



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA
AQUÍFERO PIRABAS EM ICOARACI, REGIÃO
METROPOLITANA DE BELÉM – ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada por:

PATRÍCIA FRANÇA PARANHOS

**BELÉM
2010**

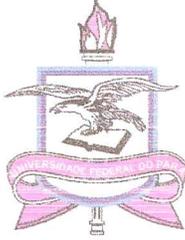
Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

P223c Paranhos, Patrícia França
Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Pirabas
em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – estado do Pará /
Patrícia França Paranhos; Orientador: José Augusto Martins
Corrêa – 2010
xii, 94f. : il.

Tese (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Programa
de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Aquífero Pirabas. 2. Fácies hidroquímicas. 3.
Hidrogeoquímica. I. Universidade Federal do Pará. II. Corrêa,
José Augusto Martins, *orient.* III. Título.

CDD 20. ed.: 551.49098115



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

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO SISTEMA
AQÜÍFERO PIRABAS EM ICOARACI, REGIÃO
METROPOLITANA DE BELÉM – ESTADO DO PARÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

PATRÍCIA FRANÇA PARANHOS

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

Data de Aprovação: **26 /11 /2009**

Banca de Dissertação:



DR. JOSÉ AUGUSTO MARTINS CORRÊA
(Orientador-UFGPA)



DR. ANTONIO CARLOS FELICE N. SAVERIO TANCREDI
(Membro)



DR. ARI ROISENBERG (UFRGS)
(Membro)

Belém

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua presença constante em minha vida;

Ao meu querido orientador José Augusto Martins Corrêa pela orientação e por toda paciência a mim despendida;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geologia, aos professores e funcionários pela colaboração;

Aos Laboratórios de Cromatografia, Hidroquímica e Análises Químicas do Instituto de Geociências;

Aos funcionários Sr. Carlos Alberto e Sr. Nascimento por me auxiliarem durante a etapa de campo;

Aos técnicos Natalino e Leila Hanna pelo auxílio nos laboratórios;

Ao SAAEB pela disponibilização dos poços para coleta das amostras;

À EMBRAPA, especialmente à Tereza Primo por sempre atender aos meus pedidos de água ultra pura;

A Sra. Lúcia pela gentileza de permitir a coleta de água em residência;

Aos amigos Jaqueline e Valdinei sempre dispostos a ajudar nos momentos em que mais precisei;

As amigadas que conquistei durante os dois anos de trabalho: Etiana, Elma, Cristiane, Denys, Flávio, Milena, Iris, Sérgio e a todas as pessoas que de alguma forma estiveram comigo durante o desenvolvimento da dissertação;

À minha família pela compreensão durante as minhas constantes ausências;

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização deste trabalho, direta ou indiretamente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUÇÃO	4
2 OBJETIVOS	6
3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	6
3.1 CLIMA	6
3.1.2 Balanço hídrico	7
3.2 VEGETAÇÃO	8
4 CONTEXTO GEOLÓGICO	9
4.1 GEOLOGIA LOCAL.....	9
5 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	14
5.1 SISTEMA PÓS-BARREIRAS	15
5.2 SISTEMA BARREIRAS.....	15
5.3 SISTEMA PIRABAS	15
6 ÁREA DE ESTUDO	17
6.1 DESCRITIVO TÉCNICO DAS UNIDADES OPERACIONAIS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	19
6.1.1 Unidade Souza Franco.....	20
6.1.2 Unidade São Roque I.....	20
6.1.3 Unidade COHAB	22
6.1.4 Unidade Água Boa	22
6.1.5 Unidade Águas Negras	24
6.1.6 Unidade Eduardo Angelim.....	24
6.1.7 Unidade Tocantins / 26 de Outubro	26
6.1.8 Unidade Raimundo Jinkings	26
6.1.9 Unidade Pratinha.....	28
7 MATERIAIS E MÉTODOS	29

7.1 PROCEDIMENTO DE CAMPO	29
7.2 PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO	31
7.3 BALANÇO IÔNICO	33
7.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
8 RESULTADOS	36
8.1. VARIAÇÃO SAZONAL OBSERVADA NOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS NA ÁREA ESTUDADA	42
8.1.1 pH	42
8.1.2 Condutividade Elétrica	43
8.1.3 Alcalinidade Total	44
8.1.4 Ânions e Cátions	45
8.1.4.1 Bicarbonato (HCO_3^-).....	45
8.1.4.2 Cloreto (Cl^-)	46
8.1.4.3 Sulfato (SO_4^{2-})	48
8.1.4.4 Sódio (Na^+).....	49
8.1.4.5 Potássio (K^+)	51
8.1.4.6 Cálcio (Ca^{2+}).....	52
8.1.4.7 Magnésio (Mg^{2+}).....	54
8.1.4.8 Ferro total	55
8.2 FÁCIES HIDROQUÍMICAS	57
8.2.1 Análise de Correlação	60
8.3 CONECTIVIDADE HIDRÁULICA x MISTURA DE ÁGUAS	67
8.4 MAPAS GEOQUÍMICOS.....	80
CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Balanço Hídrico Climatológico para o Ano de 2005. Fonte: http://www.inmet.gov.br/html/agro.html	8
Figura 02: Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém (Costa, 2001)	12
Figura 03: Coluna estratigráfica da cobertura sedimentar da Região Metropolitana de Belém (adaptado de Sauma Filho, 1996)	14
Figura 04: Mapa de localização da área de estudo mostrando os bairros e os poços onde foram realizadas as coletas de amostras. (Base Cartografica-Companhia de Habitação do Pará, 2003)	18
Figura 05: Unidade Souza Franco de captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	21
Figura 06: Unidade São Roque captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	21
Figura 07: Unidade COHAB captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	23
Figura 08: Unidade Água Boa captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	23
Figura 09: Unidade Águas Negras captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	25
Figura 10: Unidade Eduardo Angelim captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	25
Figura 11: Unidade Tocantins captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	27

Figura 12: Unidade Raimundo Jinkings captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	27
Figura 13: Unidade Pratinha captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).....	28
Figura 14: Fotografia ilustrando o sistema de válvulas pelo qual as amostras de água do poço foram coletadas. Local de coleta da amostra da unidade Tocantins	30
Figura 15: Representação do erro da reação do balanço iônico	34
Figura 16: Correlação entre somatório de ânions e cátions das análises das águas subterrâneas dos 10 poços (meq/L).....	35
Figura 17: Histogramas de valores reais para a) pH, b) cond. Elétrica (CE), c) cloreto (Cl ⁻), d) cálcio (Ca ²⁺), e) sódio (Na ⁺) e f) potássio (K ⁺) das águas do sistema aquífero Pirabas provenientes de todas as campanhas de amostragem.....	40
Figura 18: Histogramas de valores reais para a) bicarbonato (HCO ₃ ⁻); b) sólidos totais dissolvidos (STD); c) magnésio (Mg ²⁺) e d) sulfato (SO ₄ ²⁻) das águas do sistema aquífero Pirabas provenientes de todas as campanhas de amostragem.....	41
Figura 19: Diagrama mostrando a variação temporal do pH nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (Am-10) na área de estudo. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	43
Figura 20: Diagrama mostrando a variação temporal da condutividade elétrica nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. Notar a marcada diferença entre os dois tipos de água e a leve tendência na elevação dos valores no sistema Barreiras no período de poucas chuvas (Verão). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	44
Figura 21: Diagrama mostrando a variação temporal da alcalinidade total nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).....	45

Figura 22: Diagrama mostrando a variação temporal do bicarbonato nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).....	46
Figura 23: Diagrama mostrando a variação temporal do cloreto nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. Notar a marcada diferença entre a duas águas e a tendência, no poço raso, de elevação dos valores no período de poucas chuvas (Verão). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).....	48
Figura 24: Diagrama mostrando a variação temporal do sulfato nas águas do sistema aquífero Pirabas e a diferença temporal no "pico" de sulfato nessas águas (fevereiro) e nas águas do sistema aquífero Barreiras (março). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	49
Figura 25: Diagrama mostrando a variação temporal do sódio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	50
Figura 26: Diagrama mostrando a variação temporal do potássio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	52
Figura 27: Diagrama mostrando a variação temporal do cálcio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (AM - 10). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	53
Figura 28: Diagrama mostrando a variação temporal do magnésio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (AM - 10). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	55
Figura 29: Diagrama mostrando a variação temporal do ferro total nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96)	56

Figura 30: Diagrama de Piper mostrando as diferentes fácies hidroquímicas: Fácies HCO_3^- - Ca - Mg e Fácies Cl - NO_3^- - Na.....	58
Figura 31: Diagrama de Schöller mostrando os dois principais fácies hidroquímicos, da área de estudo. Em vermelho, águas do sistema Pirabas e em Azul, águas do sistema Barreiras.....	59
Figura 32: Razão entre sódio e cloreto nas amostras do sistema Barreiras no período chuvoso e seco	62
Figura 33: $r\text{Ca}^{2+}$ x $r\text{HCO}_3^-$ das amostras do sistema aquífero Pirabas nos períodos seco e chuvoso.....	64
Figura 34: $r\text{Mg}^{2+}$ vs. $r\text{Ca}^{2+}$ nas amostras do aquífero Pirabas nos períodos seco e chuvoso.....	66
Figura 35: Correlação entre os índices de saturação da calcita (ISC) e dolomita (ISD) nas amostras do aquífero Pirabas no período seco e no período chuvoso.....	67
Figura 36: Diagramas de composição Na xCl (período seco e período chuvoso) para as amostras dos poços tubulares profundos (Sistema Pirabas)	72
Figura 37: Diagramas de composição Na x Cl. Notar o alinhamento existente entre as águas do sistema Barreiras e as águas do sistema Pirabas.....	73
Figura 38: Diagramas de composição Ca x STD. Notar a boa correlação positiva entre os dois sistemas aquíferos e a disposição dos poços do aquífero Pirabas ao longo de uma linha de mistura	75
Figura 39: Diagramas de composição Mg x STD. Notar a boa correlação positiva entre os dois sistemas aquíferos e a disposição dos poços do aquífero Pirabas ao longo de uma linha de mistura	76
Figura 40: Diagrama Schöller (fingerprint) mostrando a distribuição em leque, típica de mistura entre duas águas. Dados apenas dos poços que captam águas do sistema Pirabas	78

Figura 41: Modelagem geoquímica com o software Aquachem vs. 3.7. Notar que as amostras do poço Eduardo Angelim se aproximam bastante dos valores modelados para misturas com 10% de águas do sistema Barreiras	79
Figura 42: Mapas hidroquímicos do parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD). Notar aos baixos valores encontrados no poço Eduardo Angelim.....	81
Figura 43: Mapas hidroquímicos da distribuição do sódio nos poços do sistema Pirabas	82
Figura 44: Mapas hidroquímicos da distribuição do cálcio nos poços do sistema Pirabas.....	83
Figura 45: Mapas hidroquímicos da distribuição do bicarbonato nos poços do sistema Pirabas.....	84
Figura 46: Mapas hidroquímicos da distribuição do cloreto nos poços do sistema Pirabas.....	85
Figura 47: Mapas hidroquímicos da distribuição do sulfato nos poços do sistema Pirabas.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados de profundidade, vazão de exploração, aquífero explorado e o ano de início de operação das unidades estudadas	29
Tabela 02 - Limites dos estados de saturação e sua respectiva classificação.....	32
Tabela 03 - Relação entre a condutividade elétrica e o erro admissível segundo Custódio e Llamas (2001)	33
Tabela 4a - Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Barreiras na área estudada - Período seco	36
Tabela 4b - Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Barreiras na área estudada - Período chuvoso.....	37
Tabela 5a - Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Pirabas na área estudada - Período seco.....	37
Tabela 5b - Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Pirabas na área estudada - Período chuvoso	38
Tabela 06 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do sistema aquífero Barreiras durante o período chuvoso	60
Tabela 07 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do sistema aquífero Barreiras durante o período seco.....	61
Tabela 08 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do Sistema Aquífero Pirabas durante o período chuvoso	63
Tabela 09 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do Sistema Aquífero Pirabas durante o período seco.....	63
Tabela 10 - Características hidroquímica das amostras de água subterrâneas utilizadas na modelagem e valores obtidos para as misturas. Valores das concentrações dos íons em meq/L	79

RESUMO

Belém cidade no norte do Brasil está localizada na foz do rio Pará. A geologia da área é caracterizada por uma cobertura sedimentar miocênica representada pela Formação Pirabas (principalmente carbonato) e Formação Barreiras (clásticos). O sistema hidrogeológico da região de Belém é composto de um sistema aquífero superior desenvolvido no Pós-Barreiras e Barreiras com rochas semi-confinadas, aquíferos de baixa condutividade em relação as rochas do sistema aquífero mais profundo, relacionadas com Pirabas. O abastecimento público de água de Belém possui dois serviços: 1) utiliza água superficial do rio Guamá e 2) águas subterrâneas captadas a partir da formação Pirabas. O sistema aquífero Pirabas no distrito Icoaraci é fortemente explorado para abastecimento público de água, onde vários poços são perfurados com vazões em torno de 150 - 300 m³/h. Investigações hidroquímicas das águas subterrâneas têm sido realizadas com objetivos de avaliação da qualidade dessas águas, bem como a possibilidade de misturas entre os dois sistemas hidrogeológicos (Barreiras - superior e mais vulnerável e Pirabas - menor vulnerabilidade, melhor qualidade). Dez poços foram estudados durante um ciclo hidrológico, com amostras mensais. Os principais parâmetros de qualidade da água como temperatura, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, e os principais íons foram investigados com métodos clássicos. Dois principais tipos de água (Fácies Hidroquímicas) foram identificadas, hidrofácies 1 - HCO₃-Ca com pH ~ 7,6 e STD= 165 mg/ L e hidrofácies 2 - Cl-Na com pH ~ 4,0, STD= 89 mg/L. A mistura dos dois tipos de água foi confirmada com diagramas fingerprint e diagramas de composição. As percentagens da mistura foram calculadas com o software Acquachem 3.17 da Waterloo software e os resultados sugerem uma mistura de 10% das Hidrofácies. Os mapas hidroquímicos mostraram um decréscimo na concentração dos principais elementos no poço Eduardo Angelim. Isso significa que neste local a mistura das duas águas pode ser melhor observada e coincidentemente o poço está perto de uma falha geológica (Costa, 2004). Portanto, a mistura dos dois sistemas de águas ocorre porque as falhas causam descontinuidades nas seqüências de rochas e, portanto, controlam o fluxo de água. A hipótese de Costa (2004) foi confirmada com os

dados hidroquímicos que ajudam o desenvolvimento futuro do abastecimento público de água.

Palavras-chave: Aquífero Pirabas, fácies hidroquímicas, hidrogeoquímica.

ABSTRACT

Belém city in northern from Brazil, is located in Pará river mouth. The geology of the area is characterized by a Miocenic sedimentary sequence represented by Pirabas (mainly carbonate) and Barreiras (clastic) Formations. Hydrogeologic system in Belém region is composed of an upper aquifer developed in the Pos-Barreiras sediments and Barreiras rocks with semi-confined character, low hydraulic head aquifers and a lower aquifer system at the deeper parts related to Pirabas rocks. The public water supply from Belém has two services: 1) uses superficial water from Guamá river and 2) groundwater from water bearing Pirabas Formation. The Pirabas aquifer system in Icoaraci district is heavily exploited for public water supply and support several wells with discharge between 150 to 300 m³/h. Hydrochemical investigations of groundwater have been carried out on objectives of evaluating groundwater quality and the possibility of mixtures of waters between the two hydrogeologic systems (Barreiras - upper and more vulnerable and Pirabas – lower vulnerability, best quality). Ten wells were investigated during one hydrological cycle, with monthly samples. The major water quality parameters like temperature, pH, electric conductivity, alkalinity, total dissolved solids, and the major ions were investigated using classical methods. Two main water types (hydrochemical facies) are identified, hydrofacies 1 - Cl—Na dominated with pH ~ 4,0, TDS= 89 mg/L and hydrofacies 2 - HCO₃-Ca with pH ~ 7.6 e TDS= 165 mg/L. The mixing of the two water types was confirmed with fingerprint diagrams and composition diagrams. The mixing percentages were calculated with the code AquaChem vs 3.7 (Waterloo Hydrogeologic Inc.) and the results suggest a mixture of 10% of Hydrofacies 1 and 90% Hydrofacies 2. The hydrochemical maps had shown a decrease in the concentration of major elements in the Eduardo Angelim well. It suggests that in this place the mixture of the two waters can be better observed and coincidentally the well is near a normal fault (Costa, 2004). Therefore, the mixture of the two waters systems occurs because the faults cause discontinuities in rock sequences and thus control the water flow. The hypothesis of Costa (2004) was confirmed with the hydrochemical data that help the future development of water public supply.

Keywords: Pirabas aquifer, Hydrochemical facies, hydrogeochemical.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida, com quantidade constante no planeta e qualidade restaurada permanentemente pelo ciclo hidrológico. Entretanto, com o aumento das concentrações populacionais nas cidades, principalmente nas metrópoles, e o “desenvolvimento econômico”, este recurso passa a sofrer fortes alterações físicas, químicas e biológicas devido aos usos diversificados e a contaminação por despejos.

Segundo o levantamento feito pelo MMARHAL (1998), sobre os recursos hídricos no Brasil, a exploração da água subterrânea vem atualmente registrando um expressivo aumento, com vários núcleos urbanos e propriedades rurais abastecendo-se de água subterrânea de forma exclusiva ou complementar.

A água subterrânea tem sido utilizada para diversos fins, tais como o abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. No que se refere ao abastecimento público, as águas subterrâneas apresentam uma grande vantagem devido ao seu baixo custo em relação ao tratamento (Matta, 2002).

Atualmente, a produção, o tratamento e a distribuição de água na Região Metropolitana de Belém – RMB (1.800.000 hab.) são realizados por 4 (quatro) diferentes órgãos (concessionárias/prefeituras). Na Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) é gerenciado e operacionalizado o sistema de abastecimento de água de maior parte do município de Belém e nos municípios de Ananindeua e Marituba; o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém (SAAEB) atua nos distritos de Icoaraci, Outeiro e Mosqueiro e em áreas peri-urbanas do município de Belém; e as Prefeituras de Santa Bárbara do Pará e de Benevides são responsáveis pelo abastecimento de água de seus respectivos municípios (Soares *et al.*, 2005).

A área de estudo está compreendida nos distritos de Icoaraci e Outeiro e partes dos bairros Tapanã e Pratinha. Estas áreas são atendidas por uma concessionária municipal que utiliza o sistema aquífero (hidrogeológico) Pirabas como fonte principal para abastecimento da população. Essa concessionária faz uso de poços tubulares profundos (150 a 270 m) que estão localizados nas proximidades das áreas a serem atendidas. O fator complicador no uso desse recurso é, sem dúvida, a situação sanitária

da área que é ainda muito precária. Isso agrava o risco de contaminação dos aquíferos mais superficiais e eventualmente o risco à contaminação dos aquíferos mais profundos, por causas naturais (falhas geológicas ou aquíferos semiconfinados) ou mesmo artificiais, como má construção de poços e poços sem isolamento, com captação simultânea nos aquíferos Barreiras e Pirabas.

A qualidade da água subterrânea tem importância fundamental em qualquer região. As propriedades físico-químicas das águas subterrâneas são importantes na pesquisa e na utilização desses mananciais, pois orientam suas utilizações em função das finalidades a que se destinam. A gestão desse recurso requer um entendimento dos principais processos que controlam a evolução geoquímica e a origem dessas águas. Nesse sentido, um estudo hidroquímico detalhado da qualidade dessas águas, fornecerá informações sobre a sua história geológica, a influência dos solos e rochas por onde ela circula e seu modo de origem dentro do ciclo hidrológico.

Ferreira e Corrêa (2001), Carvalho (2001) e Prazeres (2001) estudaram o quimismo a composição química das águas de três poços em Icoaraci/Outeiro durante um ciclo hidrológico completo. Esses trabalhos realizados em poços próximos a zona costeira, mostram que as águas captadas são resultados de uma mistura entre dois ou mais tipos de águas. Acredita-se que a mistura pode ter se dado através de processos naturais (falhas conectando diferentes sistemas hidrogeológicos) ou processos artificiais (poços mal construídos onde não há isolamento no pré-filtro entre as duas unidades geológicas).

Costa (2004), em seu trabalho acerca da influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na Região Metropolitana de Belém, mostrou que uma consequência importante para o arranjo estabelecido para os aquíferos diz respeito à questão da recarga. Através do tratamento integrado das informações levantadas foi estabelecida a direção de estiramento da Bacia Pirabas - Barreiras como sendo NW-SE, e conseqüentemente a das falhas normais que se instalaram a ele associadas NE-SW. Sendo as falhas normais as superfícies potenciais de menor pressão elas compõem um dos locais de maior propensão para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas. Tal situação mostra claramente a possível mistura entre os dois sistemas aquíferos e uma grande preocupação no que diz respeito à possibilidade de

contaminação desses por influência antrópica, a partir dessas áreas de recarga, uma vez que a maior parte dessas está completamente sobrecarregada pela ocupação desordenada ou por atividade agrícola.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é documentar as características químicas da água no sistema hidrogeológico Pirabas na área de Icoaraci durante um ciclo hidrológico completo. A partir desses dados, estudar possíveis interações entre os sistemas hidrogeológicos (Barreiras e Pirabas), verificar a ocorrência ou não de misturas entre diferentes tipos de águas, determinar as proporções das misturas, estabelecer fácies hidroquímicas e construir mapas hidroquímicos que permitam um melhor planejamento para a ampliação do sistema de abastecimento de água da área estudada.

3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

3.1 CLIMA

Segundo Oliveira & Souza (1997) a RMB é caracterizada, em geral, por altas temperaturas (acima de 26 °C), ventos de baixa velocidade intercalados com freqüentes momentos de calmaria, altos índices de umidade relativa do ar e precipitação abundante, oscilando entre 2.800 e 3.150 mm anuais. A umidade relativa da RMB reflete uma grande influência do fator térmico, com a variação média interanual oscilando entre 81,8 a 91%, com uma média anual de 86%. A área é submetida a um total de brilho (claridade, incidência) solar de cerca de 35% a 60%, onde a insolação apresenta grande relação com o elemento hídrico. Dados do Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura (normais climatológicas de 1931/1960) mostram que as maiores freqüências anuais dos ventos na área são de Nordeste (29%), Norte (10%) e Leste (9%). A freqüência das demais direções é insignificante. A velocidade média fica

entre 2,6 e 2,9 m/s e a calmaria é de 45% nos 12 meses. As relações entre as alterações climáticas com os processos de urbanização são bem conhecidas. Costa & Martins (1996) mostraram que as áreas ocupadas têm a sua vegetação natural modificada e o crescimento urbano desordenado com os diversos tipos habitações e a impermeabilização dos solos, produzem um aumento da temperatura devido a alterações no balanço radiativo, na circulação do ar e na taxa de evaporação, o que gera um clima urbano específico.

O regime térmico é caracterizado por uma temperatura elevada em todos os períodos, resultando na média anual de 27,10°C e amplitude térmica com média anual de 8,52°C conjuntamente com as médias mensais e médias anuais de temperatura (Oliveira, 2001).

3.1.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico é uma maneira de monitorar o armazenamento de água no solo. Com base nos dados apresentados por Moraes (1999), Matta (2002) calculou o balanço hídrico da RMB utilizando a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955) onde, além da obtenção da classificação climática, é possível ter o comportamento da entrada e saída da água no solo. Após estabelecer o balanço, Matta (2002) destaca que a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial apresenta um valor “positivo”. O que demonstra que o valor da evapotranspiração potencial se aproxima daquele da evaporação real, portanto, a quantidade de água que realmente volta para a atmosfera é igual ou próxima à quantidade de água que sai da atmosfera sob a forma de precipitação pluviométrica.

Durante o período de janeiro a setembro, a carência de água no solo é zero, apresentando uma contribuição mínima durante os últimos meses do ano (outubro a dezembro). O excedente apresenta valores superiores entre janeiro a maio, no período chuvoso, diminuindo posteriormente até o mês de setembro. Os meses de outubro e novembro apresentam excedente zero, e, a partir de dezembro, a quantidade de água volta a aumentar no solo.

A Figura 1 mostra o balanço hídrico calculado pelo INMET (2005) para a RMB, relacionando-se déficit, excesso, retirada, reposição. Esses valores corroboram as interpretações de Matta (2002) e confirmam um excedente de água durante os meses de Janeiro a Setembro.

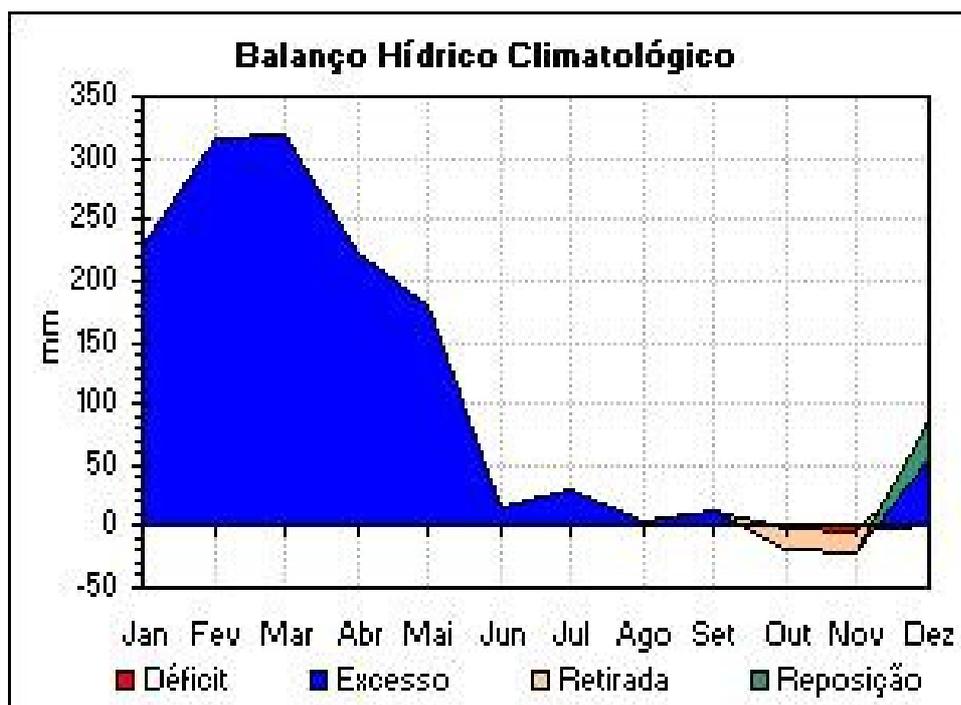


Figura 01: Balanço Hídrico Climatológico para o Ano de 2005. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>

3.2 VEGETAÇÃO

Segundo Moreira (1996) ocorre três tipos principais de vegetação em Belém: 1) vegetação de várzea, típica de áreas inundáveis, sob influência periódica das marés, que são muito semelhantes e representam as vegetações que se encontram sobre solos cujas condições físicas e químicas não permitem o desenvolvimento de uma vegetação exuberante, ocorrem ao longo de igarapés, próximo às áreas povoadas; 2) vegetação de floresta densa ou tropical, associada aos terrenos mais elevados (terra firme), está assentada sobre latossolo amarelo e possui árvores de grande valor econômico e 3) florestas secundárias e/ou de igapó, em áreas uma vez desmatadas,

encontradas nos alagados e níveis topográficos mais baixo da região, possuindo raízes aéreas, adaptadas ao seu desenvolvimento nos solos permanentemente alagados.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 GEOLOGIA LOCAL

O Terciário na região metropolitana da grande Belém, estado do Pará, é geologicamente representado pela Formação Pirabas de idade Oligo-Miocênica, e pelas rochas da Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras (Figura 02). A Formação Pirabas é constituída em geral por rochas carbonáticas depositadas durante o Mioceno Inferior (Maury, 1925; Petri, 1957; Ferreira, 1982; Fernandes, 1984). Esta formação está dividida em três fácies:

- a) A fácies Castelo é caracterizada litologicamente por calcários com coquinas, destacando-se os micritos, biohermitos e dolmicritos;
- b) A fácies Capanema compreende litotipos representados por calcários argilosos (margas), micritos, biomicritos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos (Ferreira, 1982) e;
- c) A fácies Baunilha Grande é litologicamente composta por argilitos negros com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros contendo fragmentos de crustáceos.

Góes *et al.*, (1990) propuseram, com base em análises faciológicas, um modelo deposicional preliminar para a Formação Pirabas. Esses autores sugerem uma deposição em ambiente marinho aberto, de águas quentes, rasas e agitadas contendo canais lagunares ou estuarinos e restritamente mangues em suas adjacências.

Recobrando a Formação Pirabas, em contato gradativo, encontram-se as rochas da Formação Barreiras e Pós-Barreiras que correspondem a depósitos terrígenos continentais terciários e quaternários (Góes *et al.*, 1990).

As rochas que compõem a Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras compreendem treze fácies descritivas, definidas principalmente em função da presença ou não de estruturas sedimentares e aspectos texturais (Rosseti *et al.* 1989):

- 1) Fácies Argilosa com laminação plano-paralela;
- 2) Fácies Argilosa maciça;
- 3) Fácies Areno-argilosa, geralmente maciça;
- 4) Fácies Arenosa sem estruturação aparente;
- 5) Fácies Arenosa com estratificação cruzada acanalada;
- 6) Fácies arenosa com estratificação cruzada tabular;
- 7) Fácies areno-argilosa com estruturas wavy e linsen;
- 8) Fácies arenosa com ôndulas cavalgantes ascendentes;
- 9) Fácies arenosa grossa a conglomerática;
- 10) Fácies conglomerática;
- 11) Fácies conglomerática com seixos de argila;
- 12) Fácies arenosa com estratificação sigmoidal;
- 13) Fácies composta por blocos de arenito ferruginoso e/ou seixos de quartzo.

Rossetti *et al.*, (1989) para um melhor entendimento do posicionamento espacial das fácies, agrupou-as em quatro associações: A, B, C e D, descritas abaixo.

A associação A é representada pela fácies conglomerática, sobrepõe em discordância erosiva os xistos pré-cambrianos da Formação Santa Luzia. Este fácies ocorre ora subjacente a sedimentos arenosos finos, intercalados com argilitos laminados, ora sobreposto a argilitos aparentemente não estruturados, com contato nitidamente erosivo.

A associação B é encontrada mais comumente na parte litorânea do nordeste do estado do Pará. Esta associação faciológica é composta por intercalações de camadas argilosas com laminação plano-paralela e camadas arenosas com granulação variando de fina a conglomerática. As fácies arenosas que predominam, são aquelas com estratificação tabular e acanalada. Subordinadamente ocorrem estruturas laminadas cavalgantes ascendentes em camadas de arenitos finos e estruturas do tipo *wavy* e *linsen* em camadas de arenitos finos intercaladas com pelitos. O fácies arenoso grosso a conglomerático ocorre disposto em níveis diferentes, não apresentando grande persistência lateral.

A associação C é representada pelo seguinte agrupamento de fácies: Argilitos maciços, argilitos com laminação plano-paralela e arenitos não estruturados.

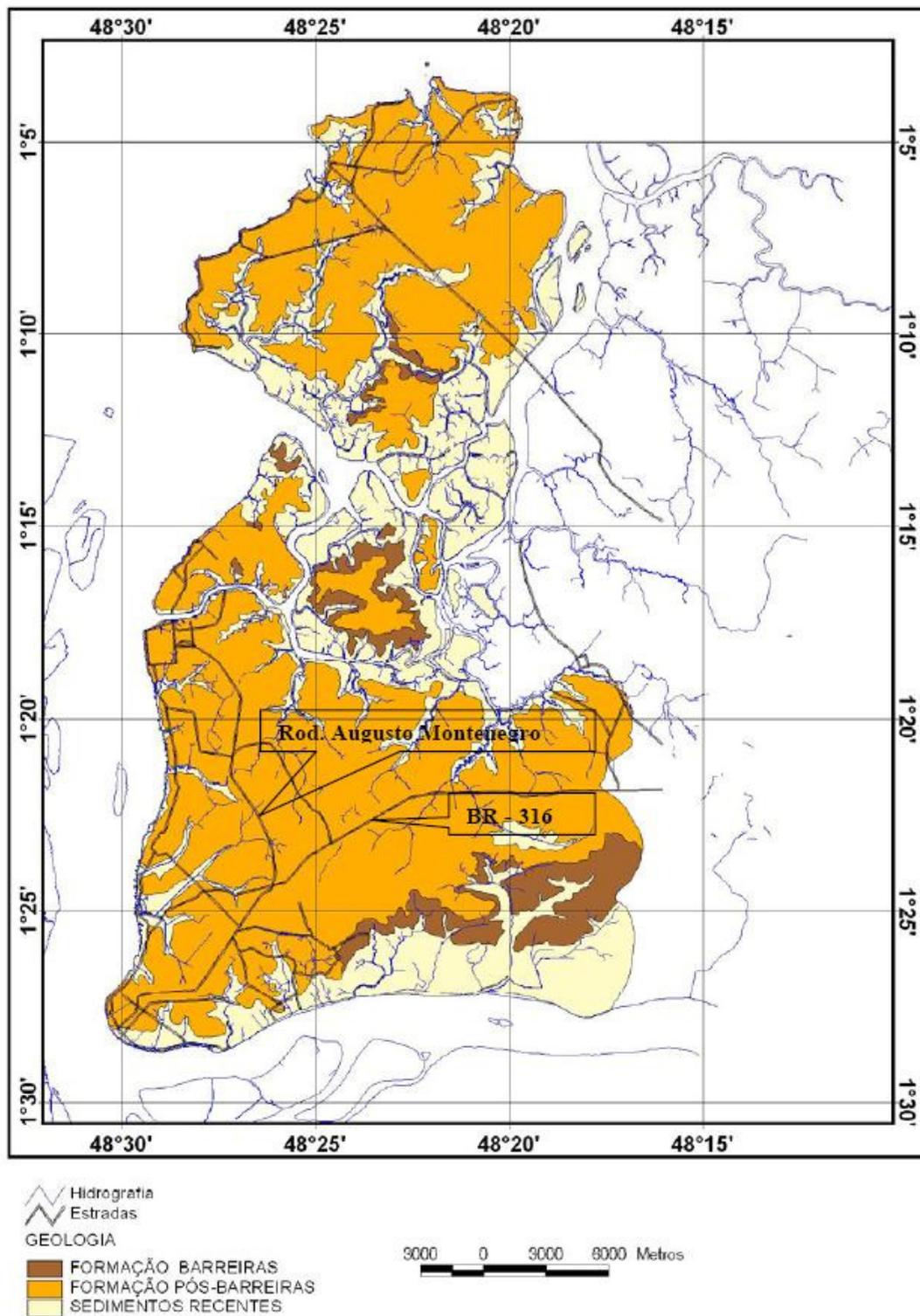


Figura 02: Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém (Costa, 2001).

A associação D por sua vez, é representada exclusivamente pelo fácies areno-argiloso. Este pacote sedimentar acha-se separado do anterior quase sempre por meio de blocos de arenitos ferruginosos e seixos de quartzo.

A análise faciológica dos sedimentos Barreiras na porção nordeste do estado do Pará sugere que a sua deposição ocorreu mediante um sistema de leques aluviais-planície de areia (com freqüentes canalizações) - planície de lama, com possível influência marinha em sua porção mais distal. A existência de várias estruturas nesta área e no norte do Maranhão, tais como acamamentos dos tipos *flaser*, *wavy* e *linsen*, acamamento cruzado sigmoidal, superfícies de reativação com *mud drapes* e *mud cracks*, são indicativas da influência de maré durante a sedimentação Barreiras, pelo menos na zona próxima a atual linha de costa (Rossetti *et al.*, 1989).

Quanto à idade desta Formação, os dados palinológicos reforçam a interpretação estratigráfica de Araújo *et al.*, (1988), que admite em geral, idade miocênica para a parte inferior da Formação Barreiras; não descartando a possibilidade de a deposição ter-se iniciado já no Eo-Mioceno (Araújo *et al.*, 1994).

A Formação Barreiras é recoberta pelo Pós-Barreiras (Quaternário), o qual consiste de sedimentos areno-argilosos inconsolidados, facilmente desagregáveis, com partículas de fração silte e fração argila, com leitos poucos espessos de seixos e blocos líticos rolados ou pouco movimentados de arenito ferruginoso. Incluem também os sedimentos aluvionares holocênicos da faixa costeira e dos vales dos rios e igarapés que cortam a região (Rossetti *et al.*, 1990). Segue abaixo a coluna estratigráfica da área de estudo (Figura 03).

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-PLIOCENO	FORMAÇÃO BARREIRAS	Arenitos de granulometria variada, mal selecionados, argilosos, intercalados a siltitos e argilitos 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.

Figura 03: Coluna estratigráfica da cobertura sedimentar da Região Metropolitana de Belém (adaptado de Sauma Filho, 1996).

5 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Os principais sistemas hidrogeológicos que abastecem a Região Metropolitana de Belém, de forma geral, são conhecidos como sistema hidrogeológico Pós-Barreiras, sistema hidrogeológico Barreiras e o sistema hidrogeológico Pirabas, localizados em rochas das formações homônimas (Carvalho, 2001).

5.1 SISTEMA PÓS-BARREIRAS

Esse sistema é formado por camadas de rochas argilo-arenosas, inconsolidadas, que ocorrem nos primeiros 25 metros de profundidade. Esses aquíferos apresentam um fraco potencial hidrogeológico, como atestam as baixas vazões ($5 \text{ m}^3/\text{h}$) (Oliveira *et. al.*, 2001). Na maioria das vezes, apresentam água de boa qualidade para consumo humano, entretanto, devido a sua vulnerabilidade, podem apresentar teores excessivos de nitrato e amônia, além de ferro (Cabral, 2004). São classificados como aquíferos livres cuja recarga se dá diretamente através das precipitações pluviométricas enquanto a descarga se efetiva através dos rios, pelas fontes, evapotranspiração e poços, (Oliveira *et. al.*, 2001).

5.2 SISTEMA BARREIRAS

Os aquíferos da Formação Barreiras são os mais explorados na região metropolitana de Belém, principalmente por condomínios residenciais. Segundo Oliveira *et. al.* (2001), são aquíferos de natureza livre a confinada, formados por camadas de arenitos de espessuras variáveis intercaladas em camadas de arenitos argilizados e/ou argilitos e aparecem em profundidades de 25 a 90 metros. Não apresentam grandes vazões (10 a $70 \text{ m}^3/\text{h}$) e freqüentemente, apresentam teores de ferro fora do padrão recomendado pela Portaria 518/2004 MS.

5.3 SISTEMA PIRABAS

O sistema Pirabas corresponde à unidade aquífera inferior, formada por dois sistemas aquíferos do tipo multicamada, denominados de Pirabas e Pré-Pirabas (Oliveira *et. al.*, 2001), modificados para Pirabas Superior e Pirabas Inferior por Matta (2002).

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. Quando diminuem as espessuras das camadas de calcário e folhelho, aumentam as espessuras dos arenitos. Os aquíferos do tipo confinado são formados principalmente por arenitos que ocorrem nos intervalos de 84 a 94 m, 119 a 127 m, 140 a 145 m e 162 a 167 metros de profundidade. O potencial desse aquífero é moderado, entretanto, verificam-se permeabilidades relativamente altas nos arenitos de granulação mais grossa (Oliveira *et. al.*, 2001).

O sistema hidrogeológico Pirabas Inferior é composto predominantemente de uma seqüência rítmica onde arenitos de cor cinza-esbranquiçado, granulação fina à conglomerática, se intercalam com camadas mais espessas de argilitos e siltitos avermelhados. Esses aquíferos ocorrem principalmente nos seguintes intervalos de profundidade: 180 a 193 m, 197 a 211 m, 229 a 240 m e 251 a 259 m. 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 m³/h.

Do ponto de vista da qualidade das águas, apresentam água de boa qualidade, não havendo nenhuma restrição para o consumo humano. O pH varia entre 7 e 7,5, o conteúdo em sólidos totais dissolvidos oscila entre 242 e 383 mg/L. A dureza total (em CaCO₃) varia entre 110 a 235 mg/L, com uma média de 165 mg/L CaCO₃, o que permite classificar essas águas como moderadamente dura a dura, segundo a classificação de Boyd (1990)¹ *apud* Baumgarten & Pozza (2001). A Associação Brasileira de Normas Técnicas adota um limite máximo de 200 mg/L de CaCO₃ para água potável. Carvalho (2001) considerando os principais cátions e ânions, classificou as águas dos aquíferos Pirabas como cálcico-magnesianas-bicarbonatadas. O manganês e o ferro, dependendo da área onde o poço foi construído mostram concentrações baixas.

¹ Boyd, C. 1990. Water quality in ponds of aquiculture. Auburn, Alabama: Birmingham Publishing, 482p.

6 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no distrito de Icoaraci, Outeiro, Tapanã e Pratinha que estão inseridos dentro da Região Metropolitana de Belém, estado do Pará, (Figura 04).

O distrito de Icoaraci conta com uma população de aproximadamente 270.000 habitantes e é abastecido somente pelos sistemas isolados de captação subterrânea operacionalizados pelo SAAEB (Serviço Autônomo de Água e Esgoto do Município de Belém). Essas unidades do Sistema de Icoaraci são denominadas: unidade Souza Franco, unidade São Roque, Unidade COHAB, unidade Paracuri, unidade Eduardo Angelim, Águas Negras e unidade Tocantins/26 de Outubro.

A área urbana destinada à habitação é caracterizada por conjuntos habitacionais, entretanto, várias áreas foram invadidas pela população mais carente, complicando ainda mais a situação sanitária da área, que não possui redes coletoras de esgoto nem tampouco estações de tratamento. Nos últimos anos tem havido um crescimento demográfico desordenado, contribuindo para a aceleração dos processos de degradação dos recursos ambientais, principalmente as águas dos aquíferos mais rasos. Além desses fatores, existem outros que podem contribuir para que a água tenha sua qualidade comprometida, tais como: falta de proteção sanitária adequada na construção dos poços, que previnam a introdução de contaminantes durante o bombeamento; acidentes de rompimento de fossas sépticas ou redes de esgotamento sanitário e ligações clandestinas feitas nas redes de abastecimento.

Parte do distrito de Icoaraci é atendida por uma concessionária pública que utiliza o sistema hidrogeológico Pirabas como fonte principal para o abastecimento da população. Essa concessionária faz uso de poços tubulares profundos (150 a 270 m) que estão localizados nas áreas a serem atendidas. A Figura 4 mostra o mapa geológico da Região Metropolitana de Belém.

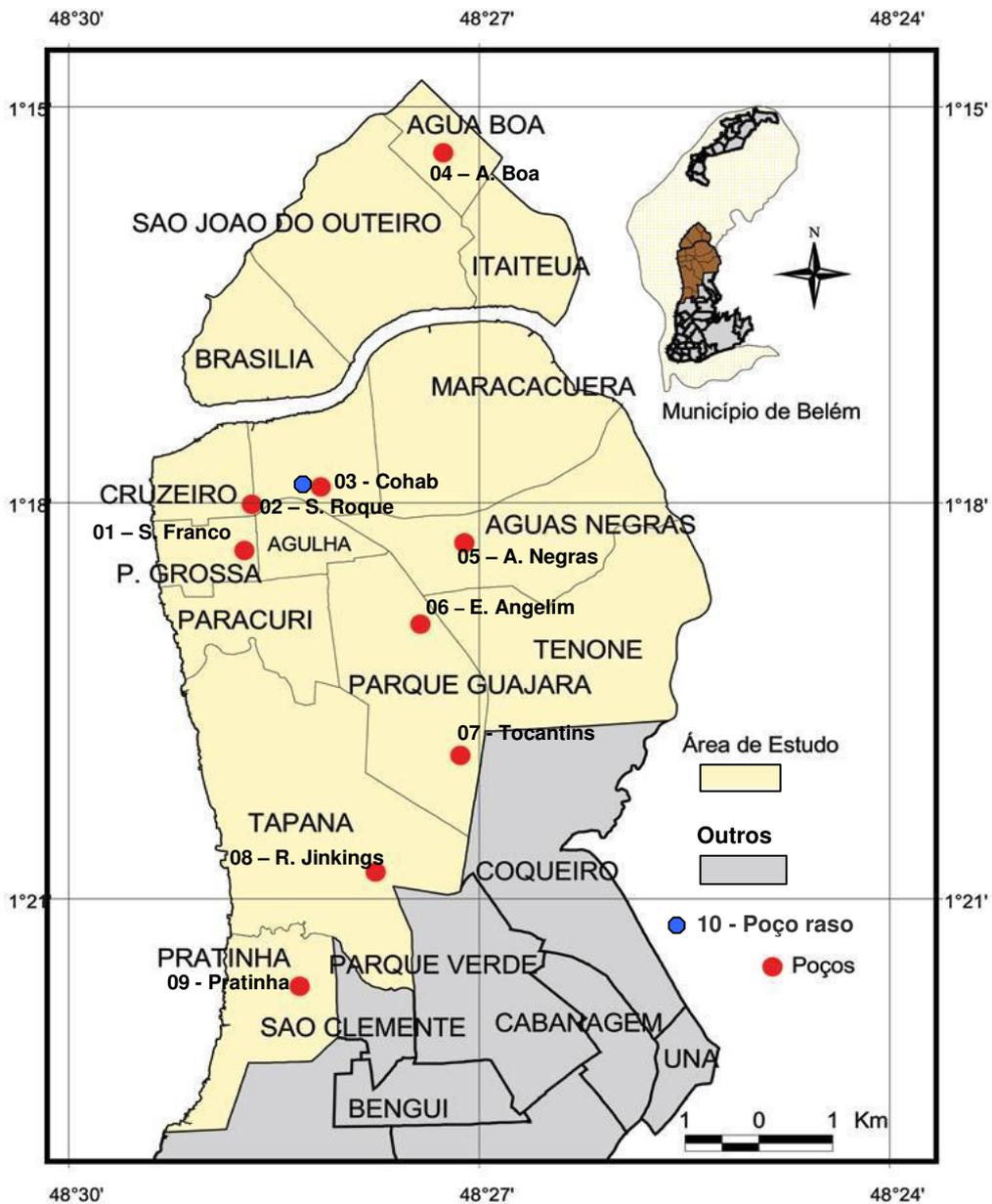


Figura 04: Mapa de localização da área de estudo mostrando os bairros e os poços onde foram realizadas as coletas de amostras. (Base Cartografica-Companhia de Habitação do Pará, 2003)

6.1 DESCRITIVO TÉCNICO DAS UNIDADES OPERACIONAIS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O distrito de Icoaraci e a ilha de Outeiro, também conhecida por ilha de Caratateua são abastecidos pelas seguintes unidades: a) Souza Franco, b) São Roque, c) COHAB, d) Paracuri, e) Eduardo Angelim, f) Águas Negras, g) Tocantins/26 de Outubro, h) Água Boa, i) R. Jinkings e j) Pratinha.

Para o estudo foram cadastrados nove poços tubulares profundos que apresentam profundidade média de 270 metros com vazões variando de 280 a 350 m³/h e um poço raso com profundidade de aproximadamente 16 metros. O período de amostragem foi de setembro de 2006 a setembro 2007. O período chuvoso (janeiro a maio de 2007) foi caracterizado por chuvas abundantes (o índice pluviométrico chegou até 2.900 mm/ano) e finalizando o ciclo sazonal, a estiagem de 2007 (julho a setembro de 2007).

6.1.1 Unidade Souza Franco

Localizada na Travessa Souza Franco, esquina com a 02 de dezembro, Bairro: Ponta Grossa - Icoaraci, esta unidade de captação de água é composta de 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12") da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8") até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8") (Figura 05).

6.1.2 Unidade São Roque I

Localizada na Travessa São Roque s/n entre a Rua 02 de dezembro e Rua da Campina, Bairro: Campina – Icoaraci, esta unidade de captação de água é composta de 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12") da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8") até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8") (Figura 06).



Figura 05: Unidade Souza Franco de captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).



Figura 06: Unidade São Roque captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).

6.1.3 Unidade COHAB

Localizada na Avenida Contorno Norte 4 e 5 (Cj. COHAB), Bairro: COHAB - Icoaraci, esta unidade de captação de água possui 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 355,6 mm (14") da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,8 mm (8") até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,8 mm (8") (Figura 07).

6.1.4 Unidade Água Boa

Localizada na Travessa Flamengo esquina com a Rua Jader Barbalho, Bairro: Água Boa – Outeiro, esta unidade de captação de água possui 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12") da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8") até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,8 mm (8") (Figura 08).



Figura 07: Unidade COHAB captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).



Figura 08: Unidade Água Boa captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).

6.1.5 Unidade Águas Negras

Localizada na Avenida Hélio Amanajás, s/n esquina com a passagem Ceará, Bairro: Águas Negras – Icoaraci, esta unidade de captação de água possui 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12”) da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8”) até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8”) (Figura 09).

6.1.6 Unidade Eduardo Angelim

Localizada no Conjunto Residencial Eduardo Angelim – Rodovia Augusto Montenegro Km 11, Bairro: Icoaraci, esta unidade de captação de água possui 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos Geomecânicos com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12”) da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8”) até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8”) (Figura 10).



Figura 09: Unidade Águas Negras captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).



Figura 10: Unidade Eduardo Angelim captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).

6.1.7 Unidade Tocantins / 26 de Outubro

Localizada na Rua Líderes, Parque Guajará – Bairro: Icoaraci, esta unidade de captação de água é composta de 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12”) da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8”) até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8”) (Figura 11).

6.1.8 Unidade Raimundo Jinkings

Localizada na Rua Juscelim Brasil (Residencial Raimundo Jinkings), Bairro: Tapanã, esta unidade de captação de água é composta de 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12”) da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8”) até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8”) (Figura 12).



Figura 11: Unidade Tocantins captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).



Figura 12: Unidade Raimundo Jinkings captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).

6.1.9 Unidade Pratinha

Localizada na Passagem Novo Horizonte com a Rua Geremias, Bairro: Pratinha, esta unidade de captação de água é composta de 01 (um) Poço Tubular Profundo de 270 m de profundidade, revestido com Tubos de Aço Carbono Schedule 40 com as seguintes dimensões: diâmetro de 304,8 mm (12") da câmara de bombeamento da boca do poço até 110 m, onde reduz para diâmetro de 203,2 mm (8") até a profundidade de 230 m. A partir de 230 m até a profundidade de 270 m está instalado 40 m de Filtros de Aço Inox AISI – 304 com diâmetro de 203,2 mm (8") (Figura 13).



Figura 13: Unidade Pratinha captação de água subterrânea pertencente à prefeitura de Belém (SAAEB).

Na Tabela 1 estão descritas as características dos 10 poços selecionados na área de estudo, além de valores da profundidade e a sua utilização ao abastecimento público segundo a ocorrência de sistemas aquíferos. Desses, apenas para o poço raso não foi possível se obter as características construtivas, nos demais, foi possível obter a profundidade e dados importantes como posicionamento dos filtros e diâmetro do pré-filtro.

Tabela 01 - Dados de profundidade, vazão de exploração, aquífero explorado e o ano de início de operação das unidades estudadas.

Unidade	Prof. (m)	Q exp. (m³/h)	Aquífero Explorado	Início de operação
Souza Franco	270	350	Pirabas	1998
São Roque	270	280	Pirabas	1982
COHAB	270	350	Pirabas	1999
Água Boa	270	350	Pirabas	1999
Águas Negras	270	350	Pirabas	2005
Ed. Angelim	270	350	Pirabas	1999
Tocantins	270	350	Pirabas	2000
R. Jinkings	270	300	Pirabas	2001
Pratinha	270	350	Pirabas	1999
Poço raso	≈ 16	-	Barreiras	-

7 MATERIAIS E MÉTODOS

O período de amostragem foi de setembro de 2006 a setembro 2007. O período chuvoso (janeiro a maio de 2007) foi caracterizado por chuvas abundantes (o índice pluviométrico chegou até 2.900 mm/ano) e finalizando o ciclo sazonal, a estiagem de 2007 (julho a setembro de 2007).

Para o estudo da composição química das águas do sistema Pirabas, foram escolhidas nove unidades de abastecimento em diferentes bairros do distrito de Icoaraci e Outeiro (Figura 04).

7.1 PROCEDIMENTO DE CAMPO

As campanhas envolveram coletas de águas subterrâneas, que necessitaram de procedimentos e cuidados específicos, de acordo com as orientações de Normas Técnicas da CETESB (1978 e 1987).

Utilizaram-se garrafas de polietileno com tampa de enroscar e volume de 1000 mL, lavadas inicialmente com solução ácida e em seguida com água deionizada. Esse procedimento evita qualquer tipo de contaminação proveniente do frasco.

Foram determinados parâmetros físicos e físico-químicos *in situ* (temperatura, condutividade elétrica, pH e sólidos totais dissolvidos), utilizando-se equipamentos portáteis (pH-meter marca WTW modelo 91, com calibração de pH 6,865 e 4,008 e equipamento multifuncional - termômetro, condutivímetro e STD, digital, com eletrodo combinado de vidro, correção de temperatura para 25 °C, marca ORION modelo 115A).

As amostras foram coletadas diretamente dos poços (Figura 14), que segundo informações dos operadores, são submetidos a um bombeamento contínuo. Através de um sistema de válvulas a água bombeada foi liberada por cerca de 2 minutos e, posteriormente, as amostras foram coletadas e então acondicionadas em isopor com gelo para serem transportadas até o Laboratório de Hidroquímica do Instituto de Geociências - UFPA.



Figura 14: Fotografia ilustrando o sistema de válvulas pelo qual as amostras de água do poço foram coletadas. Local de coleta da amostra da unidade Tocantins.

7.2 PROCEDIMENTO DE LABORATÓRIO

Os parâmetros químicos foram determinados por meio de metodologias recomendadas pela APHA (1995) e CETESB (1978), como explicado a seguir.

- Alcalinidade Total

Foi determinada através de 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 (Rodier, 1981).

- Ferro Total

Método da orto-fenantrolina. Determinação espectrofotométrica de ferro, espectrofotômetro marca BECKMAN DU-6 a $\lambda=510$ 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) (CETESB, 1978). A concentração de ferro total é realizada mediante curva de calibração a partir de padrões pré-estabelecidos (CETESB, 1978).

- Bicarbonato

Determinado a partir dos valores numéricos da alcalinidade total, expressa em mg/L de CaCO_3 , que são multiplicados pela constante 1,22 (Custódio & Llamas, 1976).

- Cátions e Ânions

Determinaram-se as concentrações de cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e ânions (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- e SO_4^{2-}) por cromatografia líquida, com cromatógrafo de íons Dionex DX-120. Para a análise de cátions utilizou-se coluna catiônica (CSRS ULTRA-CS12A Dionex), eluente 20 Mm MSA (Ácido Metanosulfônico) e fluxo $1,0 \text{ mL min}^{-1}$. Para análise dos ânions utilizou-se coluna aniônica (ASRS ULTRA-AS14 Dionex), como eluente foi utilizada uma solução $3,5 \text{ mM Na}_2\text{CO}_3/1,0 \text{ mM NaHCO}_3$ e fluxo $1,2 \text{ mL min}^{-1}$.

- Cálculo do Índice de Saturação

Para os cálculos de equilíbrio entre as águas e alguns minerais utilizou-se o programa WEB-PHREEQ - AQUEOUS GEOCHEMICAL MODELING (2009). Esse programa calcula o grau de saturação ou insaturação (Tabela 2) das águas em relação aos minerais mais comuns, partindo dos teores dos elementos químicos presentes e das medidas *in situ* de pH e temperatura, aplicando-se a expressão:

$$\text{IS} = \log (\text{IAP}/\text{K})$$

IAP= produto da atividade iônica

K = produto de solubilidade para a reação de dissolução da espécie mineral considerada.

Tabela 02 - Limites dos estados de saturação e sua respectiva classificação.

Limites dos Índices de Saturação	Estados de Saturação
Abaixo de -0,10	Subsaturada
-0,10 a 0,10	Equilíbrio
Acima de 0,10	Supersaturada

7.3 BALANÇO IÔNICO

O princípio deste método está baseado na neutralidade da água, ou seja, a somatória das concentrações iônicas de cátions deve ser aproximadamente igual ao número das concentrações iônicas de ânions (expressos em meq/L). O balanço iônico consiste em calcular a razão da diferença entre a somatória de ânions e cátions (meq/L). Custódio e Llamas (2001) explicam que essa diferença é devida à acumulação de erros na determinação de cada variável e por desprezar as contribuições iônicas menores.

Para Lloyd e Heathcote (1985), a percentagem da diferença ou erro do balanço iônico se define como:

$$\text{DBI ou EBI (\%)} = 100 * \frac{(\sum r \text{ cátions} - \sum r \text{ ânions})}{(\sum r \text{ cátions} + \sum r \text{ ânions})}$$

Entretanto, Custódio e Llamas (2001) utilizam a seguinte equação:

$$(\%) = 200 * \frac{(\sum r \text{ cátions} - \sum r \text{ ânions})}{(\sum r \text{ cátions} + \sum r \text{ ânions})}$$

Para Hem (1985), valores de EBI entre 2 e 10 % refletem condições analíticas ótimas. Para Custódio e Llamas (2001) o erro admissível depende da concentração iônica e do tipo de água. A concentração iônica mostra uma proporcionalidade com a condutividade elétrica (CE) relacionada desta maneira (Tabela 3):

Tabela 03 - Relação entre a condutividade elétrica e o erro admissível segundo Custódio e Llamas (2001).

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Erro admissível (%)
50	30
200	10
500	8
≥ 2000	4

O cálculo do balanço iônico segundo a fórmula de Lloyd e Heathcote (1985) mostrou que, para a maioria das amostras estudadas, os erros da reação estiveram dentro do intervalo de 10 % (Figura 15). As amostras que excederam a 10 % foram as amostras do poço raso, este valor provavelmente está relacionado à elevada concentração de nitrato no poço, evidenciando sua vulnerabilidade. A correlação significativa entre o somatório de ânions e cátions mostra que um bom balanço iônico foi encontrado com $r^2 = 0,7664$ (Figura 16).

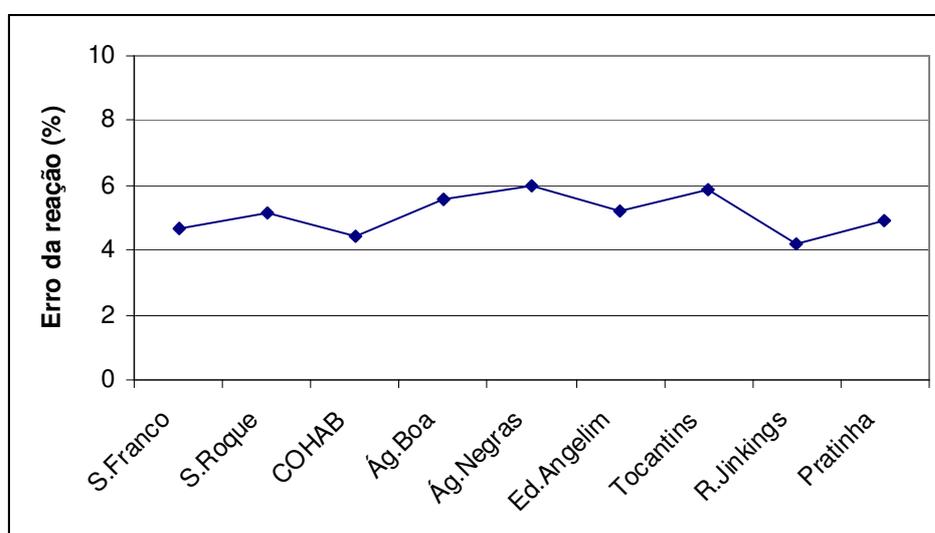


Figura 15: Representação do erro da reação do balanço iônico.

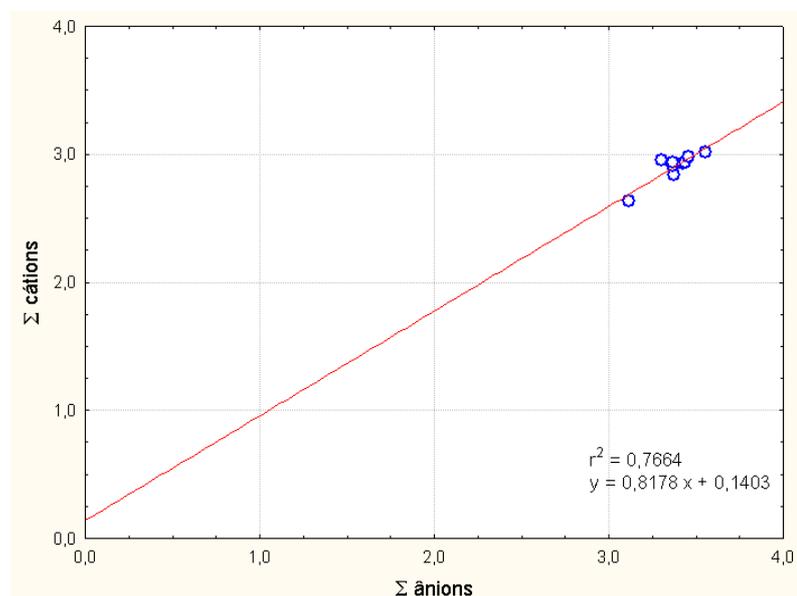


Figura 16: Correlação entre somatório de ânions e cátions das análises das águas subterrâneas dos 10 poços (meq/L).

7.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados das análises químicas das amostras foram avaliados em termos estatísticos, através de uma análise descritiva univariada e de uma análise de correlação. Estes métodos permitiram analisar quer a distribuição dos dados, distinguindo as suas características particulares, quer a sua associação entre si, com a determinação de relações entre os parâmetros físico-químicos analisados, foram construídos histogramas de valores reais, em meq/L, para os principais parâmetros envolvidos.

8 RESULTADOS

Na Região Metropolitana de Belém, a influência dos terrenos geológicos revela a fraca disponibilidade de eletrólitos nas águas subterrâneas associadas às coberturas cenozóicas de origem continental (Formação Barreiras) devido à ação climática com intensa realimentação da água subterrânea, bem como as apreciáveis concentrações de eletrólitos nas águas subterrâneas relacionadas com a Formação Pirabas, devido a sua composição litológica e maior tempo de contato da água subterrânea.

O monitoramento dos poços estudados foi realizado em 13 campanhas com início em setembro de 2006 e final em setembro de 2007. As campanhas de janeiro a maio de 2007 correspondem ao período chuvoso e as campanhas de junho a setembro de 2007 ao período seco. As amostragens foram realizadas mensalmente. Perfazendo um total de 130 amostras coletadas (10 por campanha). Dessa forma garantiu-se verificar as interações entre os sistemas hidrogeológicos e a variação sazonal sobre as características hidroquímicas dessas águas. A seguir é apresentado um resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas, na área estudada, referente aos períodos chuvoso e seco (Tabelas 4a, 4b, 5a e 5b).

Tabela 4a – Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Barreiras na área estudada – Período seco.

Parâmetros	Valores					Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de variação (σ/μ)
	N	Média (μ)	Mediana	Mínimo	Máximo		
CE ($\mu\text{S/cm}$)	4	211	212	180	240	26,55	0,13
K^+ (meq/L)	4	0,06	0,06	0,05	0,07	0,01	0,17
Mg^{2+} (meq/L)	4	0,08	0,08	0,07	0,09	0,01	0,13
Ca^{2+} (meq/L)	4	0,31	0,31	0,27	0,35	0,04	0,13
Na^+ (meq/L)	4	0,75	0,71	0,68	0,88	0,09	0,12
SO_4^{2-} (meq/L)	4	0,07	0,07	0,06	0,09	0,01	0,14
NO_3^- (meq/L)	4	1,31	1,30	1,18	1,44	0,11	0,08
Cl ⁻ (meq/L)	4	0,56	0,58	0,46	0,61	0,07	0,13
STD (meq/L)	4	1,81	1,85	1,66	1,89	0,11	0,06
T ($^{\circ}\text{C}$)	4	27,3	27,4	26,2	28,5	1,01	0,04
pH	4	-	-	4,02	4,28	-	-

*N – número de amostras.

Tabela 4b – Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Barreiras na área estudada – Período chuvoso.

Parâmetros	Valores					Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de variação (σ/μ)
	N	Média (μ)	Mediana	Mínimo	Máximo		
CE ($\mu\text{S/cm}$)	5	195	202	170	218	21	0,11
K ⁺ (meq/L)	5	0,04	0,04	0,03	0,06	0,01	0,25
Mg ²⁺ (meq/L)	5	0,08	0,08	0,07	0,09	0,01	0,13
Ca ²⁺ (meq/L)	5	0,27	0,25	0,23	0,33	0,04	0,15
Na ⁺ (meq/L)	5	0,62	0,61	0,49	0,70	0,08	0,13
SO ₄ ²⁻ (meq/L)	5	0,06	0,06	0,05	0,09	0,02	0,33
NO ₃ ⁻ (meq/L)	5	1,24	1,20	1,01	1,46	0,17	0,14
Cl ⁻ (meq/L)	5	0,45	0,46	0,39	0,49	0,04	0,09
STD (meq/L)	5	1,56	1,51	1,3	1,78	0,19	0,12
T (°C)	5	27,7	27,9	27,1	28,3	0,49	0,02
pH	5	-	-	3,88	4,11	-	-

*N – número de amostras.

Tabela 5a – Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Pirabas na área estudada – Período seco.

Parâmetros	Valores					Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de variação (σ/μ)
	N	Média (μ)	Mediana	Mínimo	Máximo		
CE ($\mu\text{S/cm}$)	36	284	256	219	360	47,68	0,17
K ⁺ (meq/L)	36	0,07	0,07	0,05	0,08	0,01	0,14
Mg ²⁺ (meq/L)	36	0,48	0,51	0,34	0,54	0,05	0,10
Ca ²⁺ (meq/L)	36	2,15	2,25	1,44	2,53	0,28	0,13
Na ⁺ (meq/L)	36	0,18	0,19	0,14	0,22	0,03	0,17
SO ₄ ²⁻ (meq/L)	36	0,15	0,15	0,12	0,17	0,01	0,07
HCO ₃ ⁻ (meq/L)	36	3,14	3,15	2,83	3,35	0,13	0,04
Cl ⁻ (meq/L)	36	0,10	0,10	0,06	0,15	0,02	0,20
STD (meq/L)	36	6,25	6,35	4,63	6,81	0,43	0,07
T (°C)	36	29,6	30,5	25,4	32,1	2,21	0,07
pH	36	-	-	6,48	7,79	-	-
Fe total (meq/L)	36	0,018	0,016	0,005	0,041	0,009	0,50
Alc. total (mg/L)	36	156,79	157,71	141,34	167,71	6,42	0,04

*N – número de amostras.

Tabela 5b – Resumo estatístico dos parâmetros físicos, físico-químicos e químicos da água do Sistema Aquífero Pirabas na área estudada – Período chuvoso.

Parâmetros (meqL ⁻¹)	Valores					Desvio Padrão (σ)	Coeficiente de variação (σ/μ)
	N	Média (μ)	Mediana	Mínimo	Máximo		
CE (μ S/cm)	45	347	352	292	385	25,23	0,07
K ⁺ (meq/L)	45	0,07	0,06	0,05	0,09	0,013	0,19
Mg ²⁺ (meq/L)	45	0,48	0,47	0,34	0,66	0,09	0,19
Ca ²⁺ (meq/L)	45	2,08	2,01	1,53	2,73	0,33	0,16
Na ⁺ (meq/L)	45	0,17	0,16	0,09	0,24	0,04	0,24
SO ₄ ²⁻ (meq/L)	45	0,17	0,15	0,11	0,26	0,05	0,29
HCO ₃ ⁻ (meq/L)	45	3,26	3,19	2,86	3,69	0,2	0,06
Cl ⁻ (meq/L)	45	0,1	0,1	0,06	0,16	0,02	0,20
STD (meq/L)	45	6,33	6,36	5,51	7,14	0,44	0,07
T (°C)	45	30,9	31	27,2	32,3	0,83	0,03
pH	45	-	-	6,6	8,1	-	-
Fe total (meq/L)	45	0,019	0,016	0,009	0,046	0,01	0,53
Alc. total (mg/L)	45	163,47	159,49	143,01	184,38	9,76	0,06

*N – número de amostras.

O histograma de valores reais do pH (Figura 17a) apresenta curva aproximadamente normal, com valores variando entre 6,4 e 8,2 refletindo o caráter ligeiramente alcalino das amostras dos poços tubulares profundos. Para a condutividade elétrica (CE), o histograma permite individualizar duas populações de amostras, onde os valores mais elevados da primeira ficam em torno de 240 μ S/cm a 260 μ S/cm enquanto que a população mais a direita apresenta valores mais altos que variam de 340 μ S/cm a 380 μ S/cm (Figura 17b).

O histograma do cloreto, com valores reais, produz uma curva relativamente normal, com grande parte das amostras concentradas entre 0,08 meq/L e 0,12 meq/L (Figura 17c).

No histograma do cálcio é possível individualizar duas populações (Figura 17d). A primeira com concentrações abaixo de 2,2 meq/L e a outra acima de 2,2 meq/L, o que leva a caracterizar uma distribuição de concentrações aproximadamente normal.

Para o sódio, o histograma de valores reais apresenta curva aproximadamente normal, onde as concentrações observadas com maior frequência estão entre 0,14 e

0,16 meq/L, o que representa cerca de 25% das amostras (Figura 17e). Em relação ao potássio o histograma, com valores reais, produz uma curva relativamente normal, com grande parte das amostras concentradas entre 0,06 meq/L e 0,08 meq/L (Figura 17f).

Os histogramas do magnésio e do bicarbonato apresentam uma curva levemente assimétrica positiva, com maior freqüência de concentrações das amostras nos intervalos de 0,5 a 0,55 meq/L para o magnésio e de 3,1 a 3,2 meq/L para o bicarbonato (Figuras 18a e 18c).

O histograma dos sólidos totais dissolvidos (STD) (Figura 18b) permite individualizar duas populações, valores mais elevados da primeira ficam em torno de 4,5 meq/L a 5,0 meq/L enquanto que a população mais a direita apresenta valores mais altos que variam de 6,0 meq/L a 7,0 meq/L.

Para o sulfato, o histograma de valores reais apresenta uma curva levemente assimétrica positiva, onde as concentrações observadas com maior freqüência estão entre 0,14 e 0,16 meq/L, o que representa cerca de 31% das amostras (Figura 18d). O histograma também mostra um grupo de amostras mais afastadas de menores freqüências que variam de 0,24 a 0,28 meq/L.

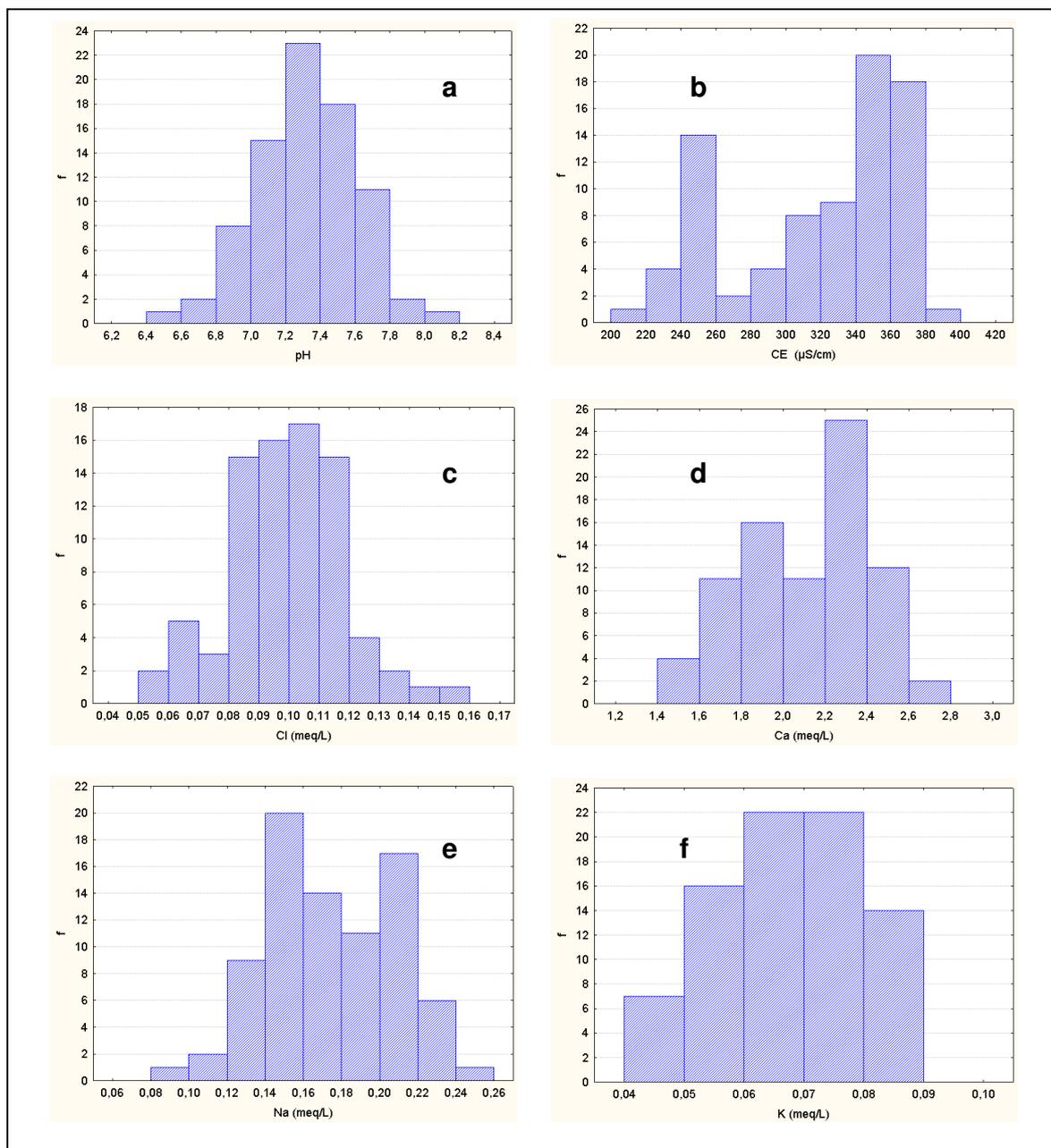


Figura 17: Histogramas de valores reais para a) pH, b) cond. Elétrica (CE), c) cloreto (Cl⁻), d) cálcio (Ca²⁺), e) sódio (Na⁺) e f) potássio (K⁺) das águas do sistema aquífero Pirabas provenientes de todas as campanhas de amostragem.

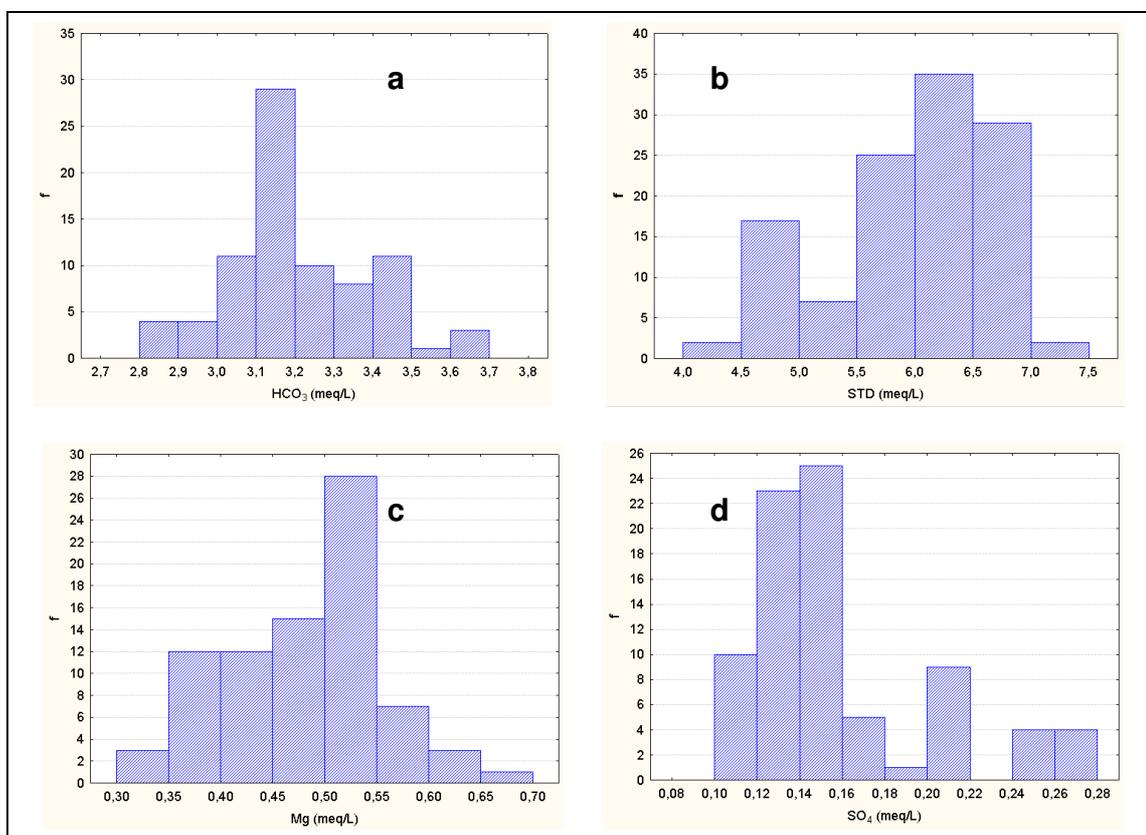


Figura 18: Histogramas de valores reais para a) bicarbonato (HCO_3^-); b) sólidos totais dissolvidos (STD); c) magnésio (Mg^{2+}) e d) sulfato (SO_4^{2-}) das águas do sistema aquífero Pirabas provenientes de todas as campanhas de amostragem.

Os histogramas construídos para as diferentes variáveis químicas mostram que parte dos parâmetros estudados apresenta assimetria nas distribuições dos seus valores. Tais resultados sugerem que as águas estudadas estão sofrendo influências de processos naturais climatológicos ou de processos artificiais/naturais como, por exemplo, a conectividade entre dois sistemas aquíferos devido à falhas/fraturas geológicas ou má construção de poços como a falta de isolamento dos aquíferos captados.

8.1. VARIAÇÃO SAZONAL OBSERVADA NOS SISTEMAS AQUÍFEROS BARREIRAS E PIRABAS NA ÁREA ESTUDADA.

Em aquíferos profundos a variação da composição química da água normalmente é muito pequena. Porém, no sistema aquífero Pirabas (profundidade > 150 metros na área de estudo) é possível observar que as variações das concentrações de alguns elementos acompanham as variações do sistema aquífero Barreiras (profundidade < 30 metros na área de estudo), que é influenciado diretamente pela sazonalidade. Tais resultados reforçam a influência de processos naturais climatológicos sobre as águas estudadas, que estão sofrendo influência de processos artificiais/naturais como, por exemplo, a conectividade entre dois sistemas aquíferos devido à falhas/fraturas geológicas ou má construção de poços como a falta de isolamento dos aquíferos captados.

8.1.1 pH

As águas naturais contêm geralmente CO_2 -dissolvido, HCO_3^- e CO_2 -livre, que juntos formam um sistema tampão, razão pela qual as variações de pH são relativamente pequenas (entre 5,0 e 8,0). As amostras dos poços tubulares profundos estudados apresentaram, em ambos os períodos seco e chuvoso, um valor em torno de pH igual a 7,3 (ligeiramente alcalino). Esse valor é fortemente influenciado pela presença abundante do bicarbonato, oriundo principalmente da dissolução da calcita nos calcários. A água do poço raso apresentou também uma pequena variação, com um valor em torno de pH igual a 4,14 no período seco e 3,98 no período chuvoso, bastante contrastante com as águas dos poços profundos (Figura 19).

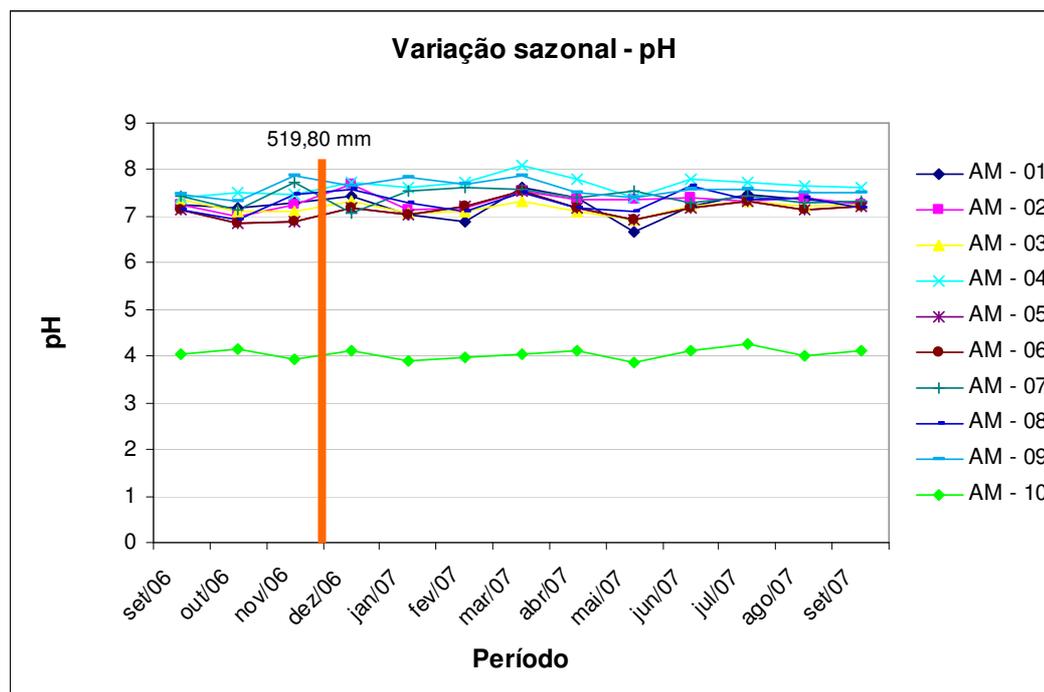


Figura 19: Diagrama mostrando a variação temporal do pH nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (Am-10) na área de estudo. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica é a capacidade de uma água conduzir a corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e da temperatura. A condutividade também fornece uma boa indicação das modificações na composição de uma água, especialmente na sua concentração mineral, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários componentes. À medida que mais sólidos dissolvidos são adicionados, a condutividade elétrica da água aumenta. Altos valores podem indicar características corrosivas da água (Ceretta, 2004).

Para as amostras dos poços tubulares profundos foram observados valores de condutividade elétrica, variando de 219 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 385 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 347 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso (Figura 20). Esses valores refletem a elevada concentração de eletrólitos nas águas do Sistema Aquífero Pirabas. Mostram

fortes oscilações no período de poucas chuvas (verão) quando os valores diminuem no período de junho a agosto e voltam a subir no mês de setembro.

No poço raso os valores variaram de 132 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco e 194 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso revelando uma mais fraca disponibilidade de eletrólitos nas águas subterrâneas associadas aos aquíferos do sistema Barreiras na região estudada.

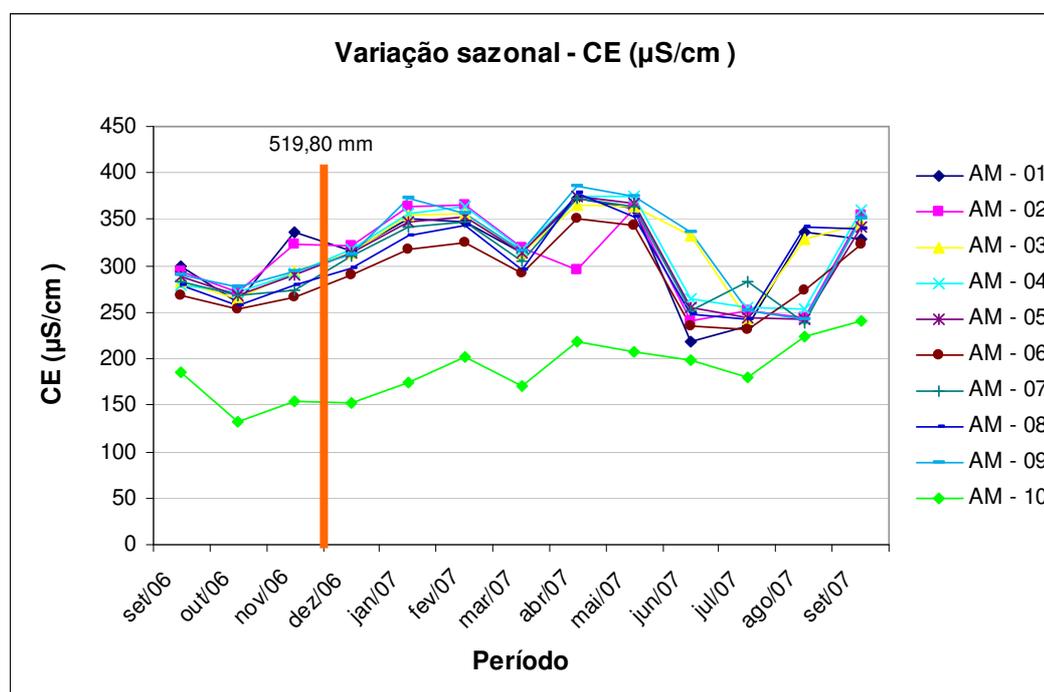


Figura 20: Diagrama mostrando a variação temporal da condutividade elétrica nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. Notar a marcada diferença entre os dois tipos de água e a leve tendência na elevação dos valores no sistema Barreiras no período de poucas chuvas (Verão). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.3 Alcalinidade Total

A determinação da alcalinidade é importante para o controle do processamento de águas naturais e de despejos. A alcalinidade é modificada por qualquer processo envolvendo produção ou eliminação de íons H^+ , OH^- e bases de ácidos fracos. Os limites esperados para análise de alcalinidade a carbonatos são de 10 à 500 mg/L

CaCO_3 (Silva, 1990² *apud* Baumgarten & Pozza, 2001). Nas águas brutas varia de 10 a 30 mg/L de CaCO_3 . O valor médio obtido nas amostras dos poços tubulares profundos foi 156,04 mg/L de CaCO_3 e 163,47 mg/L de CaCO_3 , nos períodos seco e chuvoso, respectivamente, mostrando um ligeiro aumento da concentração no período chuvoso (Figura 21). As amostras do poço raso apresentaram valores de alcalinidade muito baixos, próximos de zero.

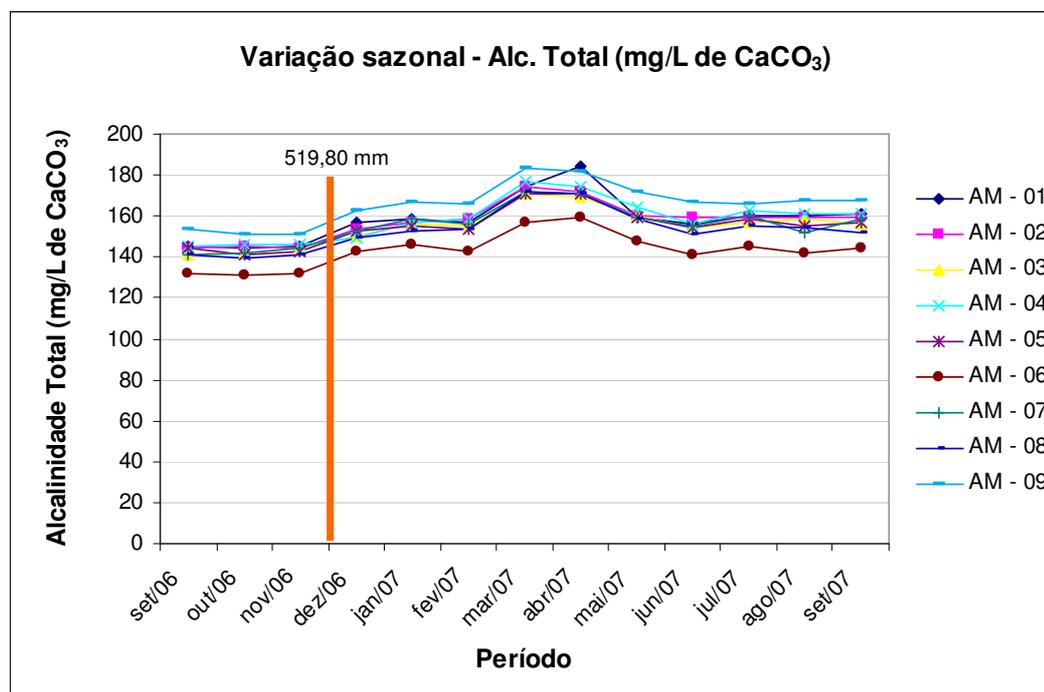


Figura 21: Diagrama mostrando a variação temporal da alcalinidade total nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.4 Ânions e Cátions

8.1.4.1 Bicarbonato (HCO_3^-)

O equilíbrio entre dióxido de carbono, íons bicarbonato e carbonato tem um efeito tampão sobre o pH da água. O íon bicarbonato é a espécie predominante na faixa de pH encontrada na maioria das águas naturais (5-9), e sua concentração (meq/L ou

² SILVA, M.O.S. 1990. Análises físico-químicas para controle de estações de tratamento de esgotos.

mmol/L) normalmente é referida como sinônimo de alcalinidade, que representa a capacidade da água em neutralizar um ácido (Giampá & Gonçalves, 2006). As amostras dos poços tubulares profundos apresentaram no período seco valor médio de 3,14 meq/L e no período chuvoso 3,27 meq/L, e, como ocorreu com a alcalinidade, houve um ligeiro aumento da concentração no período chuvoso para as águas do Sistema Aquífero Pirabas (Figura 22). As amostras do poço raso não apresentaram valores significativos de bicarbonato.

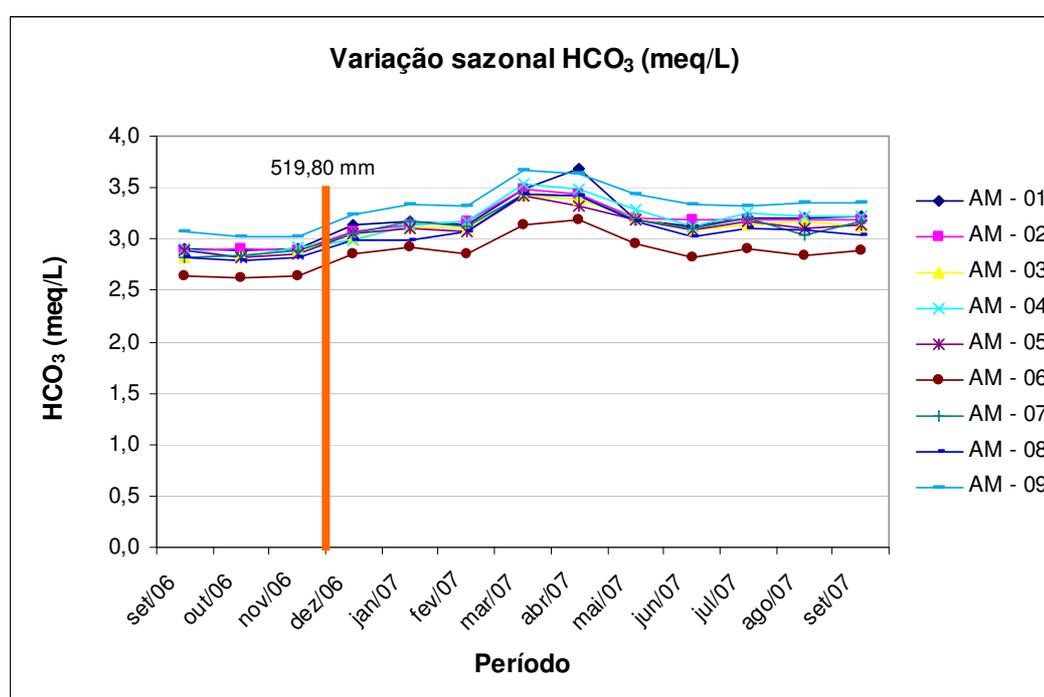


Figura 22: Diagrama mostrando a variação temporal do bicarbonato nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/06).

8.1.4.2 Cloreto (Cl⁻)

O cloreto está presente em todas as águas naturais, com valores situados entre 0,28 meq/L e 7,05 meq/L nas águas doces. Em geral, é muito solúvel e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita (Feitosa & Filho, 1997).

A alta solubilidade e o lento movimento das águas nos aquíferos provocam aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo (Feitosa & Filho, 1997).

As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de cloretos inferiores a 2,82 meq/L, diferentemente do observado na água do mar onde o cloreto é abundante e apresenta valores entre 507 meq/L e 338 meq/L, podendo chegar a 6.026 meq/L nas salmouras naturais (saturação) (Feitosa & Filho, 1997).

Devido à alta mobilidade, o cloreto é rapidamente lixiviado das rochas ou sedimentos mais permeáveis. Nas amostras dos poços tubulares profundos o cloreto apresentou, valores variando de 0,06 meq/L a 0,16 meq/L com média 0,1 meq/L em ambos os períodos. Já nas amostras do poço raso, os valores variaram de 0,39 meq/L a 0,61 meq/L com média 0,56 meq/L no período seco e 0,45 meq/L no período chuvoso (Figura 23). Em condições favoráveis, as concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero; ao se comparar às concentrações de cloreto nas águas subterrâneas com a concentração desse íon nas águas que abastecem os aquíferos (Schöller, 1962³ *apud* Fenzl, 1986). Além disso, por ser um elemento conservativo, o cloreto é um bom indicador de misturas de águas.

Na área estudada, percebe-se um contraste muito grande entre as águas do Sistema Aquífero Barreiras e as águas do Sistema Aquífero Pirabas. No Sistema Aquífero Barreiras a concentração do cloreto varia mais fortemente devido provavelmente a influências climatológicas, ou seja, aumenta com o aumento da evapotranspiração durante o período de verão (julho/setembro) enquanto que nos aquíferos Pirabas essa variação praticamente não é notada (Figura 23).

³ SCHOLLER, H. 1962. Les eaux souterrains. Paris, Masson, 624p.

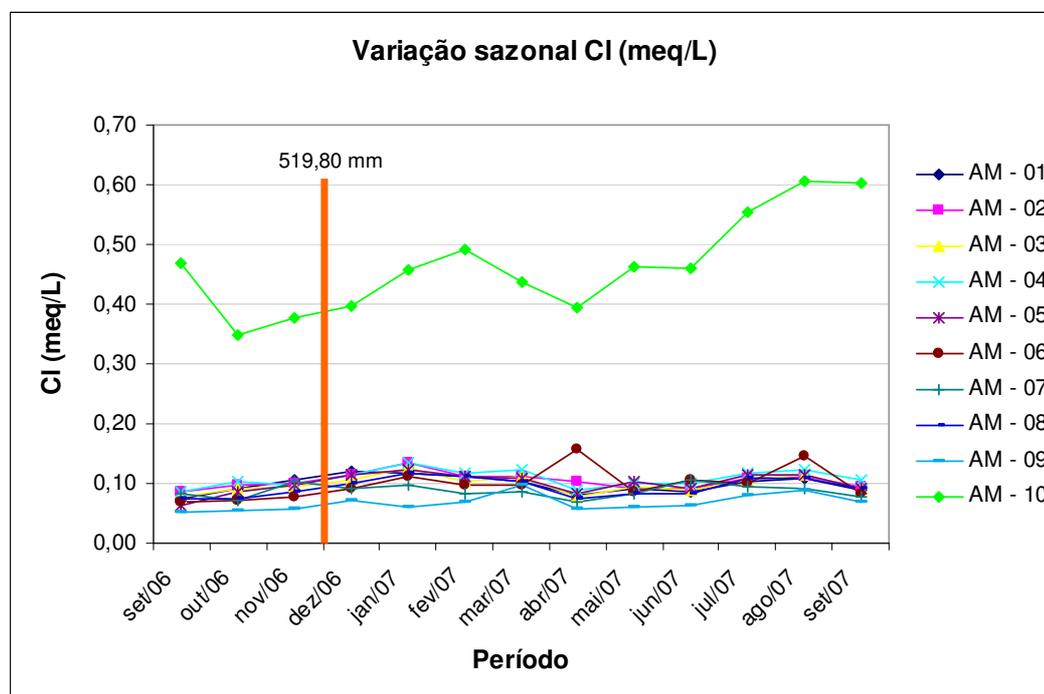


Figura 23: Diagrama mostrando a variação temporal do cloreto nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. Notar a marcada diferença entre as duas águas e a tendência, no poço raso, de elevação dos valores no período de poucas chuvas (Verão). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/06).

8.1.4.3 Sulfato (SO_4^{2-})

Forma predominante do enxofre em ambientes aeróbicos, o sulfato forma sais moderadamente solúveis a muito solúveis. Em meios redutores, com abundância de matéria orgânica, pode sofrer redução bacteriana para S e S^{-2} , porém geralmente é estável. Águas subterrâneas com excesso de sulfato ($> 0,83$ meq/L) podem causar efeitos laxativos (Batalha & Parlato, 1977⁴ *apud* Feitosa & Filho, 1997).

As amostras dos poços tubulares profundos apresentaram valores variando de 0,11 meq/L a 0,26 meq/L com média 0,15 meq/L no período seco e 0,17 meq/L no período chuvoso, com um pico em janeiro (início do período chuvoso). Nas amostras do

⁴ BATALHA, B.L.; & PARLATORE, A.C. 1977. Controle de qualidade da água para consumo humano: bases conceituais e operacionais. São Paulo-SP, CETESB. 198 p.

poço raso o SO_4^{2-} apresentou valores que variaram de 0,05 meq/L a 0,09 meq/L com média 0,07 meq/L no período seco e 0,06 meq/L no período chuvoso.

Observou-se uma elevação abrupta das concentrações de sulfato nos meses de janeiro/fevereiro em ambos os sistemas aquíferos. Essa elevação é concomitante com a elevação na concentração de cloreto e com o “pico” no índice de precipitação (Figura 24).

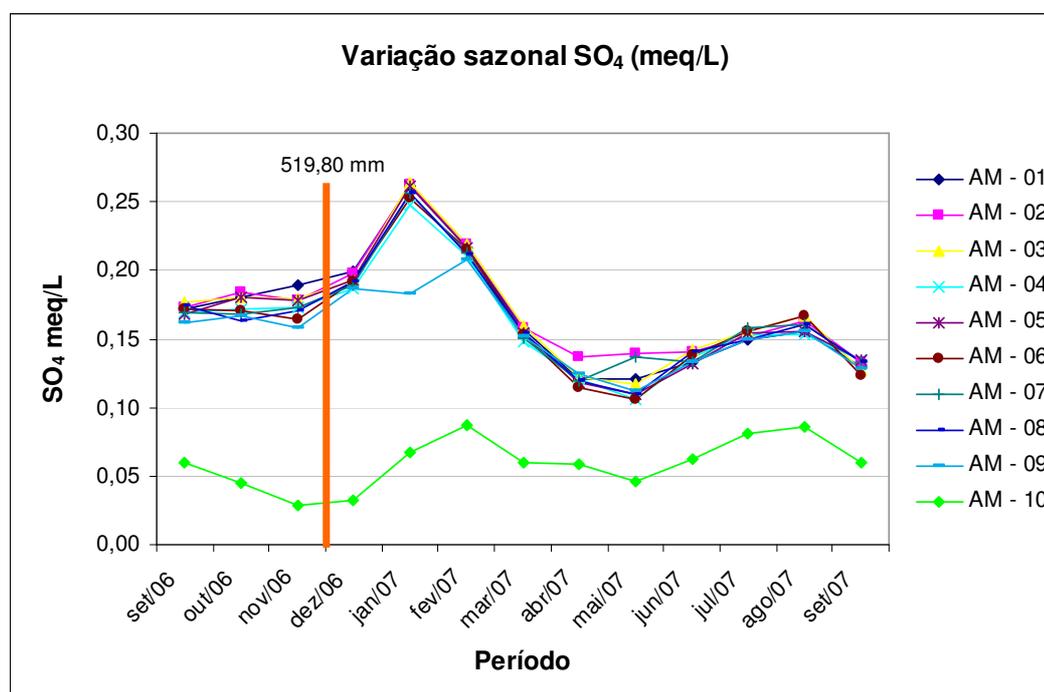


Figura 24: Diagrama mostrando a variação temporal do sulfato nas águas do sistema aquífero Pirabas e a diferença temporal no “pico” de sulfato nessas águas (fevereiro) e nas águas do sistema aquífero Barreiras (março). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.4.4 Sódio (Na^+)

O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas. De forma geral, ocorre principalmente associado ao cloreto nas águas subterrâneas e seus minerais “fontes” em rochas ígneas são essencialmente os feldspatos plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios. O

sódio é o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico. Possui alta solubilidade, sendo dificilmente precipitável. A concentração do sódio varia, em geral, entre 0,0044 e 4,35 meq/L nas águas subterrâneas e entre 0,04 e 6,53 meq/L em águas naturais doces, atingindo 482,85 meq/L nas águas do oceano Atlântico, em média, e podendo chegara 4.350 meq/L nas salmouras naturais (Feitosa & Filho, 1997).

As amostras dos poços tubulares profundos apresentaram valores variando de 0,09 meq/L a 0,24 meq/L com média 0,18 meq/L no período seco e 0,17 meq/L no período chuvoso. Nas amostras do poço raso o sódio apresentou valores muito maiores, que variaram de 0,49 meq/L a 0,88 meq/L com média 0,75 meq/L no período seco e 0,62 meq/L no período chuvoso (Figura 25).

No poço raso a concentração do sódio aumenta gradativamente durante o período seco, seguindo a curva do cloreto.

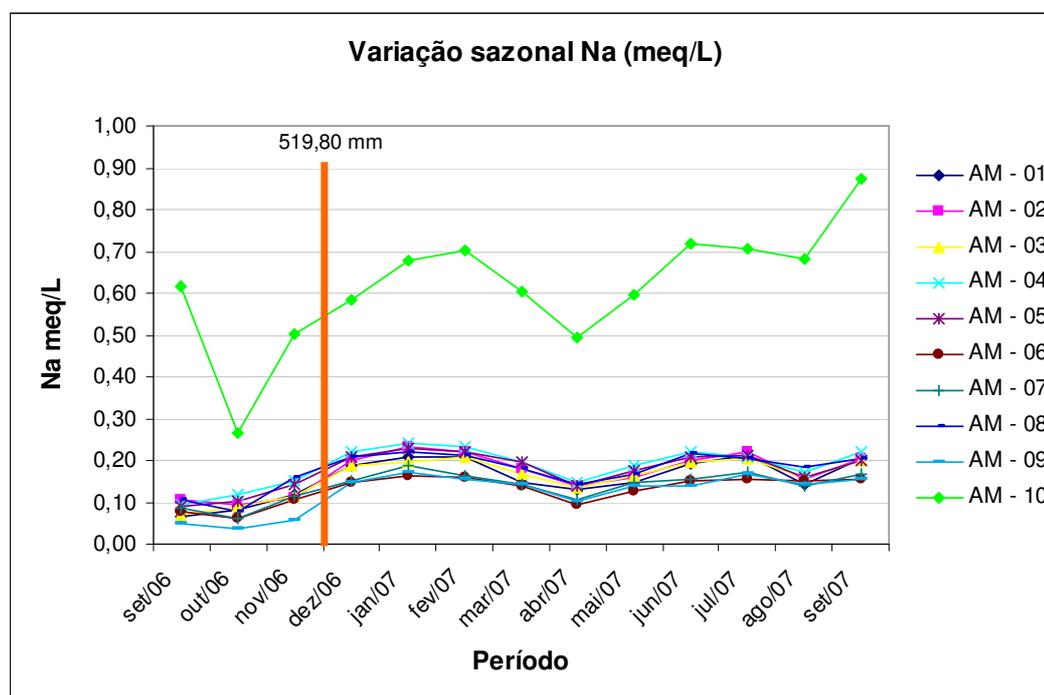


Figura 25: Diagrama mostrando a variação temporal do sódio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.4.5 Potássio (K^+)

O potássio é um elemento químico abundante na crosta terrestre, mas ocorre em pequena quantidade nas águas subterrâneas, pois é facilmente fixado pelas argilas e intensivamente consumido pelos vegetais. Suas principais fontes minerais são: feldspato potássico, mica muscovita e biotita, os quais são pouco resistentes ao intemperismo. Nas águas meteóricas os teores de potássio estão geralmente no intervalo de 0,003 a 0,1 meq/L, enquanto as águas do oceano Atlântico apresentam, em média, 10,23 meq/L. Nas águas subterrâneas seu teor médio é inferior a 0,26 meq/L, sendo mais freqüente os valores entre 0,04 e 0,13 meq/L (Feitosa & Filho, 1997).

As amostras estudadas dos poços tubulares profundos apresentaram valores variando de 0,05 meq/L a 0,09 meq/L com média 0,07 meq/L nos períodos seco e chuvoso. As amostras do poço raso apresentaram valores que variaram de 0,03 meq/L a 0,07 meq/L com média de 0,06 meq/L no período seco e 0,04 meq/L no período chuvoso (Figura 26).

Percebe-se uma forte oscilação nos valores tanto no Sistema Aquífero Barreiras quanto no Sistema Aquífero Pirabas. O comportamento das curvas é semelhante, mostrando dois “picos” que representam um aumento na concentração entre os meses de janeiro/março em seguida em julho/agosto.

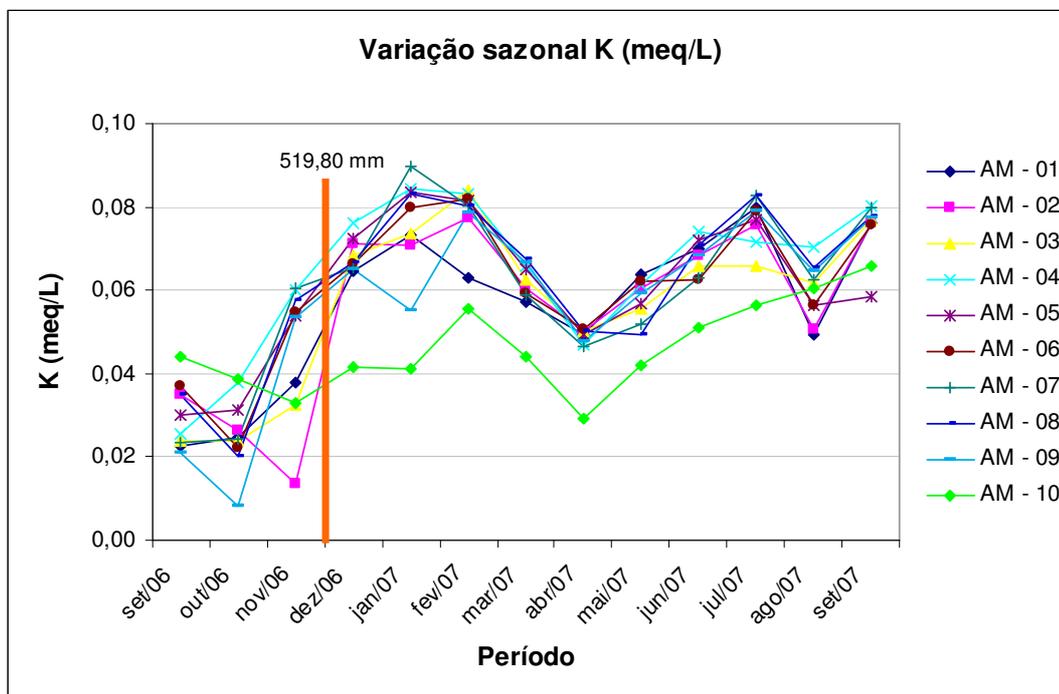


Figura 26: Diagrama mostrando a variação temporal do potássio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.4.6 Cálcio (Ca^{2+})

Sendo um dos elementos mais importantes da crosta terrestre, o cálcio é freqüentemente encontrado como cátion principal na maioria das águas naturais. Os sais de cálcio possuem solubilidade moderada e/ou elevada, sendo muito comum precipitar como carbonato de cálcio (CaCO_3). É constituinte da água e o principal responsável pela dureza. Apresenta-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato (Feitosa & Filho, 1997).

Nas águas meteóricas os teores de cálcio variam no intervalo 0,0049 a 0,50 meq/L e nas águas do oceano Atlântico os valores oscilam em torno de 23,95 meq/L. Nas águas subterrâneas, os teores de cálcio variam, em geral, entre 0,5 e 4,99 meq/L (Feitosa & Filho, 1997).

As amostras estudadas do sistema aquífero Pirabas mostraram valores consideráveis de cálcio. Esses valores são atribuídos provavelmente às rochas (ricas em calcita, dolomita e aragonita) que compõem o sistema. Essas amostras apresentaram valores variando de 1,44 meq/L a 2,73 meq/L com média 2,15 meq/L no período seco e 2,08 meq/L no período chuvoso. Nas amostras do sistema aquífero Barreiras foram observados valores mais baixos, com as concentrações variando de 0,23 meq/L a 0,35 meq/L com média 0,31 meq/L no período seco e 0,27 meq/L no período chuvoso (Figura 27).

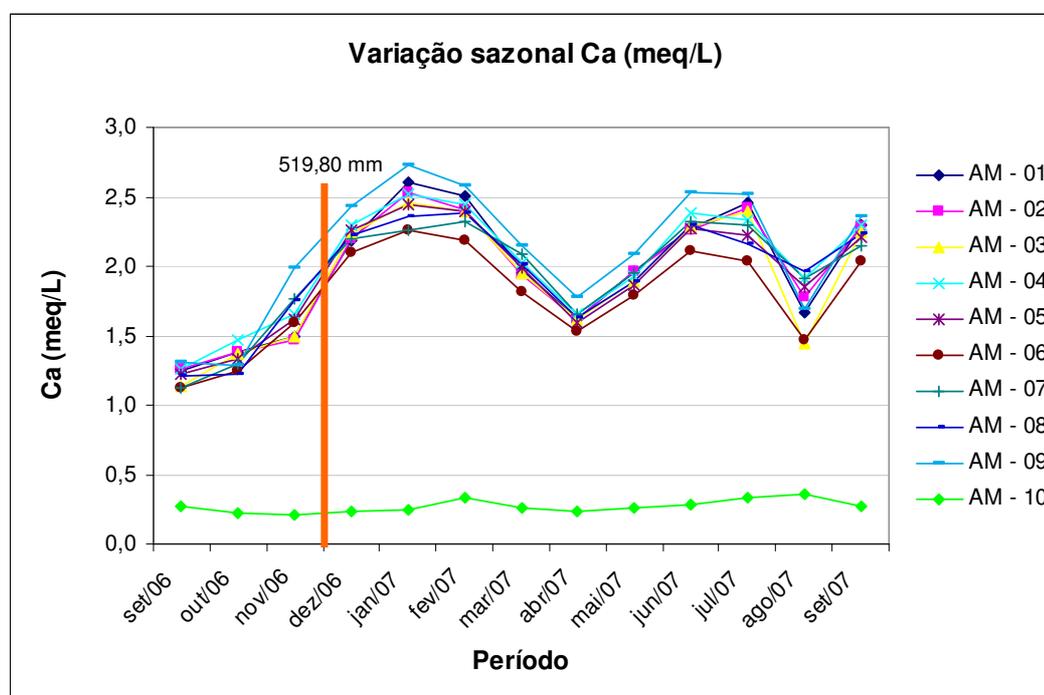


Figura 27: Diagrama mostrando a variação temporal do cálcio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (AM – 10). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/06).

Percebe-se, da mesma forma que o potássio, que há dois “picos” representados por aumentos nas concentrações em dois períodos distintos do ciclo hidrológico. Essa variação é mais fortemente notada nos poços do sistema aquífero Pirabas e é praticamente imperceptível no poço do sistema aquífero Barreiras.

8.1.4.7 Magnésio (Mg^{2+})

O magnésio apresenta propriedades similares ao cálcio, porém é mais solúvel e mais difícil de precipitar. Quando em solução, tem a tendência de nela permanecer, daí o enriquecimento dos seus sais nas águas dos oceanos. Ocorre principalmente em rochas calcárias, sob a forma geral de bicarbonato e juntamente com o cálcio é o responsável pela dureza nas águas.

As águas meteóricas apresentam teores de magnésio entre 0,03 e 0,13 meq/L e a água do oceano Atlântico tem valor médio de aproximadamente 115,99 meq/L. As águas subterrâneas apresentam teores mais freqüentes de magnésio no intervalo de 0,08 e 3,29 meq/L (Feitosa & Filho, 1997).

As amostras estudadas do sistema aquífero Pirabas apresentaram valores variando de 0,34 meq/L a 0,66 meq/L com média de 0,48 meq/L em ambos os períodos, seco e chuvoso. Nas amostras do sistema aquífero Barreiras, os valores variaram de 0,07 meq/L a 0,09 meq/L com média de 0,08 meq/L em ambos os períodos seco e chuvoso (Figura 28).

O comportamento das concentrações de magnésio é similar ao comportamento apresentado pelo cálcio e potássio nas águas do sistema Pirabas (Figuras 26 e 27). Da mesma forma que o cálcio e o potássio, o magnésio mostra dois “picos” que representam aumentos na concentração durante dois períodos distintos do ciclo hidrológico.

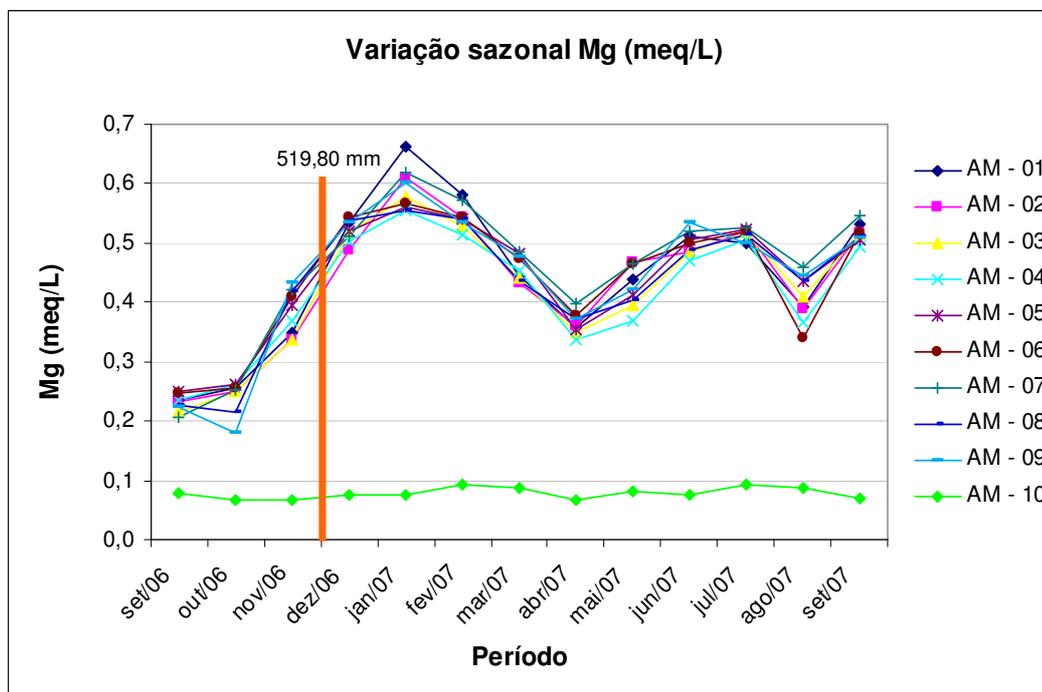


Figura 28: Diagrama mostrando a variação temporal do magnésio nas águas do sistema aquífero Pirabas e nas águas do sistema aquífero Barreiras (AM – 10). E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/96).

8.1.4.8 Ferro total

O ferro pode estar presente com baixos teores ($< 0,01 \text{ meq/L}^{-1}$) em quase todas as águas e ocorre sob diversas formas químicas e, freqüentemente, aparece associado ao manganês. Ocorre principalmente sob a forma de Fe^{3+} (ferro férrico) podendo também ocorrer como Fe^{2+} (ferro ferroso). O ferro no estado ferroso é instável na presença do oxigênio do ar, mudando para o estado férrico.

Quando a água que contém é exposta ao oxigênio do ar, os íons ferrosos se oxidam tornando-se férricos. Desta forma, águas com alto conteúdo em ferro, ao saírem do poço são incolores, mas ao entrarem em contato com o oxigênio do ar ficam amareladas, o que lhes confere uma aparência nada agradável. O limite estabelecido pela Portaria 518/2004 MS é de $0,01 \text{ meq/L}$; este limite é estabelecido em função de

problemas estéticos relacionados à presença do ferro na água e do sabor ruim que o ferro lhe confere.

O alto teor de ferro na água subterrânea pode estar ligado à ocorrência de sulfetos de ferro, comuns em rochas ricas em matéria orgânica ou mesmo à corrosão do revestimento do filtro do poço.

Nas amostras estudadas, observou-se uma elevação abrupta das concentrações de ferro nos meses de outubro/06 (AM-08) e janeiro/07 (AM-04) em duas amostras do sistema aquífero Pirabas. Essa elevação e os demais "picos" irregulares observados, provavelmente estão associados às tubulações visivelmente bastante incrustadas e a falta de manutenção periódica desses poços.

As amostras do sistema aquífero Pirabas apresentaram valores variando de 0,01 meq/L a 0,05 meq/L com média de 0,02 meq/L em ambos os períodos seco e chuvoso, onde os valores mais elevados provavelmente estão associados às tubulações bastante incrustadas, já as amostras do sistema aquífero Barreiras, apresentaram valores muito baixos, inferiores a 0,001 meq/L em ambos períodos seco e chuvoso (Figura 29).

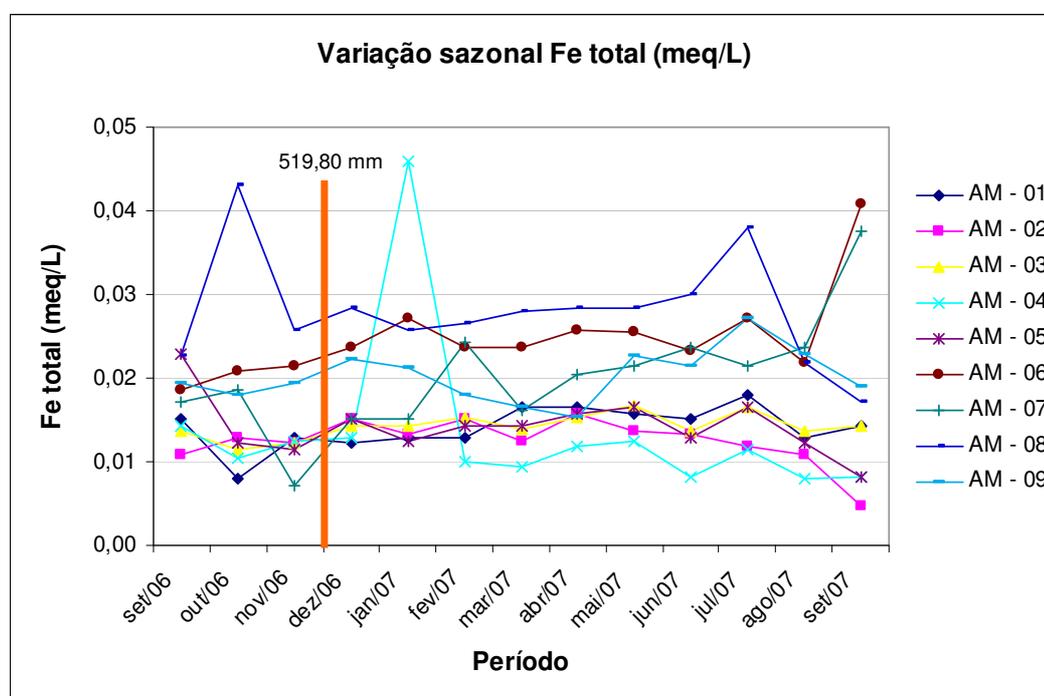


Figura 29: Diagrama mostrando a variação temporal do ferro total nas águas do sistema aquífero Pirabas. E o mês com maior precipitação pluvial durante o período de coleta (dez/06).

8.2 FÁCIES HIDROQUÍMICAS

Fácies hidroquímicas são massas de água que tem diferentes características geoquímicas. Estas são freqüentemente delineadas por diagramas de Piper ou de Durov e tem contribuído para o entendimento do fluxo e da qualidade de água.

O diagrama de Piper corresponde à junção de três diagramas individuais que demonstram a percentagem composicional dos íons. Agrupam-se os cátions (Na^+K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e os ânions (SO_4^{2-} , HCO_3^- e Cl^-) em diagramas triangulares distintos (Fetter, 1994).

Este diagrama trilinear permite detectar diferenças ou semelhanças entre vários tipos de águas, misturas de águas e a origem comum ou não dos íons analisados.

A Figura 30 representa o diagrama de Piper, para os principais ânions e cátions associados aos diferentes aquíferos. Para a área estudada, analisando as diferentes projeções para os íons presentes verificou-se nas amostras do sistema aquífero Pirabas a predominância dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} e do ânion HCO_3^- e para as amostras do sistema aquífero Barreiras a predominância do cátion Na^+ e dos ânions Cl^- e NO_3^- .

Com base nessa distribuição, tem-se uma idéia da composição química das águas analisadas e de seus fácies hidroquímicos, são elas:

1 – Fácies Hidroquímico 1 – Sistema Pirabas: HCO_3^- – Ca - Mg

2 - Fácies Hidroquímico 2 – Sistema Barreiras: Cl - NO_3^- - Na

As águas do fácies bicarbonatado cálcio magnesiana (Fácies Hidroquímico 1) são características de uma maior evolução e associam-se a uma circulação mais profunda, em que há dissolução de calcários, rochas essas, descritas como componentes essenciais da formação Pirabas, onde esses aquíferos estão localizados.

As águas do fácies cloretado sódica (Fácies Hidroquímico 2) são características da composição química quantitativa de precipitação pluviométrica, certamente pertencente ao sistema aquífero Barreiras. O elevado valor de nitrato observado nessas

águas indica uma provável contribuição antrópica, cuja fonte deve estar associada a fossas sépticas e esgoto próximas do poço amostrado.

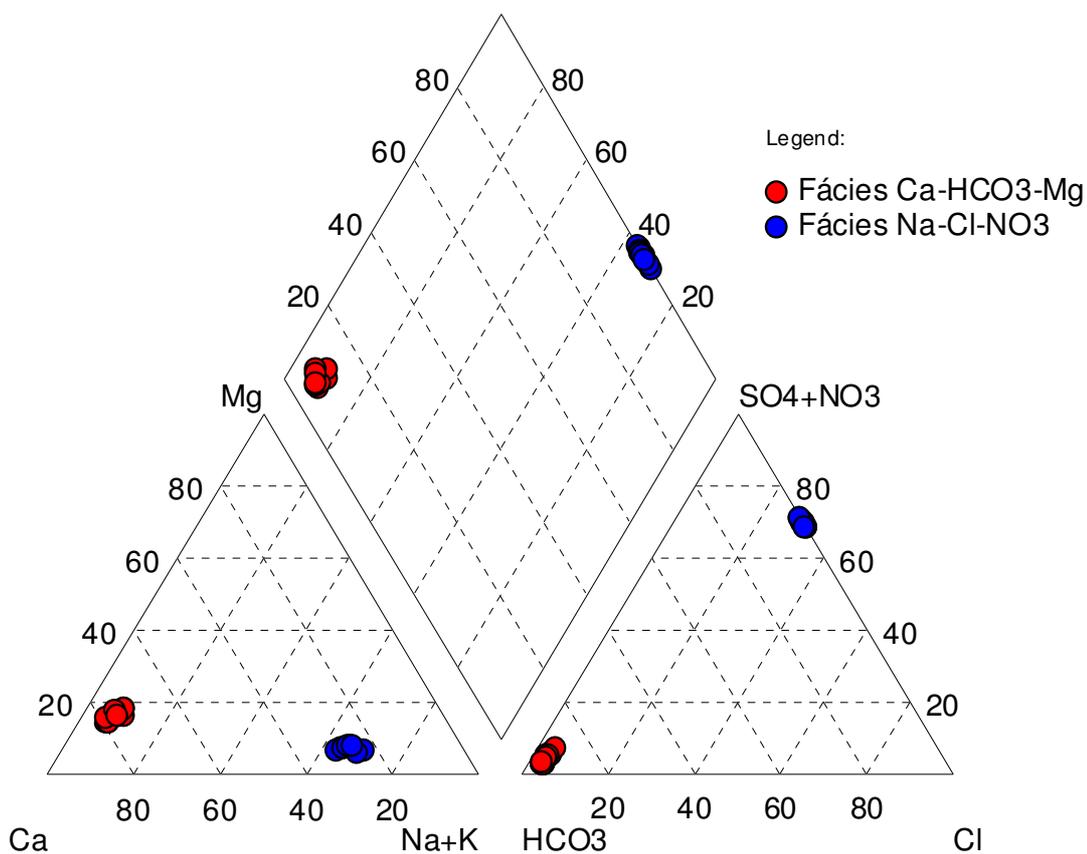


Figura 30: Diagrama de Piper mostrando as diferentes fácies hidroquímicas: Fácies HCO₃ - Ca - Mg e Fácies Cl - NO₃ - Na.

Os fácies hidroquímicos das águas subterrâneas são afetados pela litologia, clima e padrão de fluxo, mas na área estudada os aquíferos superficiais (Sistema Barreiras) são afetados principalmente pelo clima e poluição, enquanto que os aquíferos profundos (Sistema Pirabas) são influenciados predominantemente pela litologia.

Na área de estudo isso é evidente, pois os aquíferos do sistema Barreiras se encontram em rochas fortemente intemperizadas e em parte inconsolidadas ou semi-consolidadas. Esses aquíferos estão localizados a profundidades de até 90 metros

(Matta, 2002). A natureza inconsolidada ou pouco consolidada desse sistema de aquíferos sugere um sistema aberto, que recebe uma recarga direta da água da chuva, que na região estudada é influenciada principalmente por aerossóis marinhos transportados por correntes atmosféricas.

Quanto ao sistema Pirabas, trata-se de um sistema confinado ou semi-confinado. Segundo Oliveira *et. al*, (2001) são compostos de calcários consolidados intercalados as margas e argilitos cinza esverdeados com intercalações de arenitos finos a conglomeráticos de cor cinza em profundidades superiores a 250 metros.

As diferenças nos fácies hidroquímicas observadas entre os dois sistemas aquíferos devem ser atribuídos à interação entre precipitação (fator climático) e processos intempéricos (dissolução de minerais) (Figura 31).

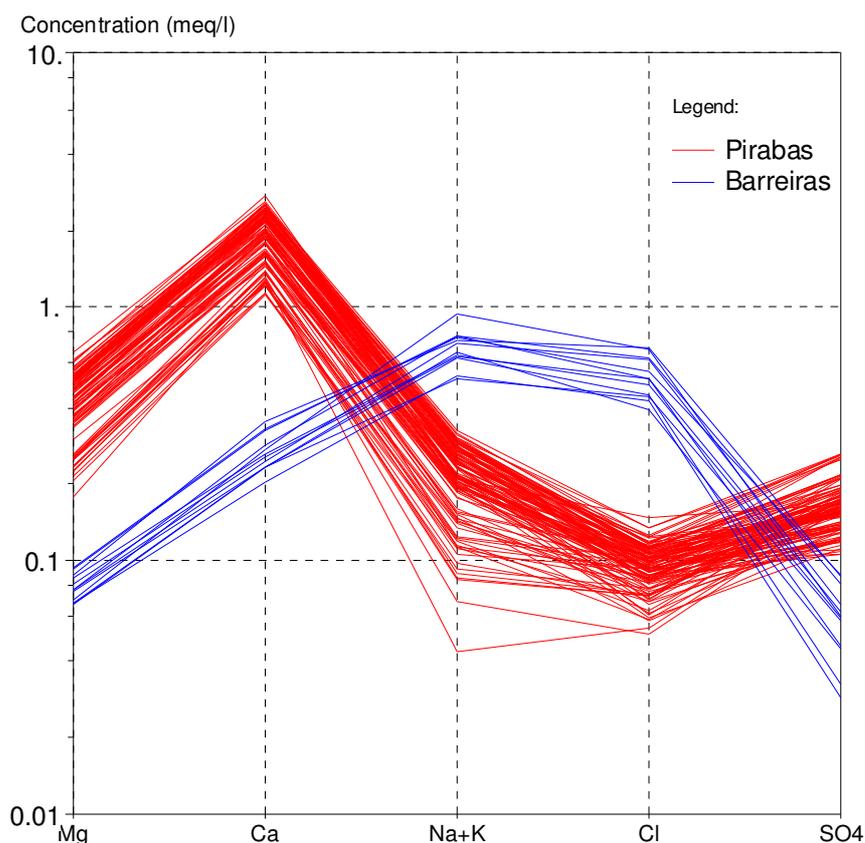


Figura 31: Diagrama de Schöller mostrando os dois principais fácies hidroquímicos, da área de estudo. Em vermelho, águas do sistema Pirabas e em Azul, águas do sistema Barreiras.

8.2.1 Análise de Correlação

Existem três diferentes tipos de correlação nos sistemas aquosos (Reddy e Nayudu, 1997), são eles: (i) uma forte correlação entre íons de mesma carga, porém número de valência diferente; (ii) uma forte associação química entre íons de cargas opostas, mas número de valência igual; (iii) uma baixa correlação entre íons de mesma carga e número de valência igual. Abaixo apresentaremos uma matriz com os coeficientes de correlação (r) entre os íons estudados, que foi calculada usando uma análise de regressão linear a partir do programa Statistica vs 6.0.325.0.

A matriz de correlação entre os principais parâmetros químicos e físico-químicos analisados no poço do sistema Barreiras, durante os dois períodos (seco e chuvoso), mostra valores diferenciados. No período chuvoso esse fácies hidroquímico se caracteriza por: a) forte correlação positiva entre K^+ e Mg^{2+} ($r = 0,98$), K^+ e Ca^{2+} ($r = 0,92$), K^+ e Na^+ ($r = 0,86$), Ca^{2+} e Mg^{2+} ($r = 0,89$), Na^+ e Cl^- ($r = 0,87$), Ca^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,80$), Na^+ e NO_3^- ($r = 0,91$) e Cl^- e NO_3^- ($r = 0,98$), b) uma correlação moderada mas não significativa entre o K^+ e SO_4^{2-} ($r = 0,67$), K^+ e Cl^- ($r = 0,53$), Mg^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,57$), Mg^{2+} e Na^+ ($r = 0,76$), Ca^{2+} e Na^+ ($r = 0,69$), Na^+ e SO_4^{2-} ($r = 0,68$) e c) correlações positivas e negativas baixas e sem significado estatístico Mg^{2+} e Cl^- ($r = 0,37$), Ca^{2+} e Cl^- ($r = 0,29$), SO_4^{2-} e Cl^- ($r = 0,42$) (Tabela 06)

Tabela 06 – Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do sistema aquífero Barreiras durante o período chuvoso.

	CE	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	Na⁺	SO₄²⁻	Cl⁻	NO₃⁻	STD
CE (µS/cm)	1								
K⁺ (mg/L)	-0,28	1							
Mg²⁺ (mg/L)	-0,31	0,98	1						
Ca²⁺ (mg/L)	0,02	0,92	0,89	1					
Na⁺ (mg/L)	-0,50	0,86	0,76	0,69	1				
SO₄²⁻ (mg/L)	-0,12	0,67	0,57	0,80	0,68	1			
Cl⁻ (mg/L)	-0,51	0,53	0,37	0,29	0,87	0,42	1		
NO₃⁻ (mg/L)	-0,62	0,59	0,46	0,35	0,91	0,49	0,98	1	
STD (mg/L)	0,99	-0,33	-0,39	-0,04	-0,48	-0,12	-0,41	-0,54	1

No período seco há mudanças significativas, sem a forte interferência climática, representada pelas fortes chuvas durante o período chuvoso, o fácies hidroquímico

Barreiras passa a apresentar: a) forte correlação positiva entre C.E. e STD ($r = 0,75$), K^+ e C.E. ($r = 0,79$), K^+ e STD ($r = 0,85$), Na^+ e STD ($r = 0,96$), K^+ e Cl^- ($r = 0,91$), Ca^{2+} e Mg^{2+} ($r = 0,87$), Ca^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,99$), Mg^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,91$), Ca^{2+} e NO_3^- ($r = 0,84$), Cl^- e NO_3^- ($r = 0,79$) e SO_4^{2-} e NO_3^- ($r = 0,85$) b) forte correlação negativa entre Mg^{2+} e Na^+ ($r = -0,80$), Ca^{2+} e Na^+ ($r = -0,78$), Na^+ e SO_4^{2-} ($r = -0,74$) c) uma correlação moderada mas não significativa entre Na^+ e K^+ ($r = 0,67$), Na^+ e C.E. ($r = 0,63$), Mg^{2+} e C.E. ($r = -0,67$), Cl^- e C.E. ($r = 0,60$) (Tabela 07).

Tabela 07 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do sistema aquífero Barreiras durante o período seco.

	CE	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	Na⁺	SO₄²⁻	Cl⁻	NO₃⁻	STD
CE (µS/cm)	1								
K⁺ (mg/L)	0,79	1							
Mg²⁺ (mg/L)	-0,67	-0,32	1						
Ca²⁺ (mg/L)	-0,27	-0,07	0,87	1					
Na⁺ (mg/L)	0,63	0,67	-0,80	-0,78	1				
SO₄²⁻ (mg/L)	-0,30	-0,03	0,91	0,99	-0,74	1			
Cl⁻ (mg/L)	0,60	0,91	0,08	0,34	0,31	0,39	1		
NO₃⁻ (mg/L)	0,22	0,47	0,58	0,84	-0,33	0,85	0,79	1	
STD (mg/L)	0,75	0,85	0,69	-0,58	0,96	-0,53	0,56	-0,05	1

No período chuvoso as amostras do sistema Barreiras apresentam uma correlação muito boa entre rNa^+ e rCl^- ($r = 0,87$). Os dados quando plotados num diagrama, alinham-se paralelamente sobre a linha de tendência $rNa^+ = rCl^-$ (Figura 32). Esse comportamento indica uma dissolução de aerossóis marinhos nas águas de recarga. Contudo, a forte correlação no período chuvoso entre o rCl^- e o rNa^+ com o rNO_3^- , sugere que esteja havendo uma contribuição a partir de fossas sépticas (Tabelas 06 e 07). O fato de as amostras se localizarem acima da linha de tendência $rNa^+ = rCl^-$ poderia ser interpretado como um suprimento de sódio adicional proveniente de troca iônica, respaldado pelas correlações negativas com o cálcio e o magnésio no período seco (ausência de recarga).

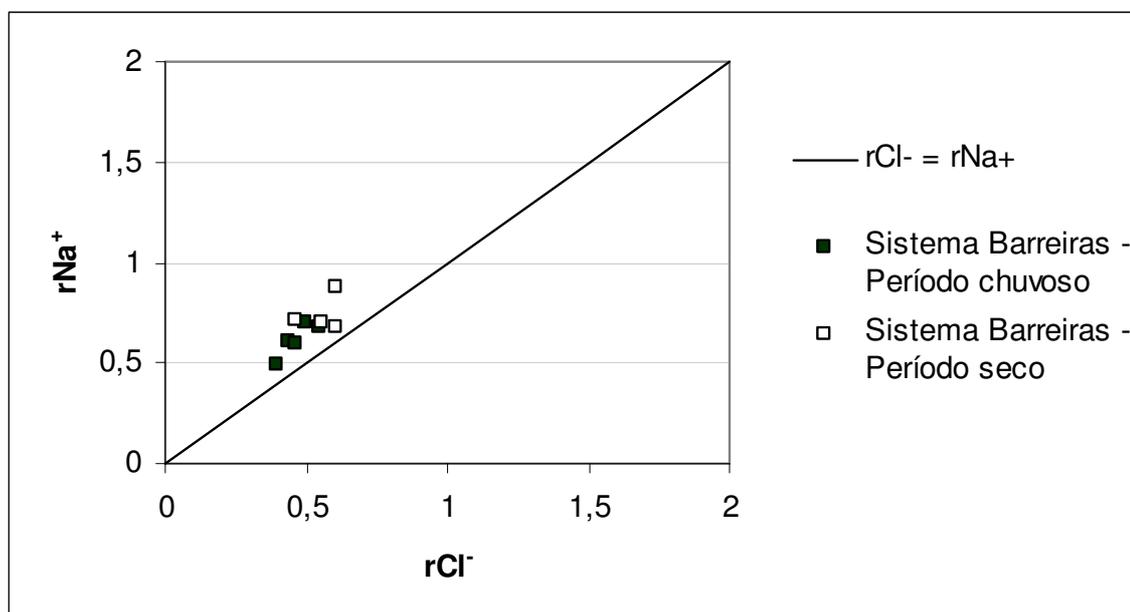


Figura 32: Razão entre sódio e cloreto nas amostras do sistema Barreiras no período chuvoso e seco.

Da mesma forma, a matriz de correlação entre os principais parâmetros químicos e físico-químicos analisados nos poços do sistema Pirabas, durante os dois períodos (seco e chuvoso), mostra valores diferenciados (Tabelas 08 e 09).

Durante o período chuvoso essa fácies hidroquímica é caracterizada por: a) fortes correlações positivas entre K^+ e Mg^{2+} ($r = 0,80$), K^+ e Ca^{2+} ($r = 0,78$), K^+ e Na^+ ($r = 0,73$), K^+ e SO_4^{2-} ($r = 0,85$), Mg^{2+} e Ca^{2+} ($r = 0,91$), Mg^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,90$), Ca^{2+} e Na^+ ($r = 0,76$), Ca^{2+} e SO_4^{2-} ($r = 0,84$), Na^+ e SO_4^{2-} ($r = 0,73$); b) uma correlação moderada mas não significativa entre K^+ e HCO_3^- ($r = -0,59$), K^+ e Cl^- ($r = 0,45$), Mg^{2+} e Na^+ ($r = 0,66$), Mg^{2+} e HCO_3^- ($r = -0,57$), Mg^{2+} e Cl^- ($r = 0,36$), Ca^{2+} e HCO_3^- ($r = -0,45$), Ca^{2+} e Cl^- ($r = 0,29$), Na^+ e HCO_3^- ($r = -0,45$), Na^+ e Cl^- ($r = 0,56$), SO_4^{2-} e HCO_3^- ($r = -0,53$), SO_4^{2-} e Cl^- ($r = 0,50$), Cl^- e HCO_3^- ($r = -0,38$).

No período seco a correlação entre os íons é fortemente modificada, só existe correlação significativa entre o Ca^{2+} e o Mg^{2+} ($r = 0,80$) os demais valores de (r) são baixos e não significativos.

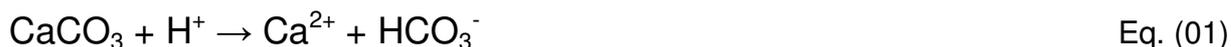
Tabela 08 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do Sistema Aquífero Pirabas durante o período chuvoso.

	<i>CE</i>	<i>K⁺</i>	<i>Mg²⁺</i>	<i>Ca²⁺</i>	<i>Na⁺</i>	<i>SO₄²⁻</i>	<i>HCO₃⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>STD</i>
<i>CE</i> (µS/cm)	1								
<i>K⁺</i> (mg/L)	-0,20	1							
<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	-0,15	0,79	1						
<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	-0,01	0,78	0,91	1					
<i>Na⁺</i> (mg/L)	-0,04	0,73	0,66	0,76	1				
<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	-0,15	0,84	0,89	0,84	0,73	1			
<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)	-0,01	-0,59	-0,57	-0,44	-0,43	-0,53	1		
<i>Cl⁻</i> (mg/L)	-0,37	0,59	0,49	0,47	0,80	0,63	-0,37	1	
<i>STD</i> (mg/L)	0,63	-0,18	0,09	0,22	-0,04	-0,04	0,03	-0,40	1

Tabela 09 - Matriz de correlação dos principais parâmetros hidroquímicos do Sistema Aquífero Pirabas durante o período seco.

	<i>CE</i>	<i>K⁺</i>	<i>Mg²⁺</i>	<i>Ca²⁺</i>	<i>Na⁺</i>	<i>SO₄²⁻</i>	<i>HCO₃⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>STD</i>
<i>CE</i> (µS/cm)	1								
<i>K⁺</i> (mg/L)	0,09	1							
<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	-0,07	0,67	1						
<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	-0,03	0,62	0,80	1					
<i>Na⁺</i> (mg/L)	-0,01	0,48	0,38	0,55	1				
<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	-0,38	-0,40	-0,62	-0,58	-0,27	1			
<i>HCO₃⁻</i> (mg/L)	0,17	0,24	0,28	0,40	0,13	-0,15	1		
<i>Cl⁻</i> (mg/L)	-0,24	-0,34	-0,60	-0,51	0,07	0,63	-0,48	1	
<i>STD</i> (mg/L)	0,72	0,50	0,40	0,31	0,27	-0,54	0,24	-0,36	1

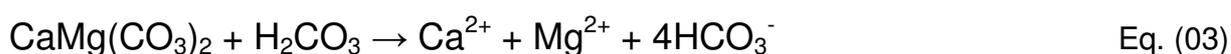
Devido à presença de calcário integrando os aquíferos do sistema Pirabas, tem-se naturalmente a dissolução de calcita durante o período chuvoso e seco. A Figura 33 mostra as concentrações de cálcio versus bicarbonato, em meq/L, e as funções $rCa^{2+} = rHCO_3^-$ e $rCa^{2+} = 2rHCO_3^-$, que representam os limites de dois processos possíveis de dissolução da calcita. O primeiro produzindo águas com razão de 1:1 entre os íons Ca^{2+} e HCO_3^- , dado pela reação:



e o segundo produzindo águas com razão 1:2, dado pela reação:



A dissolução da calcita aumenta o pH e a concentração de bicarbonato, explicando a predominância de águas bicarbonatadas e o pH médio de 7,3 no sistema aquífero Pirabas. A Formação Pirabas possui rochas carbonáticas parcialmente dolomitizadas. A dissolução dessa dolomita, além da calcita, poderia ser descrita pela equação:



O efeito da dissolução de calcita e dolomita pode ser visualizado no diagrama das Figuras 33 e 34. As águas do sistema aquífero Pirabas mostram uma forte contribuição de cálcio oriundo da dissolução da calcita e há bicarbonato adicional, aparentemente proveniente de reações de troca com o sódio adsorvido nas argilas esmectíticas das margas e folhelhos da formação Pirabas.

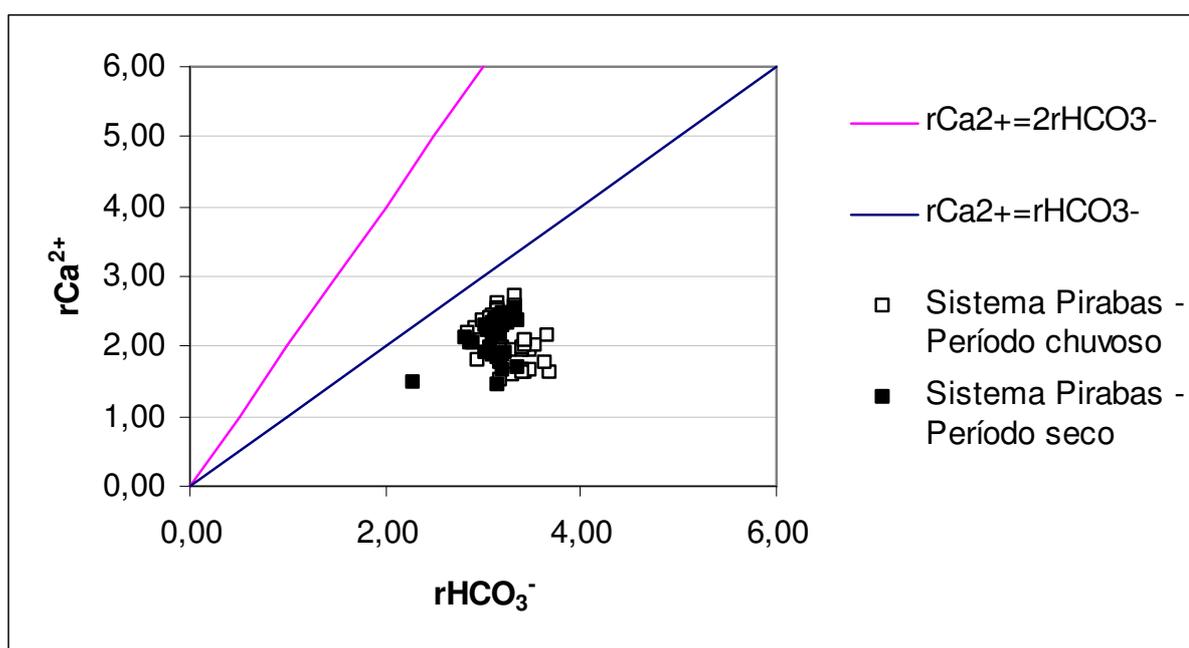


Figura 33: $r\text{Ca}^{2+}$ x $r\text{HCO}_3^-$ das amostras do sistema aquífero Pirabas nos períodos seco e chuvoso.

Segundo Thorstenson *et al.*, (1979)⁵ e Henderson (1985)⁶ *apud* Pereira *et al.*, (2004) quando da dissolução de calcita, o cálcio trocável com o sódio das argilas, produz uma elevação de sódio e de bicarbonato na água de acordo com a reação:



Onde, X representa os argilominerais. Em águas subterrâneas saturadas em calcita, a produção, dos íons cálcio e magnésio, ocorre devido à dissolução desproporcional de dolomita. Desta forma, os íons derivados desta dissolução tanto precipitam como calcita como também participam dos processos de troca com sódio, de acordo com a reação global:



As amostras do sistema Pirabas, tanto no período seco como no chuvoso não apresentam indícios de dissolução de dolomita, dispõem-se alinhadas fora da função $r\text{Mg}^{2+} = r\text{Ca}^{2+}$ (Figura 34)

⁵ THORSTENSON, D.C., FISHER, D.W., CROFT, M.G. 1979. The geochemistry of the Fox Hills-basal hell creek aquifer in Southwestern North Dakota and Northwestern South Dakota. Water Resour. Res. 15, 1479 – 1498.

⁶ HENDERSON, T. 1985. Geochemistry of ground water in two sandstone aquifer systems in the Northern great plains in parts of Montana and Wyoming. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 1402-C, 84 p.

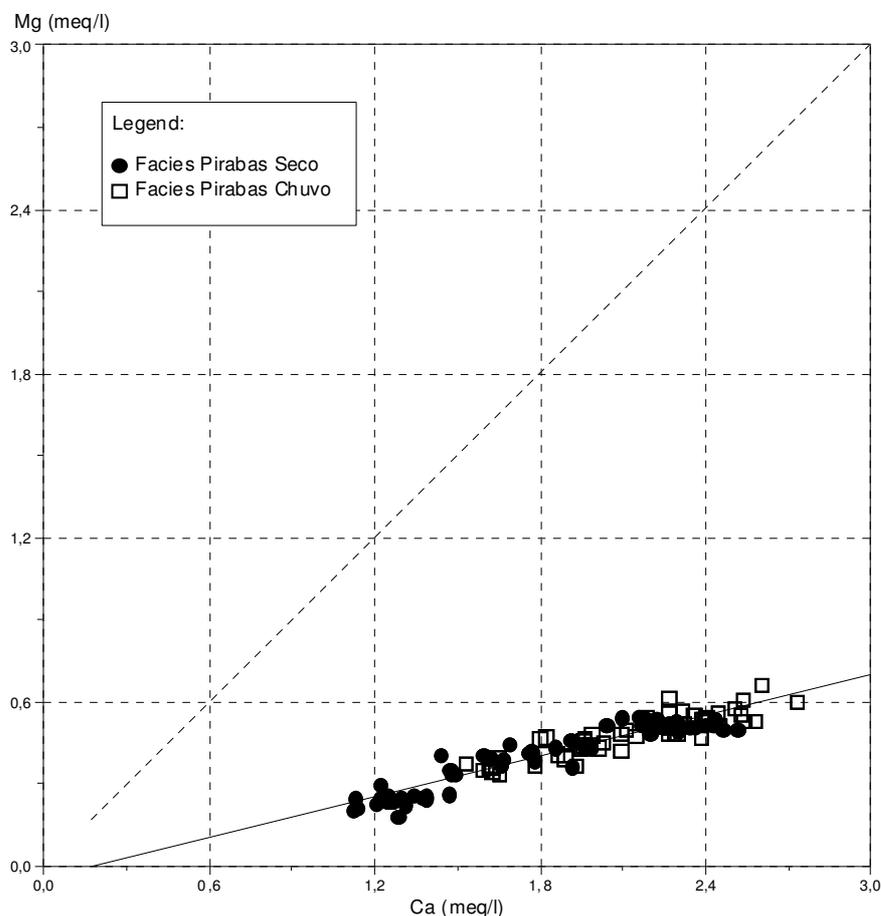


Figura 34: rMg^{2+} vs. rCa^{2+} nas amostras do aquífero Pirabas nos períodos seco e chuvoso.

Os índices de saturação da calcita foram calculados para as amostras do sistema Pirabas no período seco (agosto 2007) e no chuvoso (fevereiro 2007) (Figura 35). Os valores obtidos mostram subsaturação com respeito a calcita e dolomita, havendo uma excelente correlação entre ambos ($R^2 = 0,996$). Os aquíferos do sistema Pirabas estão encaixados entre calcários da formação homônima, e, portanto, deveriam produzir águas saturadas com respeito à calcita e dolomita, como acontece nos aquíferos da Formação Itapecuru (Pereira *et al.*, 2004). A subsaturação, portanto, poderia ser explicada por um curto tempo de residência, que segundo Langmuir (1971) não permitiria que o equilíbrio com o carbonato fosse alcançado; ou, como acreditamos ser

mais provável, essa subsaturação poderia ser explicada através de misturas entre dois tipos diferentes de águas.

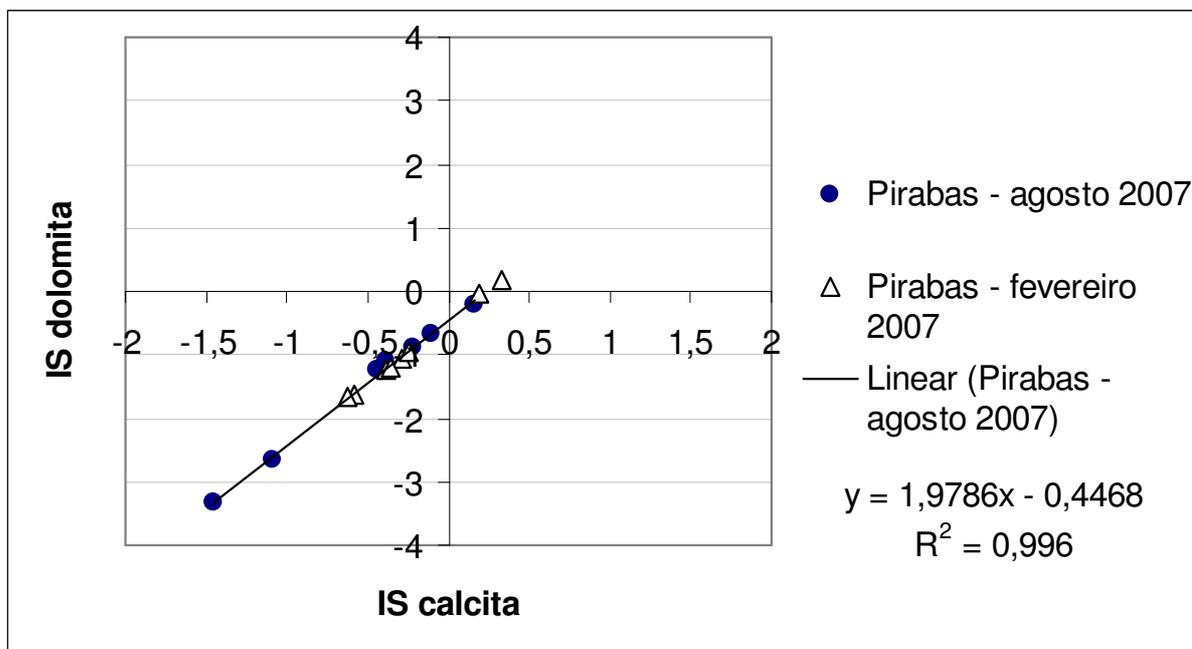


Figura 35: Correlação entre os índices de saturação da calcita (ISC) e dolomita (ISD) nas amostras do aquífero Pirabas no período seco e no período chuvoso.

8.3 CONECTIVIDADE HIDRÁULICA x MISTURA DE ÁGUAS

A conectividade hidráulica é uma premissa básica na construção de caminhos (flow paths) da água subterrânea, no cálculo de velocidade do fluxo e no cálculo do tempo de deslocamento (travel time) e idade da água (Mazor, 2004). A água subterrânea flui ao longo de gradientes hidráulicos que é deduzido a partir dos dados de carga hidráulica obtidos a partir de medidas em poços ou fontes. Esses gradientes são válidos somente se os poços medidos estão interconectados hidráulicamente (Mazor, op. cit.). Em outro caso a água subterrânea é assumida fluir em aquíferos não confinados e confinados descritos como dutos contínuos e efetivos, baseados em configurações geologicamente deduzidas. Contudo, os dados geológicos são fragmentados e freqüentemente baseados em mapeamentos e dados estratigráficos.

Métodos independentes são necessários para averiguar a hipótese da conectividade hidráulica.

Existem essencialmente duas fontes de cloreto para a água subterrânea: (i) aerossol marinho na forma de sais atmosféricos (*airborne*) e (ii) dissolução de halita em casos limitados onde o mineral está presente em rochas. O cloreto é um íon conservativo, ou seja, ele não participa nas interações de troca iônica rocha-água subterrânea, e, uma vez que ele entra na água subterrânea não existe nenhum processo capaz de removê-lo (Mazor, 2004).

A água que entra em contato com halita a dissolve rapidamente e em dias torna-se saturada, podendo alcançar concentrações de cloreto de mais de 180.000 mg/L. As águas subterrâneas comuns contêm cloreto numa faixa de concentração entre 10 e 1.000 mg/L e são, portanto, subsaturadas com respeito à halita, indicando que a fonte de cloreto na água subterrânea é atmosférica e sua concentração é controlada fortemente pela quantidade de água perdida por evapotranspiração antes de entrar na zona saturada (Mazor, 2004).

Na zona saturada a concentração do cloreto permanece constante a menos que misturas de diferentes águas ocorram. Se a concentração de cloreto decresce ao longo de uma direção de fluxo pré-determinada, isso indica que o caminho do fluxo (*flow path*) sugerido pelo modelo não é válido, já que não existe nenhum processo que seja capaz de reduzir a concentração de cloreto. Em tais casos, a hipótese de interconexão hidráulica entre poços que drenam o mesmo corpo de água está errada. Essa interpretação também vale para um aumento abrupto na concentração. Certas fontes são alimentadas por misturas de águas a partir de aquíferos profundos que ascendem ao longo de falhamentos e águas de aquíferos rasos. As águas resultantes de misturas possuem diferentes composições e as taxas de misturas variam sazonalmente.

Num mesmo aquífero, a água pode sofrer mudanças na sua composição química por processos de concentração, troca de bases, redução de sulfatos, tempo de residência, diferentes profundidades e variações climáticas (Giampá & Gonçalves, 2006). Segundo Mazor (2004), modelos baseados em observações geológicas não têm como indicar o número de águas presentes envolvidos no sistema.

Em maiores profundidades, as águas circulam mais lentamente, aumentando a concentração de sais. A pressão e a tensão de CO_2 são maiores, permitindo um ataque mais intenso dos carbonatos e mesmo dos silicatos. Assim, a composição química da água dependerá dos processos físicos-químicos-biogeoquímicos que acontecem no sistema de fluxo (Giampá & Gonçalves, 2006)

Quando duas águas de diferente composição se misturam, forma-se uma zona de transição entre elas que pode promover precipitações químicas. É o caso de uma água com teor elevado de Ca^{2+} que precipita CaCO_3 ou CaSO_4 presente em outra água.

Na relação entre a química da água e os vários fatores ambientais, é difícil generalizar como e quais dos fatores serão mais importantes em uma situação específica. Além do tipo de rocha e das condições climáticas, outras influências devem ser consideradas, tais como tipo de relevo, vegetação e tempo de contato rocha-água, tudo isso associado às condições hidrológicas locais (Giampá & Gonçalves, 2006).

As relações iônicas podem indicar certo relacionamento com o litotipo do qual a água se origina, indicar a ação de fenômenos modificadores ou indicar uma característica específica da água considerada.

Souza (1996) em sua pesquisa sobre o quimismo das águas na região nordeste do Pará observou que em alguns poços perfurados em rochas da Formação Pirabas os resultados obtidos de pH e condutância específica estavam abaixo dos normalmente encontrados em áreas com predominância de calcários, levando a conclusão de que tais valores são indicativos de mistura com águas ácidas que circulam nos níveis superiores do perfil onde predominam os sedimentos Barreiras.

Matta (2002) estudou o arranjo geométrico de aquíferos do sistema Pirabas e Barreiras, aventando duas interpretações para explicar as discontinuidades observadas: 1) os aquíferos são descontínuos por influência do ambiente deposicional que favorece depósitos lenticulares de areia, e 2) a discontinuidade entre as camadas poderia ser explicada por sistemas de falhamento normal. Costa (2004) testou a segunda hipótese de Matta (op. cit.) em seu estudo sobre a influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na região metropolitana de Belém, e, demonstrou que o arranjo estabelecido para os aquíferos está relacionado diretamente

com a questão da recarga. Ele mostrou que as falhas normais se instalaram na direção perpendicular à direção de estiramento da Bacia Pirabas - Barreiras (NW-SE) e dessa maneira, sendo as falhas normais as superfícies potenciais de menor pressão, elas se constituem num dos locais mais favoráveis para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas.

Se a interpretação de Costa (op. cit.) é verdadeira e a recarga se dá através de falhas, elas podem também se responsáveis pela comunicação hidráulica entre os sistemas aquíferos e, portanto, responsáveis por misturas entre os dois tipos distintos de fácies hidroquímicas.

Segundo Mazor (2004), quando plotamos as concentrações dos parâmetros químicos das águas subterrâneas em diagramas de composição, padrões de mistura de águas podem ser revelados, ou seja, os diagramas de composição fornecem uma forma prática para visualmente expressar amplas quantidades de dados, complementando os diagramas padrões.

Por ser um elemento conservativo, o cloreto é um bom indicador de misturas de águas. Em condições favoráveis, as concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero (Schölller, 1962 *apud* Fenzl, 1986).

Segundo Mazor (2004), as águas de um aquífero confinado quando plotadas num diagrama de composição usando na abscissa um elemento ou parâmetro conservativo deveriam agrupar indicando a presença de apenas um tipo de água. Se, ao contrário, essas amostras se dispuserem na forma de uma linha, existe então a presença de uma mistura com um segundo tipo de água, e, o alinhamento dos pontos representa uma linha de mistura.

Para avaliarmos a hipótese de conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas por falhas apresentada por Costa (2004), as concentrações dos principais cátions foram avaliadas contra as concentrações do íon cloreto e contra o parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD) em diagramas de composição e diagramas tipo Schölller (fingerprint) a seguir apresentados.

Durante tanto o período chuvoso quanto o período seco os diagramas de $Na \times Cl$, apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 36). A maioria das amostras

dos poços profundos estudados (Sistema Pirabas) apresentou uma distribuição dispersa, sugerindo que haja realmente mistura entre dois tipos de água. Esse alinhamento é observado mais claramente durante o período chuvoso, quando a recarga dos sistemas aquíferos é maior. A relação entre a concentração do sódio com o cloro é positiva, o que implica que uma das águas deve ser enriquecida nesses dois elementos, que é o caso das águas do sistema Barreiras, já descritas anteriormente.

Quando plotamos os valores das águas do sistema Barreiras conjuntamente com as águas do sistema Pirabas, usando agora uma escala logarítmica, percebe-se então que realmente a linha de mistura existe e que a proporção da água sódica cloretada deve ser pequena no período seco, quando a recarga é muito baixa, aumentando no período chuvoso quando o alinhamento é bem nítido (Figura 37).

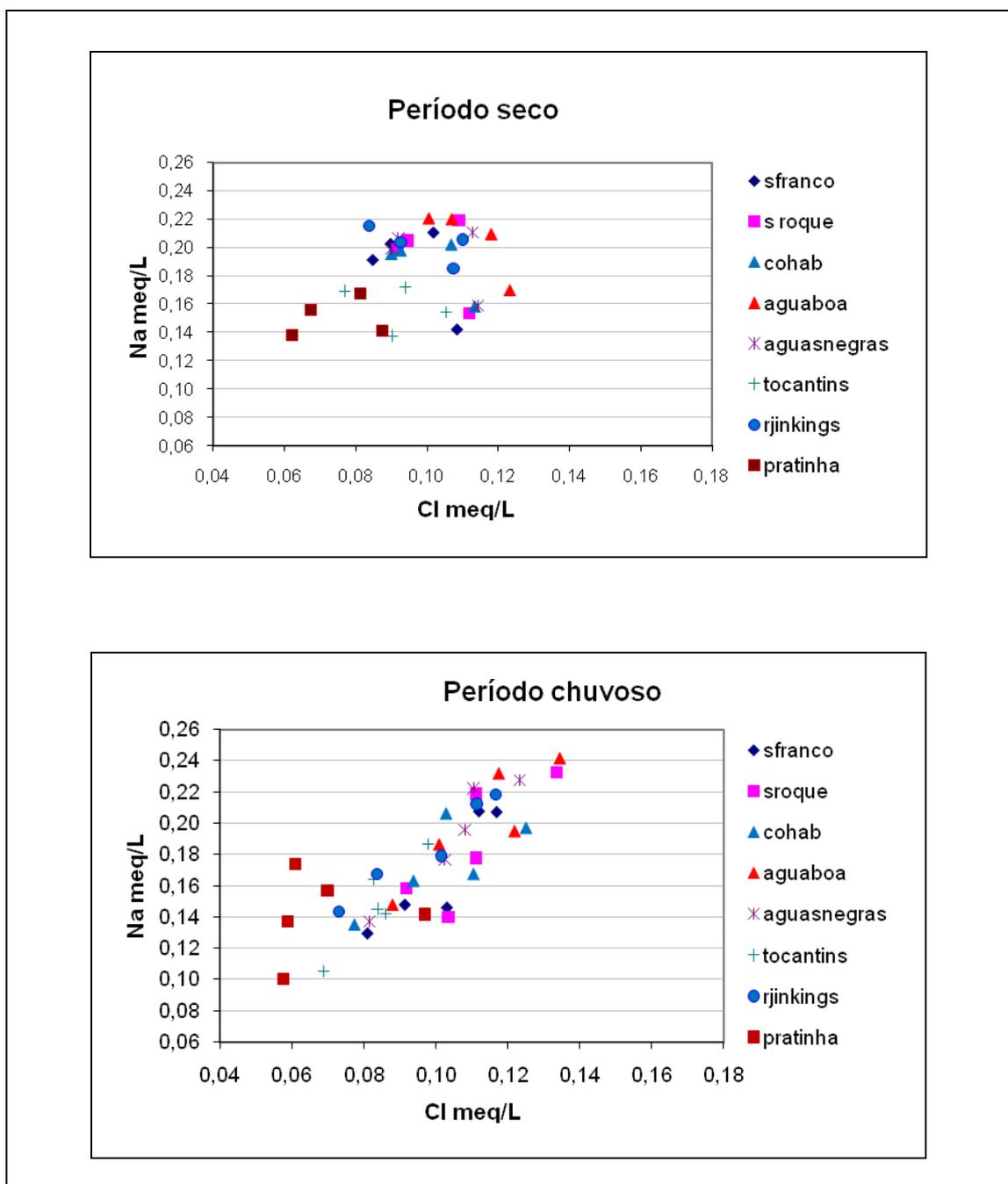


Figura 36: Diagramas de composição Na x Cl (período seco e período chuvoso) para as amostras dos poços tubulares profundos (Sistema Pirabas).

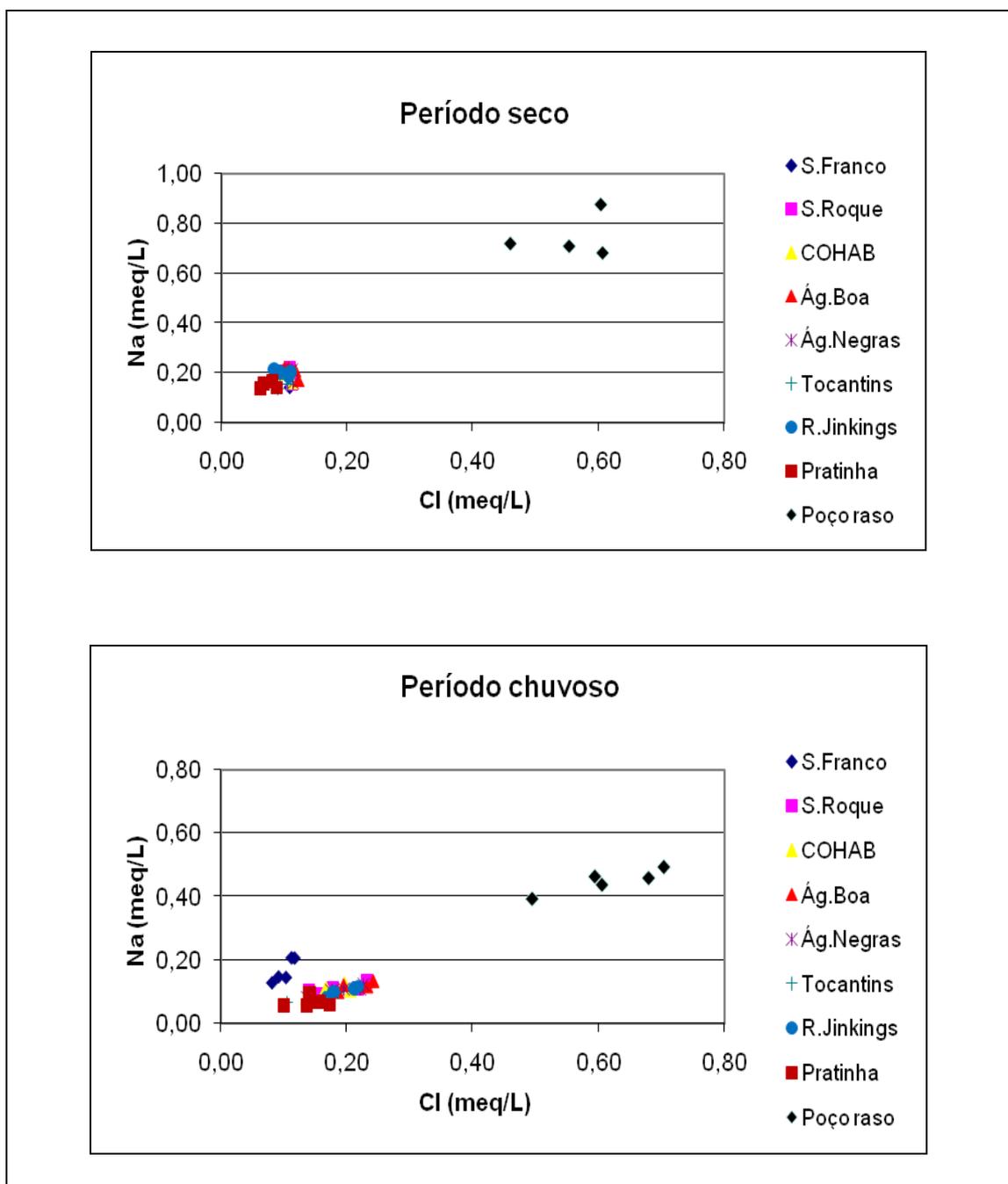


Figura 37: Diagramas de composição Na x Cl. Notar o alinhamento existente entre as águas do sistema Barreiras e as águas do sistema Pirabas.

Os diagramas de Ca x STD e Mg x STD apresentaram uma correlação positiva entre os dois sistemas aquíferos e mostram nitidamente a distribuição ao longo de uma linha de mistura para os poços do sistema Pirabas. O deslocamento observado nos diagramas mostrando que a linha não passa na origem (valor 0) e sim extrapola cortando um ponto no eixo STD, indica que o tipo de água menos concentrada em cálcio e magnésio possui concentrações significativas de outros íons, no caso estudado o sódio (Figura 38 e Figura 39).

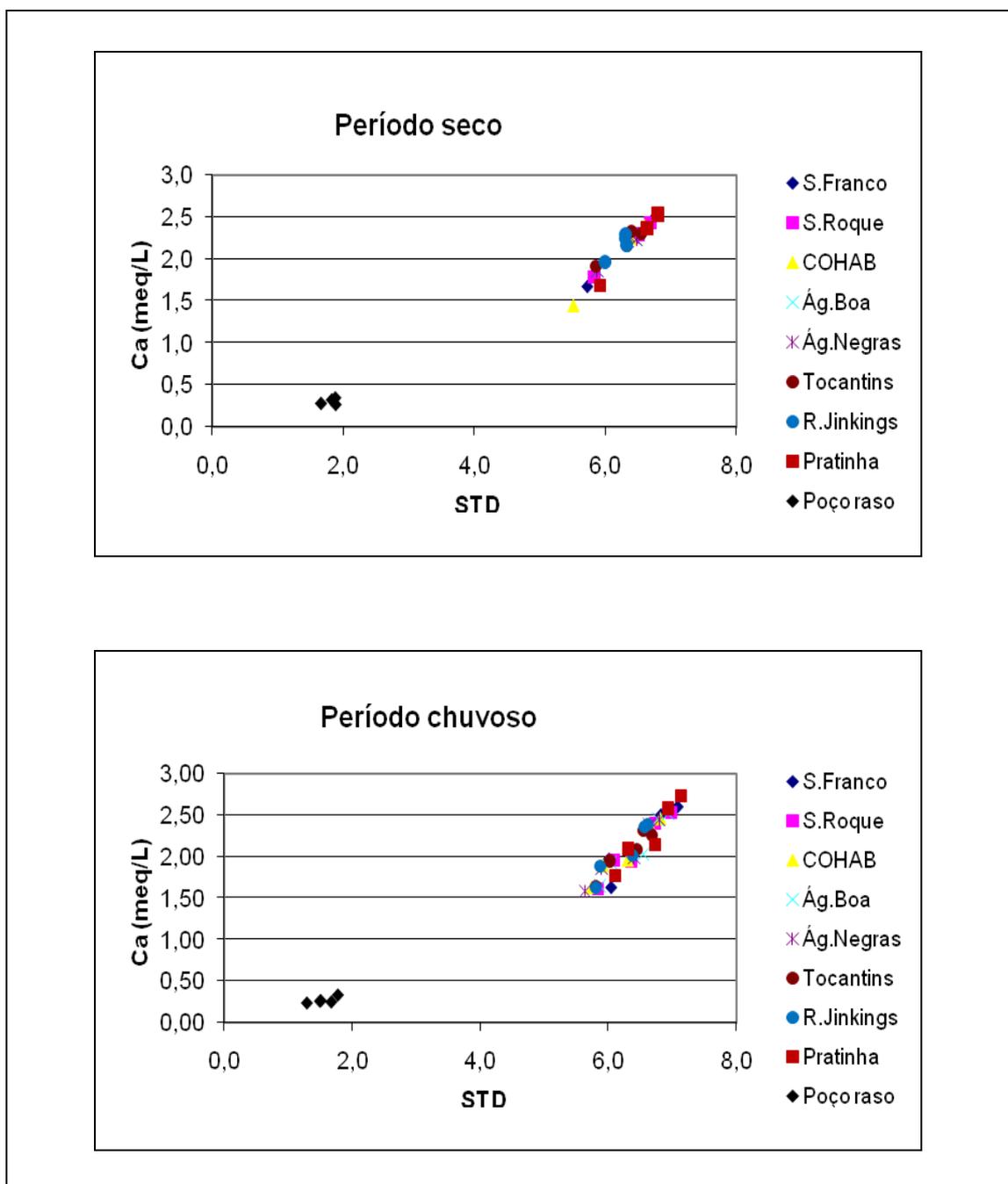


Figura 38: Diagramas de composição Ca x STD. Notar a boa correlação positiva entre os dois sistemas aquíferos e a disposição dos poços do aquífero Pirabas ao longo de uma linha de mistura.

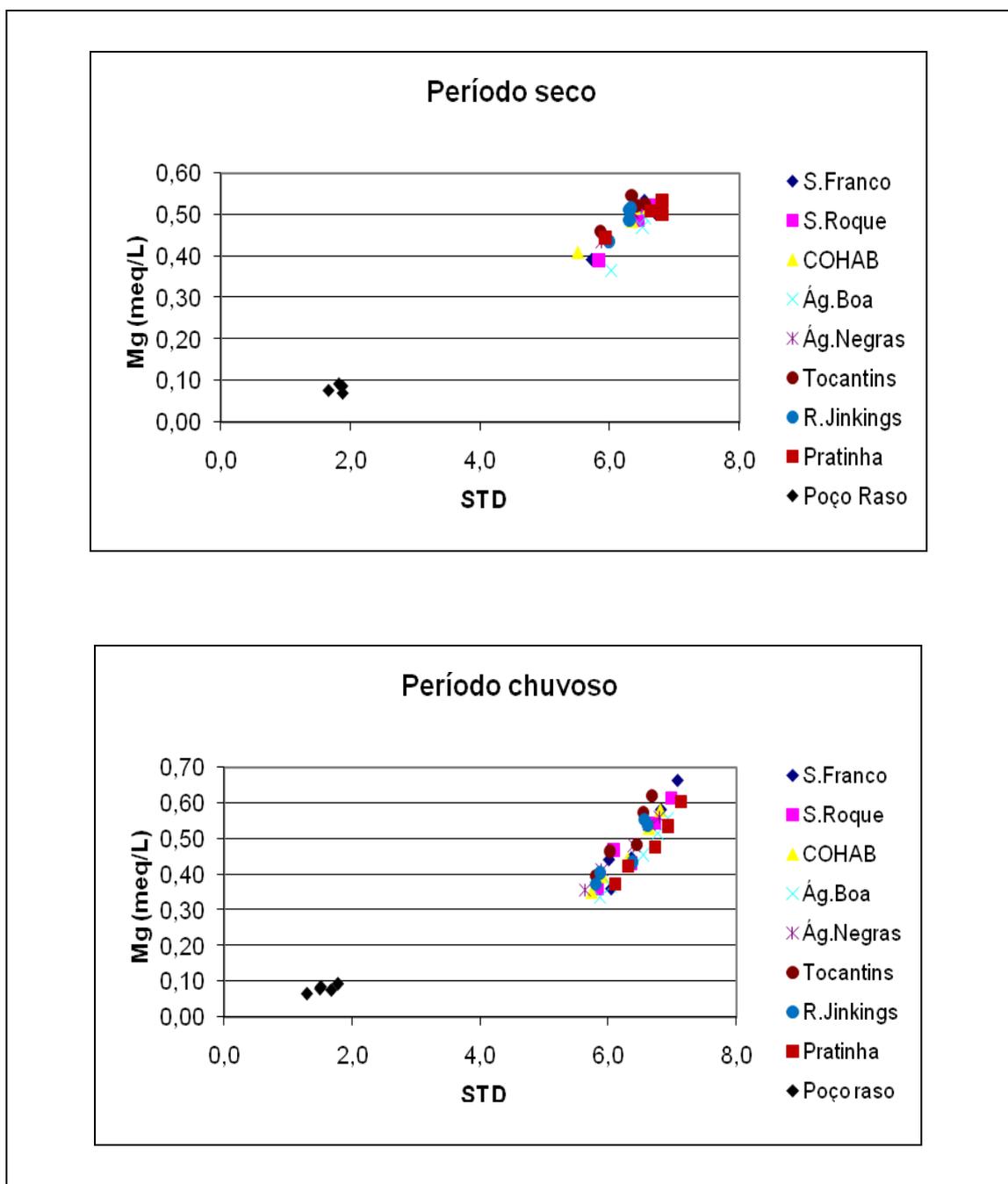


Figura 39: Diagramas de composição Mg x STD. Notar a boa correlação positiva entre os dois sistemas aquíferos e a disposição dos poços do aquífero Pirabas ao longo de uma linha de mistura

A quantidade de cloreto nas águas naturais, em geral, está associada ao sódio. A ocorrência deste íon na água está associada a intrusões salinas em zonas costeiras, passagem da água por rochas sedimentares formadas em ambientes marinhos, infiltração de água e lixiviação de solos em ambientes de clima árido, solubilização de depósitos de halita ou outro evaporito, além de aerossóis marinhos (Hind, 1999⁷ *apud* Muller, 2007). Nos sistemas aquíferos estudados o cloreto está nitidamente associado a águas de chuva influenciadas por aerossóis marinhos, já que se desconhece a presença de minerais e rochas evaporíticas nas rochas que compõem a coluna estratigráfica da área estudada.

Em ambos os períodos observou-se que todas as amostras do sistema aquífero Pirabas apresentaram uma nítida variação em suas concentrações de cloreto. Como os sistemas aquíferos estudados têm uma assinatura característica e o cloreto é um íon conservativo, a dispersão das amostras demonstra que as águas estudadas são realmente águas de misturas. Tal fato corrobora a hipótese de Costa (2004), de que os aquíferos estejam sendo recarregados como revela o padrão de comportamento apresentado nos diagramas de composição dos principais elementos presentes nas águas estudadas.

Outra forte evidência de que há misturas é apontada pelo diagrama de Schöller (Figura 40). Ele mostra um padrão típico de misturas, já que se têm as amostras dos poços desenhando linhas paralelas (leque). Se fosse apenas um tipo de água, as linhas estariam aproximadamente sobrepostas e o padrão seria outro (Figura 41).

⁷ HIND, E. C. 1999. Caracterização hidroquímica e hidrogeológica das fontes cársticas das bacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e da Onças – Colombo, PR. Curitiba, 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

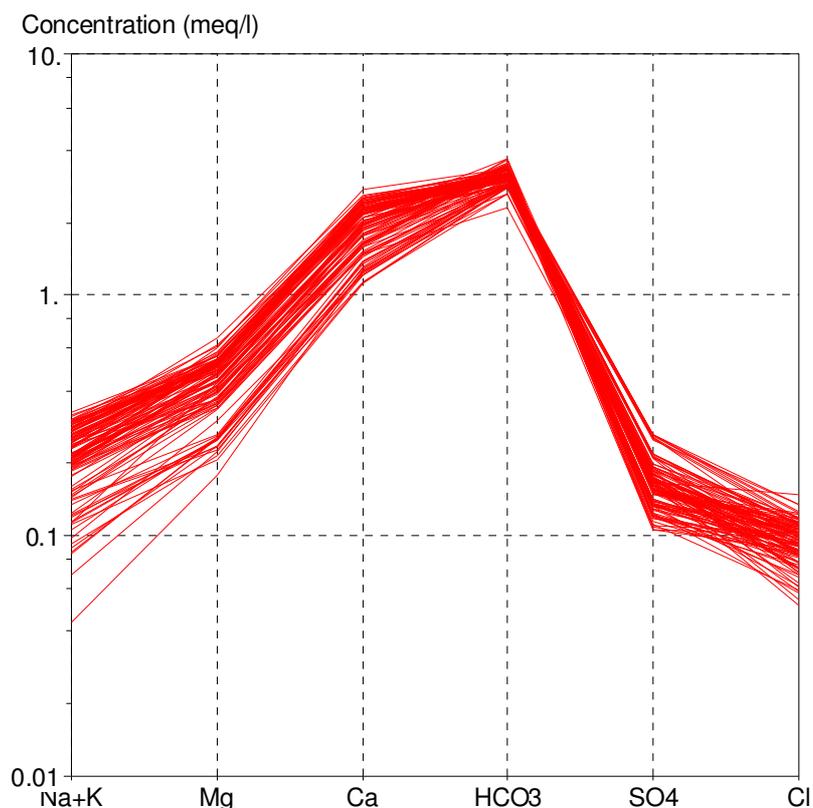


Figura 40: Diagrama Schöller (fingerprint) mostrando a distribuição em leque, típica de mistura entre duas águas. Dados apenas dos poços que captam águas do sistema Pirabas.

Devido o modelamento hidrogeoquímico identificar os processos responsáveis pelos fácies hidroquímicos observados, quais as condições presentes e a intensidade com que os referidos processos atuaram nas águas, é largamente utilizado em estudos hidroquímicos para representar os sistemas convencionais de águas subterrâneas.

Utilizando-se o software Aquachem vs. 3.70 foi possível fazer o modelamento geoquímico no sentido de avaliar a percentagem das misturas entre as águas. Para tal, tomou-se a água com menor concentração de sódio e cloro e assumiu-se ser a água representativa do sistema Pirabas (sem mistura), e, em seguida, tomou-se a média dos valores obtidos para o poço raso como representativa do sistema Barreiras (Tabela 10)

Tabela 10 - Características hidroquímica das amostras de água subterrâneas utilizadas na modelagem e valores obtidos para as misturas. Valores das concentrações dos íons em meq/L.

Amostra	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Sistema Barreiras	4,13	5,465	0,847	20,122	24,181	2,888
Sistema Pirabas	7,48	26,24	2,717	1,099	1,817	7,799
Mix 10%	5,128	24,163	2,53	3,001	4,054	7,308
Mix 20%	4,828	22,085	2,343	4,904	6,29	6,817
Mix 30%	4,652	20,008	2,156	6,806	8,527	6,326
Mix 40%	4,528	17,93	1,969	8,708	10,763	5,835
Mix 50%	4,431	15,853	1,782	10,61	12,999	5,344

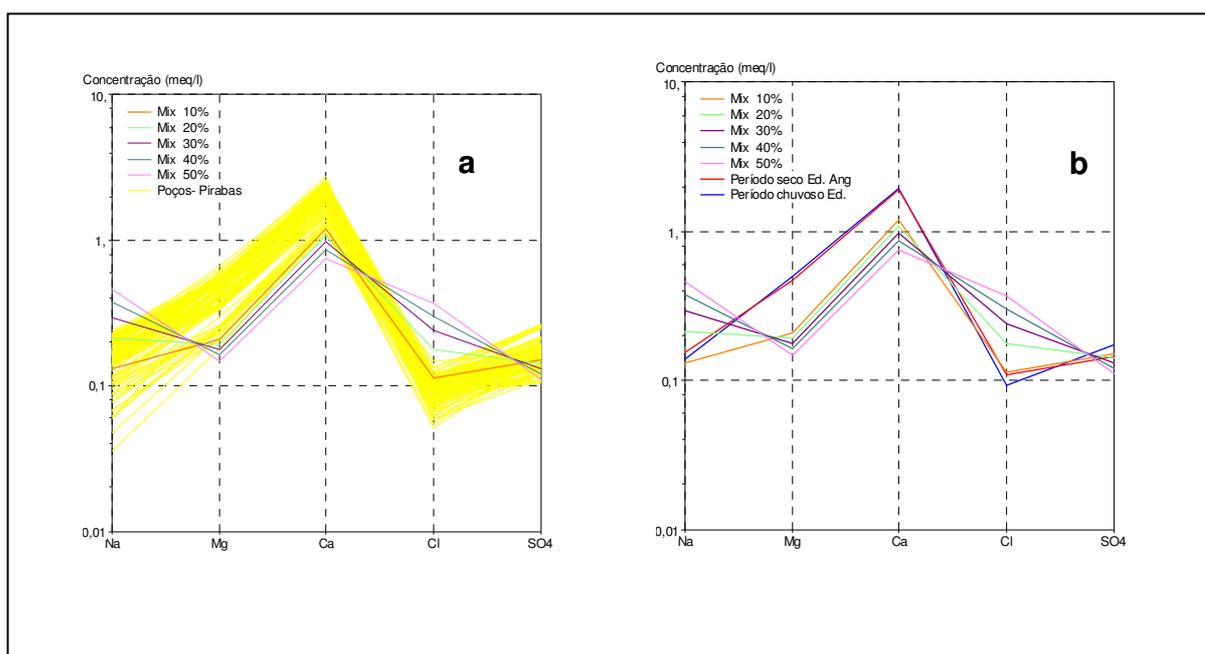


Figura 41: Modelagem geoquímica com o software Aquachem vs. 3.7. Notar que as amostras do poço Eduardo Angelim se aproximam bastante dos valores modelados para misturas com 10% de águas do sistema Barreiras.

O modelamento apresentado na figura 41a sugere que a mistura entre os dois sistemas aquíferos provavelmente está entre 5 e 10 % de águas do sistema Barreiras.

8.4 MAPAS GEOQUÍMICOS

Para a confecção de mapas hidroquímicos fez-se inicialmente um tratamento estatístico dos resultados das análises químicas. Na análise estatística dos resultados adotou-se a metodologia de *Krigagem* com o objetivo de tornar mais precisa a interpolação espacial das variáveis estudadas. Este é um processo de estimação de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes conhecidos, sendo considerados como independentes pelo semi-variograma (Landim, 1998). A interpolação dos valores medidos no campo para toda a área de estudo foi feita com base no estimador de krigagem simples que acompanha o Software SURFER 8.0. Utilizou-se um modelo linear, embora não tenham sido calculados os parâmetros estruturais do variograma, que definem a variabilidade espacial do fenômeno.

Nesta avaliação foram considerados os resultados das análises químicas das amostras selecionadas, que incluem sólidos totais dissolvidos; os cátions sódio, cálcio, magnésio e os ânions cloreto, sulfato e bicarbonato.

Estes mapas caracterizam-se pela presença de isolinhas que correspondem a linhas de mesmo teor do *background* acrescido de alguns desvios padrões, dependendo da amplitude da população analisada. Permitem, no caso de água subterrânea, a visualização rápida das variações espaciais das características químicas de um aquífero.

Foram construídos mapas hidrogeoquímicos com os principais elementos encontrados no fácies hidroquímico que representa o sistema aquífero Pirabas.

Inicialmente apresentaremos os mapas hidroquímicos dos principais parâmetros químicos do fácies hidroquímico característico do sistema Pirabas. Vamos assumir com base nas observações anteriores que, na área estudada, os aquíferos do sistema Pirabas estão em comunicação hidráulica entre si.

O mapa hidroquímico do parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD) mostra um interessante padrão (Figura 42). Tanto no inverno quando no verão o poço Eduardo Angelim mostra valores inferiores de STD e as isolinhas mostram um padrão circular e levemente “achatado” na direção E-W. Os valores mais baixos desses parâmetros confirmam uma mistura. Se não houvesse comunicação hidráulica entre os dois

sistemas o mapa deveria mostrar um padrão de isolinhas com variações muito pequenas, o que não acontece. O padrão observado sugere que na área do poço Eduardo Angelim haja comunicação hidráulica entre os dois sistemas, que pode ter uma origem geológica, como sugere Costa (2004), entretanto, não deve ser descartado inteiramente a possibilidade de o resultado ser resultado da má construção do poço.

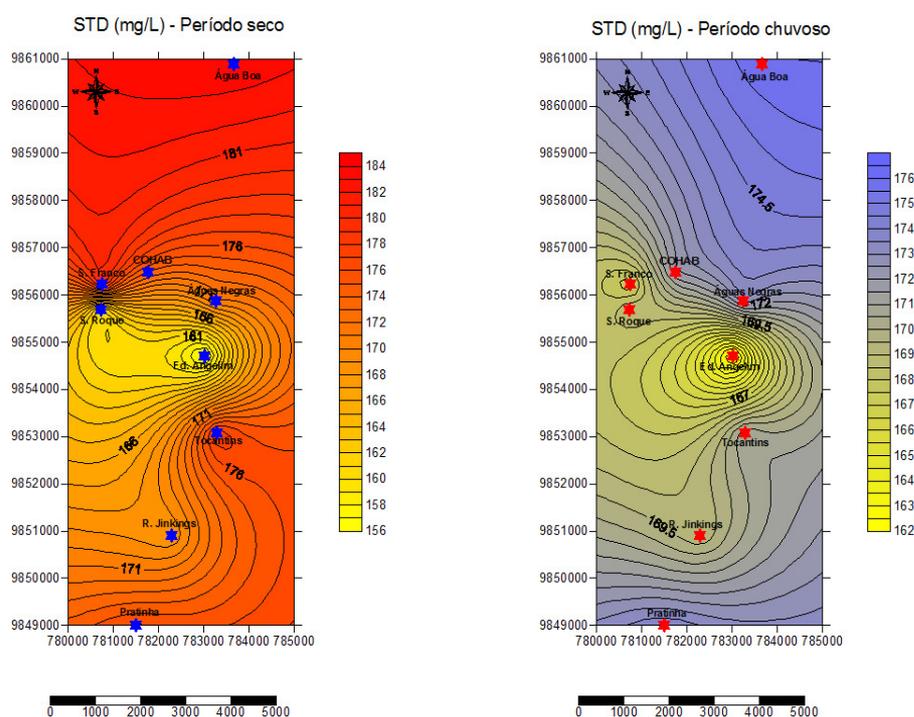


Figura 42: Mapas hidroquímicos do parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD). Notar aos baixos valores encontrados no poço Eduardo Angelim.

Entretanto, Costa (2004) indica em seus mapas que há uma falha passando nas proximidades do poço Eduardo Angelim.

Os mapas hidrogeoquímicos da concentração de sódio, cálcio, cloreto, e bicarbonato para o período seco revelam também um menor nível de concentração no poço Ed. Angelim (Figura 43, 44, 45 e 46).

No período seco, como a recarga é baixa ou inexistente a comunicação hidráulica entre os dois sistemas aquíferos no poço Eduardo Angelim faz com que esse poço influencie de forma homogênea os poços nas suas proximidades, portanto, as linhas de isoteor têm uma forma circular. No inverno (abril/2007), quando a recarga é

máxima, as concentrações de Na e Ca são menores e mostram um maior afastamento entre elas (Figura 43 e 44).

O mapa hidrogeoquímico da concentração de sódio para o período seco, revela o menor nível de concentração no poço Ed. Angelim. As linhas de isoteor se fecham em volta do poço Eduardo Angelim, determinando um comportamento anômalo. Observa-se que os poços Ág. Boa e S. Roque mostraram as concentrações de sódio mais elevadas e os demais poços apresentaram uma concentração levemente inferior. No período chuvoso, esse elemento mostra um comportamento diferente. O poço Ed. Angelim mostrou mais uma vez o menor nível de concentração e os demais poços apresentaram leve diminuição na concentração de sódio.

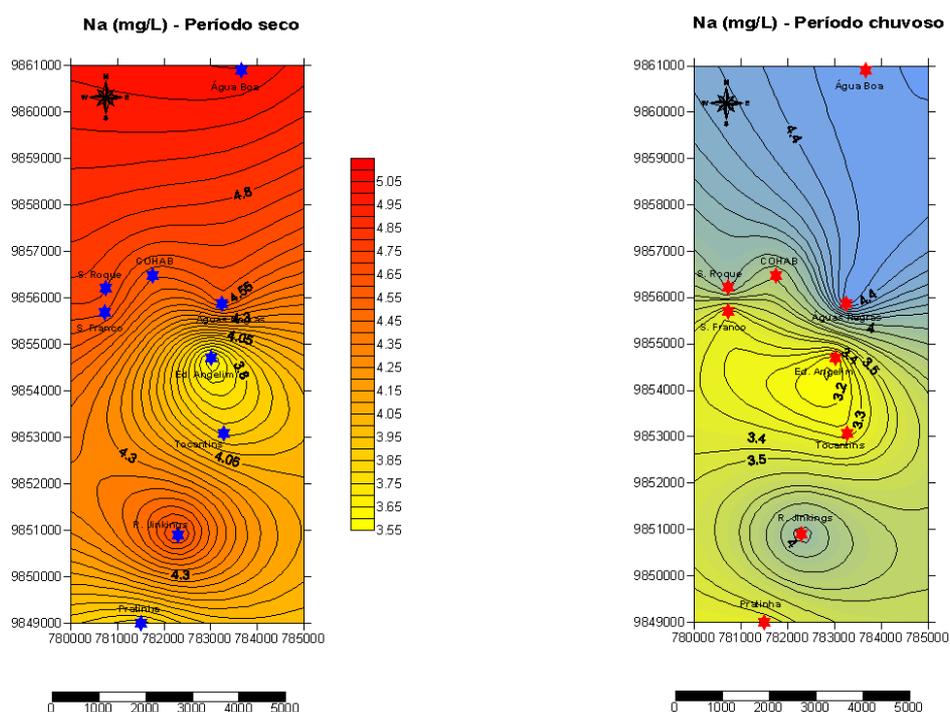


Figura 43: Mapas hidroquímicos da distribuição do sódio nos poços do sistema Pirabas.

O mapa hidrogeoquímico da concentração de cálcio para o período seco revela analogamente ao mapa da concentração do sódio a menor concentração desse elemento no poço Ed. Angelim (Figura 44). As linhas de isoteor se fecham em volta do poço Eduardo Angelim, determinando um comportamento anômalo. Observa-se que os poços Ág. Boa, Pratinha e S. Roque mostraram as concentrações de cálcio mais elevadas e os demais poços apresentaram uma concentração levemente superior a menor concentração no poço Ed. Angelim, mas também surgem valores mais baixos no poço Tocantins e Ág. Negras. No período chuvoso, esse elemento mostra um comportamento diferente. O poço Ed. Angelim mostrou mais uma vez o menor nível de concentração e os demais poços apresentaram leve diminuição na concentração de cálcio.

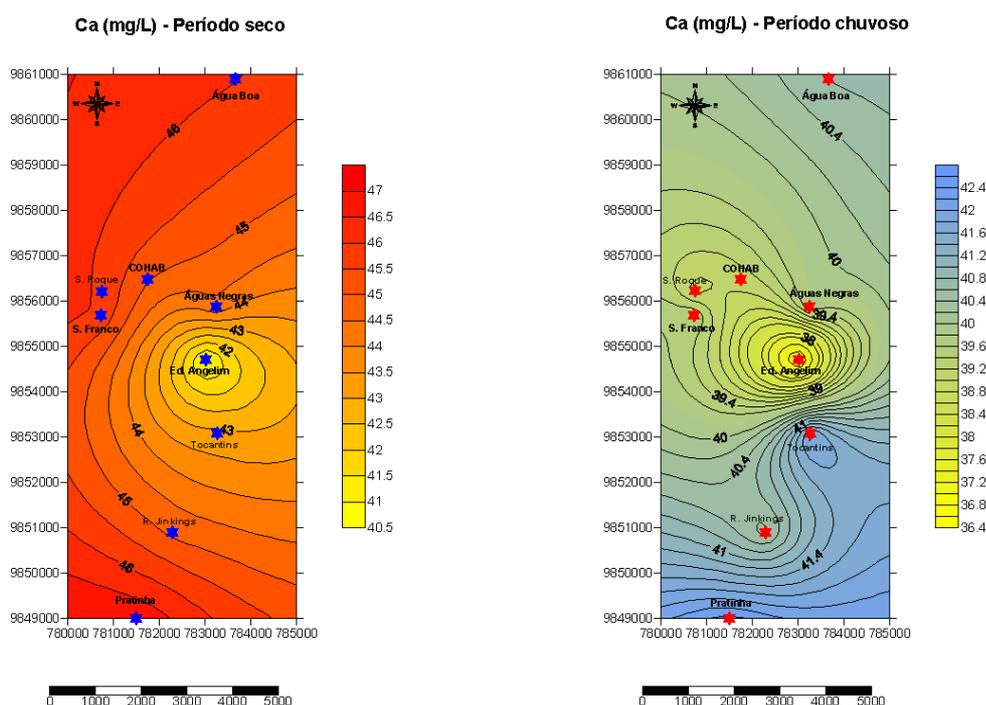


Figura 44: Mapas hidroquímicos da distribuição do cálcio nos poços do sistema Pirabas.

O mapa hidrogeoquímico da concentração de bicarbonato para o período seco, apresentado na Figura 45, revela da mesma forma que o cálcio e o sódio a menor concentração no poço Ed. Angelim, mas também surgem valores mais baixos no poço R. Jinkings. No período chuvoso, esse elemento mostra um comportamento semelhante ao do cálcio quando a linhas de isoteor indicam que o poço Eduardo Angelim é aquele onde há as menores concentrações de bicarbonato.

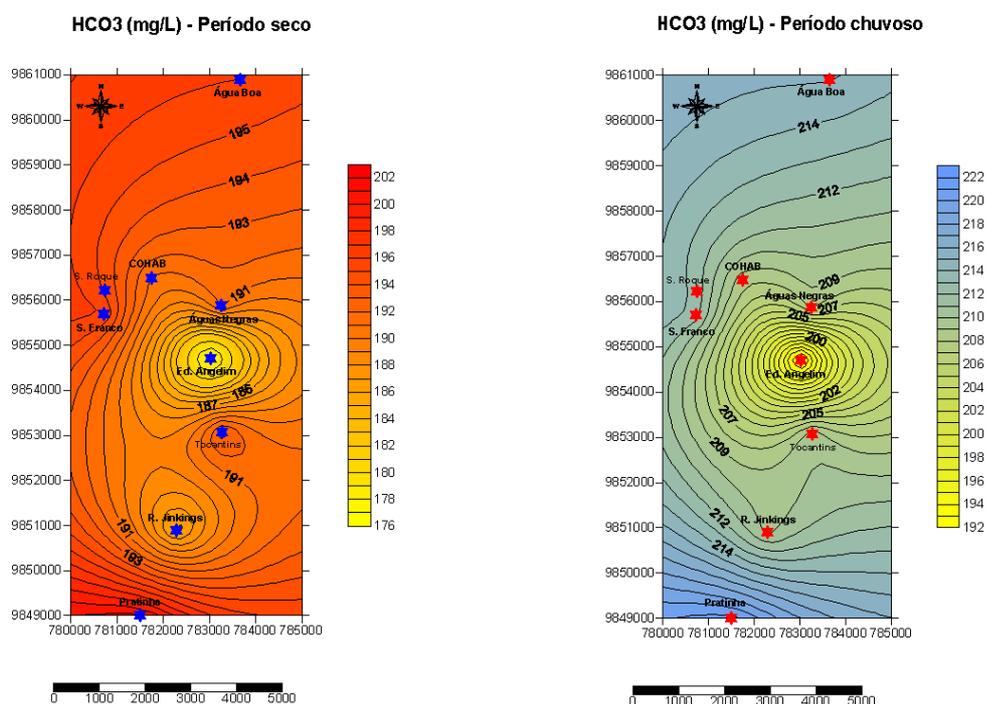


Figura 45: Mapas hidrogeoquímicos da distribuição do bicarbonato nos poços do sistema Pirabas.

O mapa hidrogeoquímico da concentração de cloreto para o período seco, apresentado na Figura 46, revela o menor nível de concentração no poço Pratinha. No período chuvoso há uma inversão de comportamento em relação aos outros íons estudados. A maior concentração de cloro é observada no poço Eduardo Angelim. O poço Tocantins mostrou o menor nível de concentração e os demais poços apresentaram leve diminuição na concentração de cloreto.

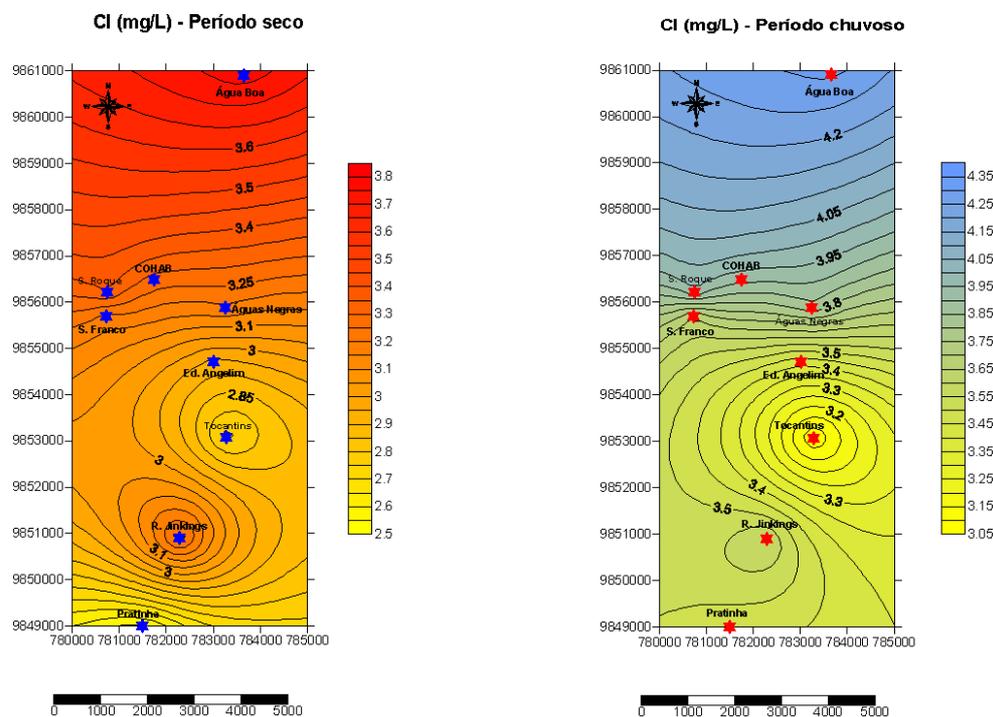


Figura 46: Mapas hidroquímicos da distribuição do cloreto nos poços do sistema Pirabas

O mapa hidroquímico da concentração de sulfato para o período seco, apresentado na Figura 47, revela o menor nível de concentração no poço Ed. Angelim. A distribuição desse elemento na área de estudo, durante o período seco, é no sentido NE-SW. Observa-se que os poços Água Boa, Tocantins e S. Roque mostraram as concentrações de sulfato mais elevadas. No período chuvoso, esse elemento mostra um comportamento diferente. Observa-se uma distribuição no sentido NE-SE e uma maior concentração nos poços COHAB, S. Franco e S. Roque. Os poços Água Boa e Tocantins mostram menor nível de concentração e os demais poços apresentaram leve diluição na concentração de sulfato.

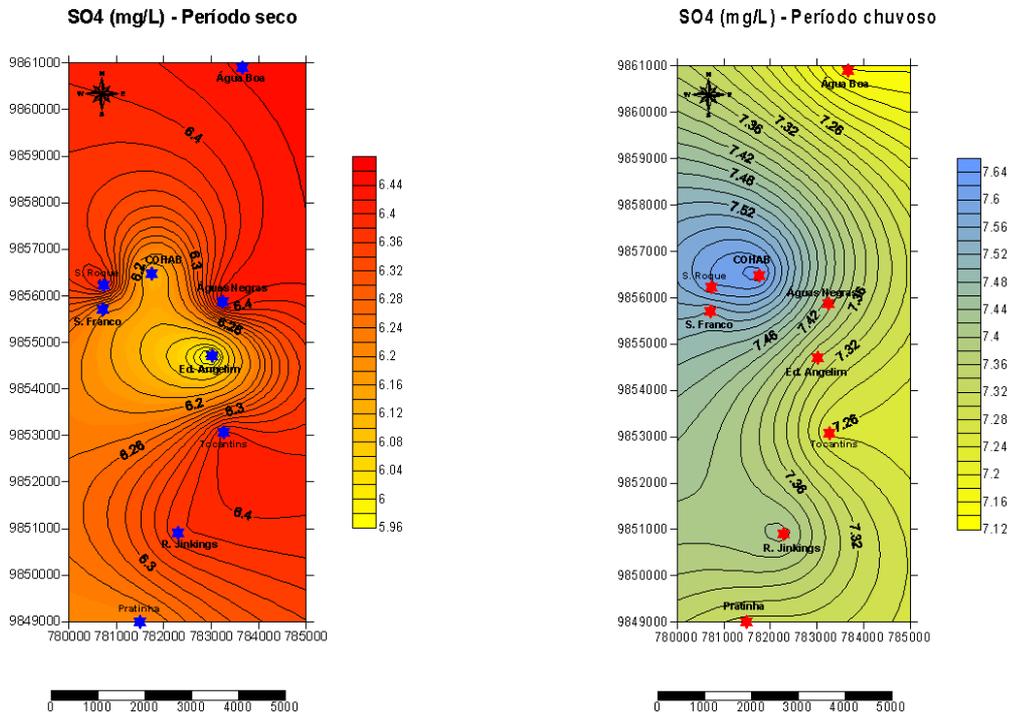


Figura 47: Mapas hidroquímicos da distribuição do sulfato nos poços do sistema Pirabas.

CONCLUSÃO

Os dois principais sistemas aquíferos na área de estudo são o sistema Barreiras, cujos aquíferos estão alojados unicamente em rochas siliciclásticas, e sotoposto a ele o sistema Pirabas, composto por aquíferos formados por rochas calcárias e rochas siliciclásticas. Nos aquíferos do sistema Pirabas tem-se predominantemente águas bicarbonatadas cálcicas que definem o fácies hidroquímico que é aqui denominado de FH – 1 fortemente influenciado pela precipitação e dissolução do carbonato, com um pH alcalino de 7,6 e STD em média de 165 mg/L, são características de uma maior evolução e associam-se a uma circulação mais profunda.

O FH – 1 apresentou um leve aumento das medidas de condutividade elétrica durante os meses mais chuvosos e fortes oscilações no período de estiagem, refletindo a elevada concentração de eletrólitos, e uma leve variação nas medidas de pH. A alcalinidade e o bicarbonato apresentaram o mesmo padrão de comportamento com ligeiro aumento das concentrações no período chuvoso. A variação sazonal das concentrações de cloreto e sódio praticamente não foi notada na maioria dos poços estudados, com exceção do poço Eduardo Angelim que mostrou um ligeiro aumento na concentração de cloreto nos meses de abril e agosto. Os íons cálcio e magnésio apresentaram comportamentos semelhantes com dois aumentos nas concentrações em dois períodos distintos do ciclo hidrológico, já as concentrações de ferro total não apresentam um padrão sazonal definido onde os valores mais elevados estão associados provavelmente à falta de manutenção dos poços.

Nos aquíferos do sistema Barreiras têm-se predominantemente águas cloretadas sódicas, que definem o fácies hidroquímico aqui denominado FH – 2 influenciado intensamente pela composição química da precipitação e pela ação antrópica, possui um pH mais ácido (4,0) e média de STD de 89 mg/L. Essas águas, cloretadas sódicas, apresentaram leve variação das medidas de pH e de condutividade elétrica, revelando uma mais fraca disponibilidade de eletrólitos. As concentrações de cloreto e sódio aumentam com o aumento da evapotranspiração durante o período de estiagem. Os íons cálcio e magnésio apresentaram variações praticamente imperceptíveis. Já as concentrações de alcalinidade, bicarbonato e ferro total apresentaram valores muito baixos, próximos de zero.

Em ambas águas os íons potássio e sulfato, apresentaram fortes oscilações, onde as concentrações do íon sulfato apresentaram uma elevação abrupta nos meses de janeiro de fevereiro.

A análise do balanço hídrico demonstrou que o clima teve um comportamento esperado para a região. Os resultados obtidos foram favoráveis à hipótese de mistura, pois em ambos os períodos as concentrações dos principais cátions foram avaliadas contra as concentrações do íon cloreto e contra o parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD) em diagramas de composição e diagramas tipo Schöller, e todas as amostras dos poços tubulares profundos apresentaram uma nítida variação em suas concentrações de cloreto. Como os sistemas aquíferos estudados têm uma assinatura característica e o cloreto é um íon conservativo, a dispersão das amostras demonstra que as águas estudadas são realmente águas de misturas. Tal fato corrobora a hipótese de Costa (2004), de que os aquíferos estejam sendo recarregados como revela o padrão de comportamento apresentado nos diagramas de composição dos principais elementos presentes nas águas estudadas.

O modelamento geoquímico realizado no sentido de avaliar a percentagem das misturas entre as águas sugere que a mistura entre os dois sistemas aquíferos provavelmente está entre 5 e 10 % de águas do sistema Barreiras.

A matriz de correlação entre os principais parâmetros químicos e físico-químicos analisados no poço do sistema Barreiras, durante os dois períodos (seco e chuvoso), mostra valores diferenciados. No período seco há mudanças significativas, sem a forte interferência climática, representada pelas fortes chuvas durante o período chuvoso. Da mesma forma, a matriz de correlação entre os principais parâmetros químicos e físico-químicos analisados nos poços do sistema Pirabas, durante os dois períodos (seco e chuvoso), mostra valores diferenciados. No período seco a correlação entre os íons é fortemente modificada, só existe correlação significativa entre o Ca^{2+} e o Mg^{2+} ($r = 0,80$), os demais valores de (r) são baixos e não significativos. Devido à presença de calcário integrando os aquíferos do sistema Pirabas, tem-se naturalmente a dissolução de calcita durante o período chuvoso e seco. Contudo, os índices de saturação calculados para as amostras do sistema aquífero Pirabas, em ambos os períodos, mostram valores de sub-saturação com respeito à calcita e dolomita e uma excelente correlação

entre ambos. Esta subsaturação poderia ser explicada por um curto tempo de residência, que segundo Langmuir (1971) não permitiria que o equilíbrio com o carbonato fosse alcançado; ou, como acreditamos ser mais provável, essa subsaturação poderia ser explicada através de misturas entre dois tipos diferentes de águas.

Os mapas hidrogeoquímicos da concentração de cálcio, sódio, cloreto, sulfato e bicarbonato para os períodos seco e chuvoso revelaram um menor nível de concentração no poço Ed. Angelim. Tal padrão observado sugere que na área desse poço haja comunicação hidráulica entre os dois sistemas, que pode ter uma origem geológica, como demonstra Costa (2004), ou pode ser resultado da má construção do poço e do não isolamento no pré-filtro.

Considerando-se conjuntamente todos os indicadores analisados, conclui-se que o intenso e desordenado uso das águas subterrâneas dos poços tubulares profundos da área estudada contribuem para agravar sua possível contaminação, tais observações mostram a importância da necessidade do acompanhamento das alterações em sua qualidade uma vez que o sistema aquífero Pirabas é utilizado como principal fonte de abastecimento público da região, e nesse sentido assegurar à atual e às futuras gerações a disponibilidade desse recurso, quantitativa e qualitativamente, de forma sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington. American Public Health Association. 19th ed., 140 p.
- AquaChem (1977) Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting version 3.7, Waterloo Hydrogeologic. Waterloo, Ontario, Canadá.
- ARAI, M; UESUGUI, N.; ROSETTI, D. F.; GÓES, A. M. 1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 35. Belém. Anais. SBG, v.2, p. 738 –752.
- ARAI, M; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A.C.R.; GÓES, A. M. 1994. Novos Dados sobre estratigrafia e ambiente deposicional dos Sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA 4. Belém. Bol. Res. Exp. P. 185 - 187.
- BASE CARTOGRAFICA-COMPANHIA DE HABITAÇÃO DO PARÁ. **[Base de dados]**. [Belém], 2003. 1 CD-ROM. INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ. **Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém**. Belém, 2004.
- BAUMGARTEN, M.G.Z.; POZZA, S. A. 2001. Qualidade de águas: descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental. Rio Grande: Ed. FURG. 166 p.
- BRASIL. Portaria n.º 518, de 25/03/2004 do Ministério da Saúde. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. In: Diário Oficial da União, Brasília, n. 59, Seção 1, p. 266, 26/03/2004.
- CABRAL, N.M.T. 2004. Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, 278 p. (Tese de Doutorado).
- CARVALHO, W. G. 2001. *Caracterização Químicas dos Aqüíferos da Formação Pirabas no Conjunto COHAB / Distrito de Icoaraci - Pará, Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Departamento de Geoquímica. 00p (Trabalho de Conclusão de Curso).
- CERETTA, M. C. 2004. *Avaliação dos aspectos da qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena - Município de Santa Maria – RS*. Dissertação

apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),

CETESB 1978. Normalização Técnica NT-07. Análise físico-química das águas. São Paulo-SP, CETESB. 340 p.

CETESB 1987. Guia de coleta e preservação de amostras de água. São Paulo-SP, CETESB. 150 p.

COSTA, DE J. P. R. & MARTINS, M. 1996 – Determinação das alterações microclimáticas causadas por processo de ocupação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9. , Anais... Campos do Jordão-SP, SBMet. p. 1182-1184.

COSTA, F. R. 2004. *Influência da Neotectônica sobre os arranjos geométricos dos Aqüíferos na Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 2004. 173p (Mestrado em Geologia).

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. 1976. *Hidrología subterránea*. Barcelona, Ediciones Omega. Vol.1, 1157 p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. 2001. *Hidrología subterránea*. 2 ed. Barcelona, OMEGA. 1200 p.

FEITOSA, F. A. C. & M. FILHO, J. 1997. *Hidrogeologia: Conceito e Aplicações*. Fortaleza-CE, CPRM-Fortaleza. LABMID-UFPE. 412 p.

FENZL, N. 1986. *Introdução à hidrogeoquímica*. Belém. Universidade Federal do Pará. 189 p.

FERNANDES, J.M.G. 1984. Paleoecologia da formação Pirabas, Estado do Pará. 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais. SBG, 1, p 330 - 340

FERREIRA, M. B.; CORRÊA, J.A.M. 2001. **Estudo da Qualidade da Água no Sistema de Abastecimento do Conj. Eduardo Angelim e Adjacências, Icoaraci/Pa** [artigo científico]. Revista Científica da UFPA, Vol 3, março 2002. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/revistaic>>. Acesso em: 08 fev 2006.

FERREIRA, C.S. 1982. Notas Estratigráficas sobre o Cenozóico Marinho do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1. Anais... Belém - PA. p. 84-88.

- FETTER, C. W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3 ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 691 p.
- GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. 2006. *Águas subterrâneas e poços tubulares profundos*. São Paulo. Signus Editora. 502 p.
- GÓES, A.M.; ROSSETTI, D.F.; NOGUEIRA, A.C.R.; TOLEDO, P.M. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no Nordeste do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra 2: 3-15.
- HEM, J.D. 1985. Study and interpretation of the characteristics of natural waters. Geological Survey Water-Supply Paper. Washington D.C.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2005 – Balanço hídrico climatológico. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em: 10 jul. 2006.
- LANDIM, P.M.B. 1998. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo, Fundação Editora da UNESP (Ciência e Tecnologia). 226p
- LANGMUIR, D. *Particle size effect on the reaction goethite = hematite þ water*. 1971. American Journal of Science 271:147–156
- LLOYD, J.W.; HEATHCOTE, J.A. 1985. Natural Inorganic hydrochemistry in relations to groundwater. Clarendon Press. Oxford
- MATTA, M.A. da S. 2002. *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 292p (Tese de Doutorado).
- MAURY, C. J. 1925. *Fósseis Terciários do Brasil com descrições de novas formas cretáceas*. Rio de Janeiro. Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. 665p. (Monografia 4).
- MAZOR, E. 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Third edition. Marcel Dekker, Inc. New York. 453 p.
- MMARHAL – Recursos Hídricos no Brasil. 1998. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal – Secretária de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.takingitglobal.org/images/resources/tool/docs/1263.pdf>. Acesso em: 13 março 2007

- MORAES, M. C. da S. 1999. *Avaliação do Regime de Precipitação na Região de Belém (RMB) e sua Relação Hidrologia Subterrânea*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 45p (Trabalho de Conclusão de Curso).
- MOREIRA, E. 1966. *Belém e sua expressão geográfica*. Belém, Imprensa Universitária. 212p.
- MULLER, C. V. 2007. *Análise Hidrogeoquímica no município de Curitiba – Paraná*. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Curso de Pós-Graduação em Geologia. 124 p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, M. C. F. de & SOUZA, P. F. S. 1997. Estudo das Possíveis Variações e Mudanças Climáticas em Belém. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10. , Anais... Piracicaba-SP. p. 410-412.
- OLIVEIRA, J. R. de; SOUZA LEAL, A. de; TANCREDI, A.C.F.N.S 2001. Projeto Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 115 p. il.
- PEREIRA, L.; SANTIAGO, M. M. F.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H., LIMA, J. O. G. de.; FILHO, J. M. (2004). *Medidas Hidroquímicas e Isotópicas em Águas Subterrâneas que Abastecem o Município de São Luís – Maranhão*. Rev. Águas Subterrâneas nº 18.
- PETRI, S. 1957. Foraminíferos Miocênicos da Formação Pirabas. *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras (Geologia)* – Universidade Federal de São Paulo, 216: 72p.
- PRAZERES, E.B.M. 2001. *Caracterização Química dos Aqüíferos da Formação Pirabas no Conjunto COHAB / Distrito de Icoaraci no período de março a julho de 2001 - Pará, Brasil*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 33 p (Trabalho de Conclusão de Curso).
- WEB-PHREEQ - AQUEOUS GEOCHEMICAL MODELING. Department of Geosciences North Dakota State University. Disponível em: <<http://www.ndsu.nodak.edu/webphreeq/>>. Acesso em: 08 set 2009
- RAO, Y. S. REDDY, T. V. K. NAYUDU, P. T. 1997. *Groundwater quality in the Niva river basin, Chittoor District, Andhra Pradesh, India*. Environmental Geology 32:56–63.
- RODIER, J. 1981. Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Barcelona, Ed. Omega. 200-230 p.

- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A. M. 1989. Estudo Paleoambiental e Estratigráfico dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra 1: n 1. 25 – 74.
- ROSSETTI, GÓES, A. M.; D. F.; TRUCKENBRODT, W.; 1990. A Influência Marinha nos Sedimentos Barreiras. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra 2: p 17 – 29.
- SAUMA FILHO, M. 1996. As Águas Subterrâneas de Belém e Adjacências: Influência da Formação Pirabas e Parâmetros Físico-Químicos para Medidas de Qualidade - Pará, Brasil. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 128p (Dissertação de Mestrado).
- SOARES, J. M.; MENDES, F. da C.; PEREIRA, J. A. R.; CONDURÚ, M. T.; VALENTE, M. L. M.; SILVA, V. M.. *Soluções para o Sistema de Abastecimento de Água para a Região Metropolitana de Belém - Pa.* . In: V CONGRESO DE LA IV REGIÓN DE LA ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL – AIDIS. 2005. ASUNCIÓN - PARAGUAY. 15p.
- SOUZA, E. L. 1996. *Fatores controladores do quimismo de águas subterrâneas da região Nordeste do Pará*. Belém-PA. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. 189 p. (Tese de Doutorado).
- SURFER 2002. SURFER 8.0: Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers. New York, Golden Software Inc. 640p.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. 1955. The water balance. *Climatology* 8 (1).