <sup>4</sup>	Mín.	Máx.	Período Seco <sup>4</sup>	Período Chuvoso <sup>4</sup>	Período Seco <sup>4</sup>	Período Chuvoso <sup>4</sup>	Período Seco <sup>4</sup>	Período Chuvoso <sup>4</sup>
pH	4,3	6,2	5,0	5,1	7,0	8,0	7,5	7,4	7,40	7,35	4,60	4,54
T °C	26,30	30,70	28,45	27,93	28,50	31,00	29,84	29,83	29,32	28,17	27,27	27,00
Cond. <sup>1</sup>	11,10	92,20	39,75	35,53	222,0	406,0	344,0	331,9	670,37	607,83	28,37	26,07
STD <sup>2</sup>	10,0	82,0	38,2	34,6	105,0	181,0	158,4	156,7	306,83	311,83	22,00	18,00
Sílica <sup>3</sup>	0,84	7,60	3,77	3,04	6,06	16,02	11,40	10,84	5,81	6,09	4,69	4,66
$\text{Na}^+$	0,24	0,50	0,38	0,37	0,05	0,18	0,12	0,13	0,51	0,43	0,08	0,07
$\text{K}^+$	0,005	0,056	0,023	0,021	0,02	0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,003	0,003
$\text{Mg}^{2+}$	0,001	0,061	0,012	0,010	0,07	0,13	0,09	0,10	0,11	0,11	0,003	0,001
$\text{Ca}^{2+}$	0,011	0,327	0,112	0,111	1,78	2,53	2,12	2,04	3,43	3,50	0,03	0,03
$\text{Sr}^{2+}$	0,001	0,007	0,002	0,002	0,016	0,022	0,019	0,019	0,022	0,023	0,0002	0,0002
$\text{Fe}^{2+}$	0,003	0,014	0,007	0,005	0,006	0,022	0,013	0,012	0,03	0,03	0,004	0,001
$\text{Cl}^-$	0,18	0,42	0,29	0,27	0,05	0,12	0,09	0,08	0,43	0,42	0,07	0,06
$\text{NO}_3^-$	0,05	0,15	0,08	0,09	nd	nd	nd	nd	0,01	nd	0,03	0,02
$\text{SO}_4^{2-}$	0,05	0,17	0,09	0,10	0,08	0,16	0,11	0,12	0,33	0,38	0,02	0,01
$\text{HCO}_3^-$	nd	nd	nd	nd	1,64	2,27	1,95	1,87	3,04	3,06	nd	nd
Σcátions	---	---	0,53	0,52	---	---	2,40	2,35	4,13	4,12	0,16	0,11
Σânions	---	---	0,46	0,46	---	---	2,17	2,07	3,81	3,86	0,12	0,09

<sup>1</sup>Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). <sup>2</sup>Sólidos Totais Dissolvidos ( $\text{mg L}^{-1}$ ). <sup>3</sup>Sílica dissolvida ( $\text{mg L}^{-1}$ ). <sup>4</sup>Média. nd = não detectado. Cátions e ânions ( $\text{meq L}^{-1}$ ). <sup>i</sup>(n=36). <sup>ii</sup>(n=36). <sup>iii</sup>(n=12). <sup>iv</sup>(n=6).

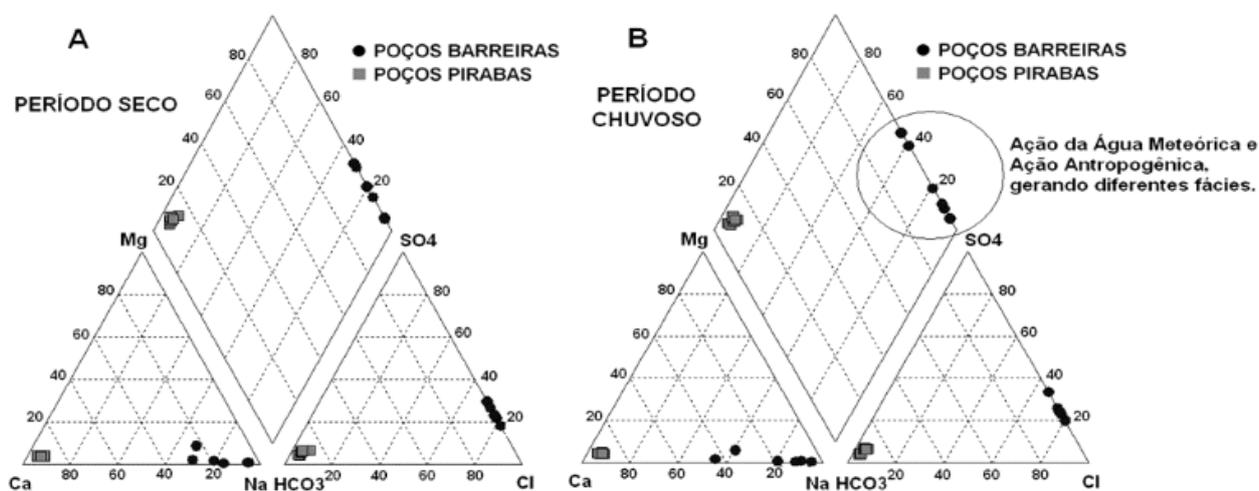
A diferença de sílica dissolvida entre os aquíferos dá-se pela hidrólise dos silicatos, devido a reação ser lenta e de baixa solubilidade (RAMAGE, 2005), sua concentração aumenta com o tempo de percolação no aquífero, ocorrendo maiores concentrações de sílica no Pirabas. E, conforme citado anteriormente, é comum em rochas carbonáticas a presença de sílica amorfa fruto da presença de carapaças de diatomáceas, aumentando consideravelmente a concentração de sílica no sistema Pirabas.

Comparando os resultados da RMB (Tabela 2) com resultados obtidos por Cabral (2004), Paranhos (2010) e Silva (2015) em outras regiões no qual afloram o aquífero Barreiras (Benevides) e aquífero Pirabas (Capanema), encontram-se diferenças físico-químicas marcantes. O que pode ser observado nos aquíferos Barreiras, onde os valores

das concentrações dos íons em áreas não afetadas por atividades antropogênicas (*backgrounds*) apresentaram-se mais ácidos, com menor quantidade de íons dissolvidos, conseqüentemente, menor quantidade de STD e condutividade elétrica mais baixa. Essa tendência pode ser visualizada em todos os parâmetros com exceção da sílica que apresentou ligeiro aumento da concentração.

Na Figura 9 observa-se os diagramas trilineares de Piper, confeccionados no Software *AquaChem v3.7 for Windows* (AQUACHEM, 1977). Os diagramas apontam que a fácies hidroquímica predominante no Barreiras é a Cl-Na<sup>+</sup> devido a contribuição majoritária da precipitação pluviométrica, enquanto que no Pirabas predomina a fácies HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup> influenciada principalmente pela litologia (PARANHOS, 2010).

**Figura 9.** Diagramas de Piper dos poços amostrados por períodos: A) seco e B) chuvoso



Destaca-se que no período chuvoso há uma variação maior do tipo de fácies, indicando maior suscetibilidade destes aquíferos à ação intempérica, indicado na Fig.8B, a partir da mudança de fácies de poços no aquífero Barreiras.

Na Figura 9 (A e B) é importante apontar a seguinte tendência iônica nas águas do sistema aquífero Barreiras: Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> para os cátions e Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para os ânions. Neste caso, os cátions possuem concentrações químicas controladas por minerais como Anortita (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) e Albita (2NaAlSiO<sub>3</sub>), que a partir do intemperismo nas rochas, geram a Caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), principal produto do intemperismo encontrado nas rochas que representam o sistema aquífero Barreiras. Quanto aos ânions, o Cl<sup>-</sup> apresenta-se como íon principal, fruto da água meteórica e a sua conservação em subsuperfície, destacando ainda o NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, elemento comum em aquíferos que sofrem

ação antrópica direta, devido à carga de detergentes e esgotos a partir de fossas e sumidouros.

Nas águas do sistema aquífero Pirabas é encontrada a seguinte tendência: Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Fe<sup>2+</sup> > Sr<sup>2+</sup> para cátions e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> para ânions. Os cátions são originados principalmente pela dissolução de minerais como a calcita (CaCO<sub>3</sub>) e dolomita [MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], e os ânions refletem o ambiente carbonático e o seu produto da dissolução (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

A partir da análise de correlação (Tabela 3), evidencia-se uma excelente relação entre os sistemas aquíferos estudados. A análise ocorreu a partir da junção de dados dos poços dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas no mesmo período de amostragem, no caso, seco e chuvoso.

O enriquecimento de íons nestas águas é proporcional ao aumento de sólidos totais dissolvidos e por conseqüência o aumento da condutividade.

**Tabela 3.** Matriz de Correlação ( $\rho < 0,05$ ) dos principais parâmetros hidrogeoquímicos dos aquíferos Barreiras e Pirabas

	pH	Cond.	STD	Fe <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>
<b>(A) Período Seco</b>											
pH	1										
Cond.	<b>0,95</b>	1									
STD	<b>0,91</b>	<b>0,97</b>	1								
Fe <sup>2+</sup>	0,73	0,71	0,71	1							
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,89</b>	<b>-0,95</b>	<b>-0,89</b>	-0,58	1						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,52	0,53	0,64	0,50	-0,36	1					
Na <sup>+</sup>	<b>0,95</b>	<b>-0,98</b>	<b>-0,95</b>	-0,62	<b>0,95</b>	-0,55	1				
K <sup>+</sup>	0,66	0,63	0,77	0,62	-0,44	0,78	-0,62	1			
Mg <sup>2+</sup>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	0,78	<b>-0,88</b>	0,57	<b>-0,94</b>	0,77	1		
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	0,72	<b>-0,94</b>	0,57	<b>-0,97</b>	0,69	<b>0,97</b>	1	
Sr <sup>2+</sup>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	0,74	<b>-0,87</b>	0,68	<b>-0,96</b>	0,75	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	1
<b>(B) Período Chuvoso</b>											
pH	1										
Cond.	<b>0,96</b>	1									
STD	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	1								
Fe <sup>2+</sup>	0,75	0,72	0,74	1							
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,86</b>	<b>-0,92</b>	<b>-0,85</b>	-0,58	1						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,32	0,33	0,46	0,31	-0,15	1					
Na <sup>+</sup>	<b>-0,93</b>	<b>-0,98</b>	<b>-0,94</b>	-0,62	<b>0,93</b>	-0,34	1				
K <sup>+</sup>	0,75	0,79	<b>0,89</b>	0,56	-0,60	0,73	-0,77	1			
Mg <sup>2+</sup>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	0,74	<b>-0,81</b>	0,40	<b>-0,92</b>	<b>0,86</b>	1		
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	0,71	<b>-0,89</b>	0,38	<b>-0,97</b>	<b>0,83</b>	<b>0,98</b>	1	
Sr <sup>2+</sup>	<b>0,96</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	0,72	<b>-0,84</b>	0,49	<b>-0,96</b>	<b>0,86</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	1

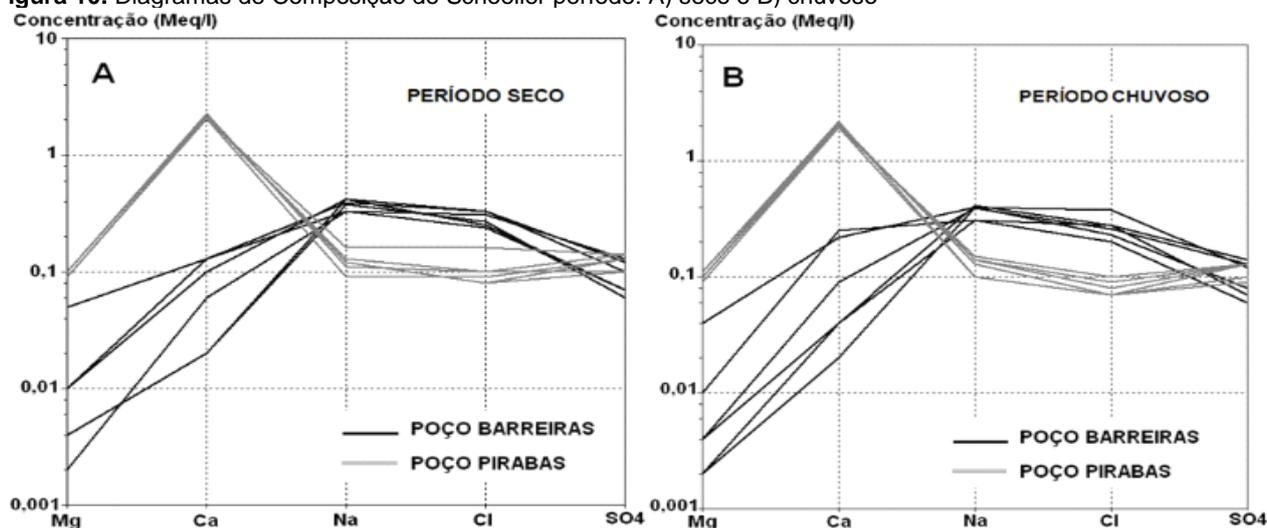
A Tabela 3 (considerando  $r \geq 0,80$ ) apresenta ainda excelentes correlações entre Cl e Na ( $r = 0,95$  e  $0,93$ ), Cl e Mg ( $r = -0,88$  e  $-0,81$ ), Cl e Ca ( $r = -0,94$  e  $-0,89$ ), Cl e Sr ( $r = -0,87$  e  $-0,84$ ), Na e Mg ( $r = -0,94$  e  $-0,92$ ), Na e Ca ( $r = -0,97$  ambos), Na e Sr ( $r = -0,96$  ambos), K e Mg, Ca, Sr ( $r = 0,86$ ,  $0,83$  e  $0,86$ , respectivamente, estas correlações somente no chuvoso), Mg e Ca ( $r = 0,97$  e  $0,98$ ), Mg e Sr ( $r = 0,97$  ambos), Ca e Sr ( $r = 0,98$  e  $0,99$ ).

### Modelamento Hidrogeoquímico

A Figura 10 (A e B) foi gerada a partir de diagramas de composição do tipo Schoeller. Com este tipo de diagrama pode-se representar sistemas convencionais de águas subterrâneas. Nessa figura observam-se os padrões característicos em cada

tipo de aquífero, no período seco e chuvoso. Há predominância do íon Ca<sup>2+</sup> com mais de 46% da soma dos íons no aquífero Pirabas, enquanto que no aquífero Barreiras o íon principal é o Na<sup>+</sup> com 37% da soma total de íons. Nas duas situações o íon dominante controla o pH do respectivo aquífero resultando em águas ácidas no Barreiras e águas próximas a neutralidade no Pirabas.

Da mesma forma que Paranhos (2010), observou-se um comportamento em leque no diagrama de Schoeller para os dois sistemas aquíferos, apresentando valores em linhas paralelas, demonstrando mais de um tipo de água, no caso “águas de misturas” (Interação Barreiras-Pirabas), pois se fossem apenas um tipo de água, as linhas estariam praticamente sobrepostas e o padrão gráfico seria outro (MAZOR, 2004).

**Figura 10.** Diagramas de Composição de Schoeller período: A) seco e B) chuvoso

A Figura 11 apresenta o modelamento geoquímico com o auxílio do Software *AquaChem* v3.7, considerando a média sazonal em cada ponto de coleta.

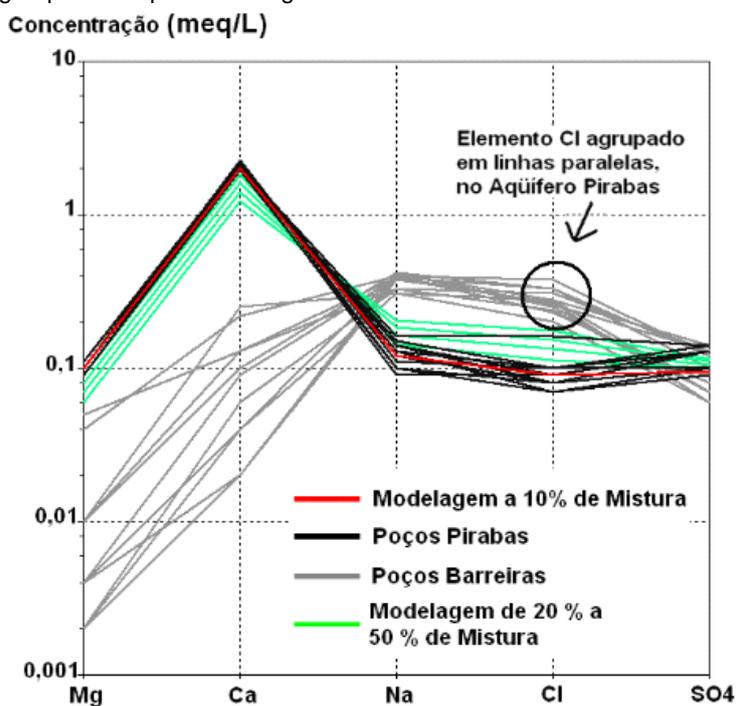
Utilizando a ferramenta "Mix Samples" presente no referido programa, é possível verificar e calcular o grau de mistura entre as águas. No caso estudado, a porcentagem de misturas modelada em 10% assemelhasse com as amostras do Pirabas (da concentração química dissolvida na amostra do Barreiras com 90% da concentração química dissolvida na amostra do Pirabas no período chuvoso).

Outras combinações (20 a 50% de misturas) não apresentaram padrão concordante com Pirabas, considerando os parâmetros modelados que foram modelados através do diagrama de Schoeller (apresentando diferenças nos parâmetros  $Mg^{2+}$  e  $Ca^{2+}$ ).

Dentre os elementos da Fig.10, o  $Cl^-$  é um bom indicador de misturas de águas. As concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero (SCHOELLER, 1962).

As águas de um aquífero confinado quando plotadas num diagrama de composição usando na abscissa um elemento ou parâmetro conservativo deveriam agrupar-se indicando a presença de apenas um tipo de água (MAZOR, 2004), entretanto as amostras do parâmetro  $Cl^-$  se distribuíram de forma alinhada, apresentando linhas de mistura. Concordando com os estudos estruturais realizados por Igreja et al. (1990), Costa (2004), Palheta (2008) e Pinheiro (2009), que indicam a capacidade das águas nos respectivos aquíferos em misturar-se, principalmente pelas feições neotectônicas definidas na região da RMB.

Figura 11. Modelamento geoquímico a partir do Diagrama de Schoeller



## CONCLUSÕES

Os aquíferos Barreiras e Pirabas possuem características hidroquímicas distintas, apresentando no primeiro menor concentração de elementos dissolvidos na água devido o menor tempo de percolação e dissolução de suas rochas, acontecendo o oposto para as águas do Pirabas, no qual apresenta concentração iônica bem elevada, pois o tempo de contato d'água com a rocha encaixante está na ordem de milhões de anos.

A fácies hidroquímica de cada aquífero revela o tipo de contribuição em suas águas, sendo no

Barreiras originado da contribuição de água meteórica ( $Cl^-$  e  $Na^+$ ), enquanto no Pirabas há forte predominância de reações químicas das rochas, como a dissolução da calcita ( $HCO_3^-$  e  $Ca^{2+}$ ).

A partir dos diagramas de composição de Schoeller nota-se o efeito da sazonalidade, apresentando pequenas variações durante o período seco e chuvoso.

As análises através de diagramas de composição de Schoeller e modelagem dos mesmos, revelam provável processo de mistura, atingindo valor modelado em torno de 10 % entre águas do Barreiras e Pirabas no período chuvoso.

O elemento Cl<sup>-</sup> por ser conservativo em meio subterrâneo, reforça a tese de mistura entre os aquíferos devido à distribuição das linhas em formato paralelo em cada ponto de coleta tanto no Barreiras quanto no Pirabas, apresentando, portanto, diversas proporções de misturas entre as águas do sistema Barreiras e Pirabas.

A utilização de parâmetros hidrogeoquímicos nos períodos sazonais, diagramas de Schoeller e seu respectivo modelamento sugerem possíveis processos de misturas, principalmente no período chuvoso entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida ao primeiro autor e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da UFPA pelo apoio financeiro e acadêmico.

### REFERÊNCIAS

- AQUACHEM. **Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting, version 3.7.42**. Waterloo, Ontario, Canada: Waterloo Hydrogeologic, N2L 3L3, 1997.
- BERMERGUY, R. L.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BORGES, M. S. Tectônica e paleogeografia da calha do rio Amazonas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TÉCNICOS, 5. 1995. **Anais...**, 1995. p. 419-420.
- BEZERRA, C. S. **Caracterização hidrogeoquímica do reservatório da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes – Amapá**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- BORGES, M. S.; COSTA, J. B. S.; BERMEGUY, R. L.; PARANHOS JÚNIOR, C. A.; HASUI Y. A esculturação da paisagem do litoral do norte do Brasil e sua relação com movimentos neotectônicos do Quaternário. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TÉCNICOS, 5. 1995. **Anais...**, 1995. p. 423-424.
- BOYD, C. **Water quality in ponds of aquiculture**. Alabama: Birmingham Publishing, 1990. 482 p.
- CABRAL, N. M. T. **Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal**. 2004. 278f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- CABRAL, N. M. T.; MAIA, L. M. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais [on line]**, v. 1, n. 1, p. 149-166, 2006.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Normalização Técnica NT-07: análise físico-química das águas**. São Paulo: CETESB, 1978. 340p.
- CORTEZ, C. M. B.; TAGLIARINI, E. M.; TANCREDI, A. C. F. N. S. Utilização de águas minerais dos aquíferos do Grupo Barreiras na região de Belém (PA). In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, Fortaleza (CE). **Anais**, 2000, 1 CD-ROM.
- COSTA, J. B. S. A neotectônica na Amazônia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5, **Anais**, 1996. p. 35-38.
- COSTA, J. B. S.; BERMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; FERREIRA JÚNIOR, C. R. P.; BEZERRA, P. E. L.; COSTA, M. L.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v. 4, n. 2, p. 23-44, 1996.
- COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S.; AVELAR, J.O.G. Outeiro e Mosqueiro: exemplos de evolução laterítica imatura. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA 3, **Anais**, 1991. p. 479-493.
- COSTA, F. R. **Influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará**. 2004. 173f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Ediciones Omega, 1976. 1157 p.
- FENZL, N. **Introdução a hidrogeoquímica**. Belém: EDUFPA, 1986. 189 p.
- GRASSHOFF, K. On the determination of silica in sea water. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, n. 11, p. 597-604, 1964.
- IGREJA, H. L. S.; ALVES, R. J.; COSTA, P. S.; COSTA, J. B. S. Estudos neotectônicos nas ilhas de Outeiro e Mosqueiro – NE do Estado do Pará. In: CONGRESSO DE GEOLOGIA, 36, 1990. **Anais...** Natal: SBG, v. 3, 1990. p. 2110-2123.
- MATTA, M. A. S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. 2002. 292f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- MAZOR, E. **Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology**. New York: Marcel Dekker, 2004. 453p.
- PALHETA, E. S. M. **Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da Ilha de Mosqueiro-**

**Pará empregado no conhecimento hídrico subterrâneo.** 2008. 241f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

PARANHOS, P. F. **Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará.** 2010. 94f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

PINHEIRO, A. V. R. **Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará – Brasil.** 22009. 11 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

RAMAGE, L. **Hidrogeoquímica do sistema aquífero granular Cenozóico do município de Porto Alegre, RS.** 2005. 111f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005.

SAUMA FILHO, M. **As águas subterrâneas de Belém e adjacências: influência da formação pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade** Pará, Brasil. 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.

SILVA, I. R. F. **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.** 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SCHOELLER, H. **Les eaux souterrains.** Paris: Masson et Cie, 1962. 642 p.