



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

Thiago Guimarães Briones

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE
CAMPOS (RJ)**

Trabalho Final de Curso (Geologia)

UFRJ

Rio de Janeiro

2011



UFRJ

Thiago Guimarães Briones

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE
CAMPOS (RJ)**

Trabalho Final de Curso de Graduação
em Geologia, Instituto de Geociências,
da Universidade Federal do Rio de
Janeiro – UFRJ, como requisito
necessário para obtenção do grau em
Geologia.

Orientador: Gerson Cardoso da Silva
Júnior

Co-orientadora: Maria da Glória Alves

Rio de Janeiro

Dezembro de 2011

Briones, Thiago Guimarães.

ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA PORÇÃO EMERSA DA
BACIA DE CAMPOS (RJ) /Thiago Guimarães Briones - Rio de
Janeiro 2011

86p.

Orientador: Gerson Cardoso das Silva Júnior e Maria da Glória
Alves Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia –
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de
Geociências, Departamento de Geologia.

1. Hidrogeoquímica 2. Razão Iônica 3. Porção Emersa da Bacia
de Campos

Thiago Guimarães Briones

ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE CAMPOS
(RJ)

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia, Instituto de Geociências, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, como requisito necessário para
obtenção do grau em Geologia.

Orientador: Professor Gerson Cardoso da
Silva Júnior

Co-orientador: Maria da Glória Alves

Aprovada em: 19/12/2011

Por:

Orientador: Professor Gerson Cardoso da Silva Júnior, D.Sc. (UFRJ)

Co-orientador: Professora Maria da Glória Alves, D.Sc. (UENF)

Professora Cícera Neyse de Almeida, D.Sc. (UFRJ)

Geólogo Carlos Eduardo Braga, M.Sc, (Schlumberger Water Services)

*Ali na hora da partida,
parte-se o coração!
Ai! como é triste a vida!
Uns ficam...outros vão!...*

AntônioNobre

À minha eterna tia- mãe Bárbara Borges Briones

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Gerson Cardoso pela confiança e por todos os conhecimentos passados. A minha co-orientadora Maria da Glória Alves, muito obrigado, pelos dados selecionados, por suas colocações e apoio com eventuais dúvidas.

Ao Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM), especificamente ao Geólogo Aderson Martins por ter cedido dados essenciais para o trabalho.

A Schlumberger Water Services pela licença do programa AquaChem 2011.1, mesmo após minha saída do estágio, o presente trabalho seria muito mais difícil sem isso. Agradeço a equipe Andrea Cunha, Carlos Braga, Cynthia Augusto, Diego Fernandes, Márcio Capela, Maurivan Genesi, Mauro Prado o qual tive o prazer de trabalhar junto e aprender muito. Muito obrigado Fernando Zulian pela oportunidade de estágio e trabalho.

Aos colegas de trabalho da Golder Associates, Luan Moreno, Marcelle Fonseca e Ricardo Lessa, pelo aprendizado e diversão durante meu tempo de estágio. Obrigado Rafael D'ávila pela oportunidade de estágio.

Gostaria de agradecer aos meus pais Alexandre e Leila, por todo amor, carinho, atenção e educação durante esses meus vinte e dois anos de vida. Além disso se não fosse por eles, eu não estaria aqui!. Agradeço imensamente ao meu irmão preferido Leonardo, por fazer parte de minha vida.

A minha namorada e amiga Mellissa Combas por simplesmente ter feito desses últimos anos, os mais felizes de minha vida e por todo apoio para esse trabalho.

A minha família, que apesar da distância sempre me incentivou e apoiou muito. Aos meus queridos avós de ambas as partes, amo muito vocês meus velhinhos.

Ao meu primo Victor Briones por ter me aturado durante o tempo de inquilino.

A turma Geologia 2007 por toda a diversão e amizade ao longo desses 5 anos. Em especial aos ilustres amigos, Diego Gracioso, Gisele Furukawa, Marcus Santini, Mariana Brando, Martha Gutierrez, Raoni Moura, Rômulo Stohler, Stephanie Sendorowitz e Thayla Almeida.

BRIONES, Thiago Guimarães. Estudo hidrogeoquímico na porção emersa da Bacia de Campos. Rio de Janeiro, 2011. 90 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RESUMO

O presente trabalho objetiva caracterizar e reconhecer padrões hidrogeoquímicos de diversos aquíferos sedimentares conforme definidos até o presente momento para a porção emersa da Bacia de Campos. A partir dessa caracterização objetivou-se também elaborar hipóteses de funcionamento hidrogeológico dos citados aquíferos a partir de modelagem geoquímica. O estudo baseou-se na compilação de análises químicas de amostras de águas subterrâneas de cerca de 60 poços profundos distribuídos ao longo da região do Norte Fluminense, particularmente na área de Barra do Furado em Quissamã-RJ. Para a caracterização foram analisados parâmetros básicos como pH, condutividade elétrica e concentração de íons dissolvidos para cada aquífero, bem como a espacialização destes mesmos parâmetros em mapas de isovalores para melhor visualizar as suas variações ao longo da área de estudo. Utilizando o programa *AquaChem*[®] 2011.1 (*Schlumberger Water Services*), realizaram-se elaborações frequentemente utilizadas para estudos hidrogeoquímicos, como diagramas de Piper e Scholler, cálculo das principais razões iônicas e outras, que evidenciaram o efeito de interfaces salinas em aquíferos costeiros. Além disso, para alguns poços selecionados do aquífero Emborê, o presente estudo conta com o cálculo de índices de saturação de minerais bem como uma modelagem hidrogeoquímica, levando em conta os principais processos termodinâmicos predominantes, elaborados através do programa *PHREEQCi* 2.18 (*USGS*). Como resultados têm-se os diferentes comportamentos e correlações entre os aquíferos da região, relacionados muitas vezes a suas respectivas composições litológicas ou vinculadas a outros processos externos como a possível intrusão salina e contribuições antrópicas.

Palavras-Chave: Hidrogeoquímica, Razões Iônicas, Porção Emersa da Bacia de Campos, *PHREEQCi*.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, com principais localidades e acessos	13
Figura 2- Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira: o segmento setentrional é o Orógeno Araçuaí; o segmento central inclui a porção sul do Orógeno Brasília e os orógenos Ribeira e Apiaí; e o segmento meridional inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel. As cores roxo e laranja indicam os terrenos que alojam os arcos magmáticos neoproterozóicos (Heilbron <i>et al.</i> , 2004 a).....	14
Figura 3 - Mapa tectônico do sudeste brasileiro mostrando as principais unidades do setor central do Sistema Orogênico Mantiqueira e a localização da área de estudo (modificado de Heilbron <i>et al.</i> , (2004). Legenda: 1) Bacia do Paraná e sedimentos cenozóicos; 2) rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília: 3) nappes inferiores, 4) nappes superiores; Cráton do São Francisco (CSF): 5) embasamento,6) Supergrupo São Francisco, 7) rochas metassedimentares do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira: 8 e 9) Terreno Ocidental (Domínios Andrelândia e Juiz de Fora), 10) Terreno Paraíba do Sul, 11) Terreno Oriental incluindo 12) arco magmático Rio Negro,13) Terreno Cabo Frio, 14) Terreno Embu; 15) Orógeno Apiaí (Terreno São Roque). LTC – Limite Tectônico Central da Faixa Ribeira. Modificado de Heilbron <i>et al.</i> , (2004).....	15
Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia de Campos (Winter <i>et al.</i> , 2007).....	19
Figura 5: Mapa geomorfológico da área de estudo e adjacências (modificado de Gatto <i>et al.</i> , 1983).....	23
Figura 6: Sistemas aquíferos sedimentares da porção emersa da Bacia de Campos (modificado de Barreto <i>et al.</i> ,2000).....	25
Figura 7 - Subdivisão dos aquíferos sedimentares da bacia de Campos, segundo Martin <i>et al.</i> , (2006).....	26
Figura 8- Distribuição dos poços utilizados sobre os aquíferos, segundo Barreto <i>et al.</i> (2000), da porção emersa da Bacia de Campos.....	34
Figura 9- A) Poços pertencentes ao Aquífero São Tome I; B) Poços pertencentes ao Aquífero São Tomé II e Emborê	35
Figura 10 – a- Poços no Aquífero Flúvio-Deltaico; b- Poços no Aquífero Alúvio Lacustre e c- Poços no Aquífero Barreiras.....	36
Figura 11- Mapas de isovalores para: a- ph; b- condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); c- concentração (mg/L) de cloretos.	46
Figura 12- Diagrama de Piper para todos os poços utilizados	48

Figura 13 – Diagrama Logarítmico de Scholler para todos os poços e concentração da água marinha.....	49
Figura 14 - Diagramas de Piper e de Scholler para os poços do aquífero Alúvio-Lacustre.	51
Figura 15- Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Flúvio Deltaico.	52
Figura 16 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero São Tomé II. .	54
Figura 17 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Barreiras.	55
Figura 18 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Emborê.	56
Figura 19 – Razão rCl/rBr para todos os poços possíveis. A linha azul representa a mesma razão para a água marinha.	59
Figura 20: Razão rNa/rCl para todos os poços possíveis. A linha azul representa a mesma razão para a água marinha ou para processos de substituição de Na por Ca e Mg.	60
Figura 21: Razão iônica $rCl/rHCO_3$ para os todos os poços possível. A linha azul representa a razão $rCl/rHCO_3$ para água marinha e as linhas verdes tracejadas representam a mesma razão para águas continentais.....	61
Figura 22 - Razão iônica rMg/rCa para os todos os poços possíveis. A linha azul representa a razão rMg/rCa para água marinha ou para processos de trocas catiônicas entre e as linhas verdes tracejadas representam a mesma razão para águas continentais.	62
Figura 23 – Índices de minerais sulfatados.	63
Figura 24 – Índices de saturação de minerais carbonáticos.....	64
Figura 25 – Índices de saturação para os principais silicatos.....	65
Figura 26 – Índice de saturação para óxido de ferro, ferro amorfo.	65
Figura 27 – Índices de saturação para halita.....	66
Figura 28- Misturas graduais da água marinha com a água do poço BF-01	67
Figura 29 - Diagrama de Piper com a água otimizada entre as águas do mar e do poço BF-01.	68
Figura 30- Croqui ilustrativo da hipótese de modelo inverso, Lagoa Feia como origem.	69

Figura 31 - Croqui ilustrativo da segunda hipótese de modelo inverso, na qual a água do aquífero raso e salino seria a mistura de águas de chuvas com aerossóis marinhos com águas ascendentes do aquífero mais profundo e de água doce..... 69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais razões iônicas e seus significados (Hem, 1985):.....	12
Tabela 2- Correspondência entre os aquíferos da Bacia de Campos (modificada de Martins et al., 2006).....	24
Tabela 3- Poços selecionados para estudo	29
Tabela 4 - Cálculo de erro analítico (%) para as amostras de íons básicos completos. .	32
Tabela 5 - Classificação dos poços por aquíferos	37
Tabela 6: Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Alúvio Lacustre.	39
Tabela 7 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Flúvio Deltaico.....	46
Tabela 8- Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero São Tomé I.	41
Tabela 9- Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero São Tomé II.	42
Tabela 10 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Barreiras.....	43
Tabela 11 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Emborê.	44
Tabela 12 - Relação de poços com íons básicos completos, valores em mg/L.	47
Tabela 13- Valores das principais razões iônicas utilizadas.....	57

Sumário

RESUMO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
Sumário.....	x
1) INTRODUÇÃO.....	1
2) OBJETIVOS	3
3) DEFINIÇÕES DE HIDROGEOQUÍMICA.....	3
3.1) Propriedades Físico-Químicas	4
3.2) Constituintes Iônicos Principais	6
3.2.1) Cátions	6
3.2.2) Ânions	8
3.3) Razões Iônicas	9
4) ÁREA DE ESTUDO	13
4.1) Localização	13
4.2) Geologia Regional	14
4.3) Geologia da Bacia de Campos.....	16
4.3.1) Geologia da porção emersa da Bacia de Campos.....	20
4.4) Geomorfologia	22
4.5) Hidrogeologia da Bacia de Campos.....	23
5) METODOLOGIA.....	27
5.1) Compilação e seleção dos dados.....	27
5.2) Geoprocessamento dos dados selecionados.....	27
5.3) Caracterização e Modelagem hidrogeoquímica.....	27
6) RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.1) Compilação e seleção de dados	29

6.2) Classificação dos poços por aquíferos	33
6.3) Condutividade elétrica, pH e concentração de Cloretos	39
6.4) Mapas de isovalores	44
6.5) Classificação das Águas	47
6.6) Razões Iônicas	57
6.7) Modelagem Hidrogequímica	63
6.7.1) Índices de Saturação	63
6.7.2) Modelagem de Mescla	66
6.7.3) Modelagem Inversa	68
7) CONCLUSÕES	70
8) BIBLIOGRAFIA	73
ANEXO 1	
MAPA GEOLÓGICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE CAMPOS	75
ANEXO 2	
TABELA DE DADOS RETIRADOS DE CAETANO (2000)	78
ANEXO 3	
TABELA DE DADOS RETIRADOS DA BASE DE DADOS DO LABORATÓRIO DE HIDROGEOLOGIA UFRJ	81
ANEXO 4	
DADOS DAS MODELAGENS HIDROGEOQUÍMICAS	85

1) INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e as conseqüentes demandas de abastecimento para uso industrial doméstico e agrícola, requerem do poder público planejamento de investimentos compatíveis com seu respectivo potencial hídrico disponível. O planejamento para o abastecimento populacional a partir de águas subterrâneas, quando disponíveis, apresenta melhor custo benefício com relação às estações de abastecimento de águas fluviais.

A Bacia de Campos além de ser uma das principais bacias petrolíferas do país, é também, em sua porção emersa, a principal área do estado do Rio de Janeiro com relação a potencial de águas subterrâneas, por apresentar excelentes aquíferos sedimentares. Entender e delimitar esses aquíferos é de fundamental importância para um planejamento que visa ampliar redes de abastecimento de águas para a população e a proteção dos recursos hídricos. Nesse contexto, os aquíferos da bacia tem sido na última década alvo de estudos de diversos autores como Caetano (2000), Capucci (2003), Barreto *et al.* (2000) e Martins *et al.* (2006).

Do ponto de vista hidrogeológico, a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto os aspectos quantitativos. O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes das águas subterrâneas, procurando estabelecer suas relações com o meio físico.

Os processos e fatores que influem na evolução da qualidade das águas subterrâneas podem ser intrínsecos ou extrínsecos ao aquífero. Nesse contexto, o presente trabalho busca caracterizar, reconhecer e relacionar os diferentes tipos de características hidrogeoquímicas que os principais aquíferos sedimentares pertencentes à porção emersa da Bacia de Campos possivelmente apresentem.

Embora constitua a principal reserva de água subterrânea do estado do Rio de Janeiro, a porção emersa da Bacia de Campos é pobremente conhecida do ponto de vista hidrogeológico e hidrogeoquímico, com muito poucos estudos abrangentes realizados até o presente momento. Desse modo, espera-se também com o presente trabalho contribuir para um melhor conhecimento das características químicas e de qualidade das águas subterrâneas da região estudada, bem como dos mecanismos de circulação e renovação das águas desses aquíferos.

Ainda que considerando as limitações materiais e de tempo inerentes a um Trabalho de Conclusão de Curso, esta representa uma contribuição para o início das discussões sobre o funcionamento hidrogeológico dos aquíferos regionais da Bacia de Campos.

2) OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a caracterização e interpretação dos possíveis padrões hidrogeoquímicos dos aquíferos sedimentares da porção emersa da Bacia de Campos, tendo como base análises químicas de amostras de água de diversos poços profundos da região. A caracterização objetivou classificar quimicamente os possíveis tipos de água, ao passo que a interpretação buscou estabelecer a interação das respectivas características químicas com o meio geológico e sua fonte.

Além disso, tem-se como objetivo específico melhor compreender o comportamento hidrogeoquímico de alguns poços do Aquífero Emborê, através da simulação dos principais processos que supostamente contribuíram para a constituição química das águas subterrâneas do mesmo.

3) DEFINIÇÕES DE HIDROGEOQUÍMICA

A hidrogeoquímica é definida como o estudo da química da água e suas relações com os materiais formadores de solos e rochas, isto é, os materiais geológicos. Outro termo de grande importância é a geohidroquímica, que significa o estudo da química da água em ambiente subterrâneo, que é um dos focos do estudo do presente trabalho.

A água é uma substância quimicamente muito ativa, que tem grande facilidade de dissolver e reagir com outras substâncias orgânicas ou inorgânicas. As substâncias dissolvidas podem estar sob a forma molecular ou iônica, porém, nas águas subterrâneas, esta última é predominante. Ao lixiviar os solos e as rochas, enriquecem-se em sais minerais em solução, provenientes da dissolução dos seus minerais. Estas reações são favorecidas pelas baixas velocidades de circulação das águas subterrâneas e facilidades de dissolver o CO_2 ao percolar o solo não saturado (modificado de CPRM, 1997).

Íons como Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} e K^+ estão ligados fracamente à estrutura silicatada de forma que são facilmente incorporados na composição química da água. O processo de dissolução é influenciado pelo pH, pela temperatura e pelo grau de saturação de cada elemento. Quanto mais ácido for o ambiente, mais rápida será a dissolução e de forma inversa, quanto mais alcalino for o ambiente, mais demorada será a dissolução. Os produtos da dissolução podem reagir entre si formando compostos insolúveis, princi-

palmente as argilas, que ficam na água em estado coloidal tendendo a fixar de forma irreversível o íon potássio. É por isso que as águas subterrâneas apresentam, de modo geral, baixos teores de K^+ .

Os sedimentos granulares resistentes são formados por materiais que não se dissolveram durante os processos que lhe deram origem. São formados por materiais insolúveis, como o quartzo, zircão etc., e/ou por materiais mais ou menos solúveis, onde o processo de hidrólise não se completou, como por exemplo, alguns silicatos resistentes, algumas micas etc. As rochas derivadas destes sedimentos, como os arenitos e cascalhos, por exemplo, são parcial ou totalmente cimentadas por materiais que apresentam um certo grau de solubilidade. Normalmente os sais provenientes destas rochas são oriundos deste cimento, que muitas vezes é carbonato de cálcio. A água subterrânea em contato com estas rochas tem uma composição similar à do material que causa a cimentação ou da água original que participou de sua formação. Os sedimentos hidrolisados são formados em sua maior parte por partículas provenientes da hidrólise de outras rochas, como, por exemplo, as argilas, que absorve uma grande quantidade de água e que vai sendo expulsa lentamente durante os processos de compactação e litificação. Estas águas liberadas podem ter uma grande quantidade de sais, principalmente se a argila for de origem marinha. Em geral, apresentam um conteúdo elevado de Cl^- , SO_4^{-2} , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} e SiO_4^{+4} .

3.1) Propriedades Físico-Químicas

As propriedades físicas são importantes tanto na definição das propriedades e comportamento hidrogeológico e geoquímico dos aquíferos quanto para considerações do uso da água como recurso. Alguns valores de certas propriedades físicas podem ser fator limitante ao consumo da água, como é o caso do sabor decorrente de sais dissolvidos em quantidade excessiva, além da cor e do odor, por exemplo. As principais características são as seguintes:

Condutividade Elétrica:

A condutividade elétrica ou eletrolítica, também chamada de condutância específica, é a capacidade de uma solução conduzir correntes elétricas, estando

diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons (modificado CPRM, 1997).

A condutividade elétrica ou eletrolítica resulta da soma das contribuições de todos os íons presentes no meio, contudo a fração de corrente transportada depende da concentração relativa e da facilidade com que se movimenta no meio, de onde concluímos que a condutância específica de um eletrólito varia com a concentração dos íons presentes. As soluções inorgânicas tais como os ânions Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} e os cátions Na^+ , Ca^{+2} e Cu são bons condutores de corrente elétrica, já as soluções orgânicas tais como os fenóis, álcoois e óleos são maus condutores de corrente. Portanto uma medida obtida onde há baixa condutividade pode significar baixa concentração de inorgânicos, porém alta de orgânicos.

pH:

É a medida da concentração do hidrogênio, ou, mais corretamente, o logaritmo negativo da atividade iônica em moles por litro (Hem, 1970 *in* Tubbs, 1994). É também definido como a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes, conforme as equações abaixo:



$$K_{eq} = \frac{\langle \text{H}^+ \rangle \cdot \langle \text{OH}^- \rangle}{\langle \text{H}_2\text{O} \rangle} \quad (2.2)$$

$$\text{pH} = -\log \langle \text{H}^+ \rangle \quad \text{ou} \quad \text{H}^+ = 10^{-\text{pH}} \quad (2.3)$$

O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. Varia de cerca de 1 a 14, sendo neutro com o valor 7, ácido com valores inferiores a 7 e alcalino ou básico com valores superiores a 7. A escala dos valores do pH é tal que a mudança de uma unidade significa um aumento de 10 vezes na concentração do íon hidrogênio. A molécula de água (H_2O) tem uma leve tendência de romper-se em dois íons do mesmo modo que os sais (NaCl , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4)

dissolvidos na água. Quando a água (H_2O ou H-OH) se ioniza, divide-se no cátion H^+ e no ânion OH^- , chamado de íon hidroxila ou oxidrila (modificado de CPRM, 1997).

3.2) Constituintes Iônicos Principais

Nas águas subterrâneas, a grande maioria das substâncias dissolvidas encontra-se no estado iônico. Alguns destes constituintes iônicos estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e a sua soma representa a quase totalidade dos íons presentes. A breve descrição das principais características desses íons é feita a seguir, baseada fundamentalmente em Custódio & Llamas (1983) *in* CPRM (1997).

3.2.1) Cátions

Sódio (Na^+):

O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas. Sua presença é devida principalmente à ampla distribuição nos minerais fontes; baixa estabilidade química dos minerais que o contém; solubilidade elevada e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução. Ocorre principalmente sob a forma de cloretos 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. Há, em geral, um aumento gradativo dos teores de sódio das águas subterrâneas a partir da zona de recarga do aquífero em direção às suas porções mais confinadas ou dos seus exutórios. A concentração do sódio varia, em geral, entre 0,1 e 100 mg/L nas águas subterrâneas e entre 1 e 150 mg/L em águas naturais doces, atingindo entre 10.000 e 13.000 mg/L nas águas do oceano, em média, podendo chegar a 100.000 mg/L nas salmouras naturais. As águas naturais com elevados teores de Na^+ , geralmente, possuem elevadas concentrações de F^- . As águas com concentrações elevadas de sódio são prejudiciais às

plantas por reduzir a permeabilidade do solo, sendo especialmente nocivas quando as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} são baixas (modificado de CPRM, 1997).

Potássio (K^+):

Apesar do potássio e do sódio pertencerem ao mesmo grupo, o dos metais alcalinos, seus comportamentos nos processos de solubilização são diferentes. O potássio é o sexto colocado na escala de abundância dos metais nas rochas ígneas. Ocorre em pequenas quantidades ou está ausente nas águas subterrâneas, devido à sua participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e, ainda, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais. Ocorre principalmente nos feldspatos potássicos, micas e leucitas, em rochas ígneas e metamórficas. Altas concentrações de potássio podem ser encontradas nos minerais de carnalita e silvinita, em evaporitos. Nas águas meteóricas os teores de potássio estão geralmente no intervalo de 0,1 a 4 mg/L, enquanto as águas do oceano Atlântico, apresentam, em média, 400 mg/L. Os teores de potássio nas águas subterrâneas são inferiores a 10 mg/L, sendo mais frequentes valores entre 1 e 5 mg/L (modificado de CPRM, 1997).

Cálcio (Ca^{+2}):

O cálcio é o um dos elementos mais abundantes na maioria das águas e rochas do planeta Terra. Os sais de cálcio possuem moderada a elevada solubilidade, sendo muito comum precipitar como carbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). É um dos principais constituintes da água e o principal responsável pela dureza. Apresenta-se, em geral, sob a forma de bicarbonato e raramente como carbonato. Ocorre principalmente nos minerais calcita, aragonita e dolomita, em rochas calcárias, sendo o plagioclásio e a apatita as maiores fontes de cálcio das rochas ígneas para as águas subterrâneas. A solubilidade do bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) aumenta em presença de sais de Na^+ e K^+ . Nas águas meteóricas os teores de cálcio variam no intervalo 0,1 a 10 mg/L e nas águas do oceano Atlântico os valores oscilam em torno de 480 mg/L. Nas águas subterrâneas, os teores de cálcio variam, em geral, entre 10 e 100 mg/L (modificado de CPRM, 1997).

Magnésio (Mg^{+2}):

O magnésio apresenta propriedades similares as do cálcio, porém é mais solúvel e mais difícil de ser precipitado. Quando em solução, tem a tendência de nela permanecer, daí o enriquecimento dos seus sais nas águas dos oceanos. Os minerais fontes de magnésio mais frequentes são: magnesita, biotita, granada, hornblenda, clorita e olivina. O magnésio ocorre principalmente em rochas carbonatadas. Juntamente com o cálcio é o responsável pela dureza e produz gosto salobro nas águas. Ocorre sob a forma geral de bicarbonato. As águas meteóricas apresentam teores de magnésio entre 0,4 e 1,6 mg/L e a água do oceano Atlântico têm valor médio de aproximadamente 1410 mg/L. As águas subterrâneas apresentam teores mais frequentes de magnésio no intervalo de 1 a 40 mg/L (modificado de CPRM, 1997).

3.2.2) Ânions

Cloreto (Cl^-):

Está presente em todas as águas naturais, com valores situados entre 10 e 250 mg/L nas águas doces. O cloreto, em geral, é muito solúvel e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita. Não oxida e nem se reduz em águas naturais. É proveniente da lixiviação de minerais ferromagnesianos de rochas ígneas e de rochas evaporíticas tal como o sal-gema. As rochas ígneas são pobres em cloretos. A alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero vão provocando aumentos gradativos e constantes dos teores de cloretos nas águas subterrâneas na direção do fluxo. As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de cloretos inferiores a 100 mg/L. Já nas águas dos mares são abundantes com valores entre 18.000 e 21.000 mg/L, podendo chegar a 220.000 mg/L nas salmouras naturais (saturação). O cloreto é um bom indicador de poluição para aterros sanitários e lixões.

Sulfato (SO_4^{-2}):

São sais moderadamente solúveis a muito solúveis, exceto os sulfatos de estrôncio ($SrSO_4$) e os de bário ($BaSO_4$). Na água doce o sulfato de cálcio ($CaSO_4$) satura a 1500 mg/L e pode chegar até 7200 mg/L em águas salinas. Em meio redutor,

com muita matéria orgânica, pode sofrer uma redução bacteriana a S ou S⁻², porém em geral é estável. Origina-se da oxidação do enxofre presente nas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados (gipsita e anidrita). As águas subterrâneas apresentam geralmente teores de sulfatos inferiores a 100 mg/L, principalmente na forma de SO₄⁻² e HSO₄⁻. Segundo Hem *in* CPRM (1997), este último predomina nas águas muito ácidas, com pH < 2, devido à dissociação incompleta do ácido sulfúrico.

As águas do oceano Atlântico apresentam, em média, 2810 mg/L de sulfatos. As águas subterrâneas com excesso de sulfato, > 400 mg/L, podem causar efeitos laxativos e na presença de íons de magnésio e sódio pode provocar distúrbios gastrointestinais. O sulfato ferroso, se consumido na forma pura, é de alta periculosidade, podendo ser fatal se ingerido por crianças em quantidades superiores a 7,8 g. O sulfato também é caracterizado por aumentar a salinidade dos solos (modificado de CPRM, 1997).

Bicarbonato (HCO₃⁻):

Este íon não se oxida nem se reduz em águas naturais, porém pode precipitar com muita facilidade como bicarbonato de cálcio (Ca(HCO₃)₂). Varia entre 50 e 350 mg/L em águas doces, podendo chegar a 800 mg/L. A água do mar possui teores da ordem de 100 mg/L (modificado de CPRM, 1997).

Carbonato (CO₃⁻²):

A quantidade relativa de íons de carbonato é função do pH e do conteúdo de gás carbônico. Em águas naturais doces, a quantidade de carbonato será muito baixa em comparação com a de bicarbonato. Segundo Logan *in* CPRM (1997), o carbonato somente excederá o bicarbonato quando o pH for igual ou superior a 10. O carbonato é indesejável em águas para a irrigação, pois sua presença na forma de carbonato de sódio é altamente tóxica para os vegetais (modificado de CPRM, 1997).

3.3) Razões Iônicas

O estudo de razões iônicas é muito importante para a classificação e interpretação hidrogeoquímica das águas subterrâneas. Para o estudo foram selecionadas as principais razões iônicas interessantes para o estudo de aquíferos costeiros (Tabela 1). A razão dos íons alcalinos pelos cloretos ((rNa + rK) / rCl) é muito útil nos estudos de salinização em áreas costeiras. Para água do mar a razão varia geralmente entre 0,87

e 0,89. Também pode ser avaliado pela razão rNa/rCl , que é aproximadamente de 0,86. O valor para água doce é uma função do processo químico durante a recarga, mas geralmente é $1,0 \pm 0,1$. Quando a água salina desloca a água, a razão alcalinos/cloreto diminui com relação aos valores da água doce e frequentemente alcançam valores mais baixos que águas marinhas.

As razões iônicas são as relações entre os íons dissolvidos em uma água. Estas relações podem indicar um 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. Podem-se estabelecer vários tipos de razões cujo objetivo é função do problema a estudar. É comum designar estas razões com o nome de índices hidrogeoquímicos (modificado de Santos, 2000). As razões iônicas mais frequentemente utilizadas no estudo hidrogeoquímico, segundo Custodio e Llamas (1983), são descritas a seguir e seus valores são expressos em meq/L, como indica o símbolo (r).

Razão rMg^{+2}/rCa^{+2} - nas águas continentais, esta razão varia entre 0,3 e 1,5. Os valores próximos de 1 indicam uma provável influência de terrenos dolomíticos ou com serpentina, e valores superiores a 1 sugerem, em geral, relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos, como gabros e basaltos. Entretanto, quando ocorre precipitação de $CaCO_3$ em uma água, a razão rMg^{+2}/rCa^{+2} aumenta sem que seja indicação dos litotipos percolados. No caso da dissolução do calcário, ocorre uma diminuição desta razão. A água do mar tem razão rMg^{+2}/rCa^{+2} em torno de 5 e, por isso, as águas que circulam em litologias de origem marinha ou que tenham sofrido mistura com a água do mar têm também esta razão elevada. O aumento do conteúdo de cloretos e da razão rMg^{+2}/rCa^{+2} pode ser um bom indício de contaminação por água de origem marinha. Nos processos de troca iônica que produzam abrandamento da água, o Ca^{+2} se fixa mais do que o Mg^{+2} , e conseqüentemente, haverá um aumento da razão rMg^{+2}/rCa^{+2} na água. Porém, esta regra não é geral, pois o processo depende dos teores iniciais destes íons.

Razão rK^+/rNa^+ - nas águas doces, esta razão pode variar entre 0,1 e 1, sendo mais frequente entre 0,4 e 0,3 (Schoeller, 1955), enquanto que, para a água do mar, fica no intervalo de 0,02 a 0,025. Devido à fixação preferencial de K^+ no terreno, esta razão é menor na água que na rocha mãe, e é tanto menor quanto mais concentrada em sais for a água. Os trabalhos realizados na ilha vulcânica de Lanzarote (Custodio, 1965) indicam uma tendência a decrescer a razão rK^+/rNa^+ conforme aumenta a salinidade. No geral,

esta razão tende a diminuir, conforme aumenta a salinidade. Se existem aportes artificiais de K^+ , pode-se seguir sua diminuição no sentido do fluxo e então esta relação pode ser interessante.

Razão $rCl^-/rHCO_3^-$ - como o conteúdo em HCO_3^- é relativamente constante nas águas subterrâneas, esta razão serve para acompanhar o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo. Ainda que essa concentração faça crescer ligeiramente o denominador, um aumento na razão $rCl^-/rHCO_3^-$ indica um avanço no processo de concentração. Se existirem fenômenos de redução de sulfatos ou aportes exteriores de CO_2 , pode haver aumento do conteúdo em HCO_3^- e, neste caso, não convém utilizar esta razão se não forem tomadas as devidas precauções. A precipitação de $CaCO_3$ também pode influir nesta razão.

É muito útil para caracterizar a intrusão marinha, já que as águas continentais têm normalmente valores entre 0,1 e 5 e na água do mar os valores variam entre 20 e 50. Se o aumento de cloretos é devido à concentração de sais nas zonas de recarga, a razão $rCl^-/rHCO_3^-$ cresce muito menos para igual aumento de cloretos quando ocorre uma intrusão marinha (modificado de Santos, *op cit.*).

Razão rCl^-/rBr^- - A razão Cl/Br pode ser usada como um traçador confiável, devido ao fato de que o Cl e Br serem conservativos (isto é, não reagem com a matriz do aquífero), exceto na presença de quantidade muito grande de matéria orgânica. De acordo com a razão rCl^-/rBr^- podem ser obtidas informações sobre a fonte de salinização: a água do mar possui aproximadamente $rCl^-/rBr^- = 655 \pm 4$ (Alcalá e Custodio, 2008)

Tabela 1 - Principais razões iônicas e seus significados (Hem, 1985):

Razão Iônica	Variações Teóricas	Significado
rMg^{+2}/rCa^{+2}	0,25-0,33	-água de circulação em rocha de composição granítica
	0,33-1,5	-águas continentais
	>0,9	-contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos
	>1	-relações com litotipos ricos em silicatos magnesianos
	± 5	-água do mar
$Ca/(HCO_3 + SO_4)$	>1	- Indicação de Intrusão Marinha
rK^+/rNa^+	0,02-0,025	-água do mar
	0,09-0,6	-água de circulação em rocha com composição Granítica
	0,4-0,28	- “água doce”
rNa^+/rCl^-	<0,0876	-água do mar - substituição de Na^+ por Ca^{+2} e Mg^{+2}
	<0,7	-precipitação de sais de Na^+
	>0,7	-fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas
$rCl^-/rHCO_3^-$	0,5	-fluxo normal para rochas cristalinas
	0,1-0,5	-águas continentais
	20-50	-água do mar

4) ÁREA DE ESTUDO

4.1) Localização

A área do presente trabalho localiza-se no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, a cerca de 300 km da capital, englobando os municípios de Quissamã, Campos dos Goytacazes, São João da Barra e São Francisco de Itabapoana, sendo a principal via de acesso a BR-101 (Figura 1)

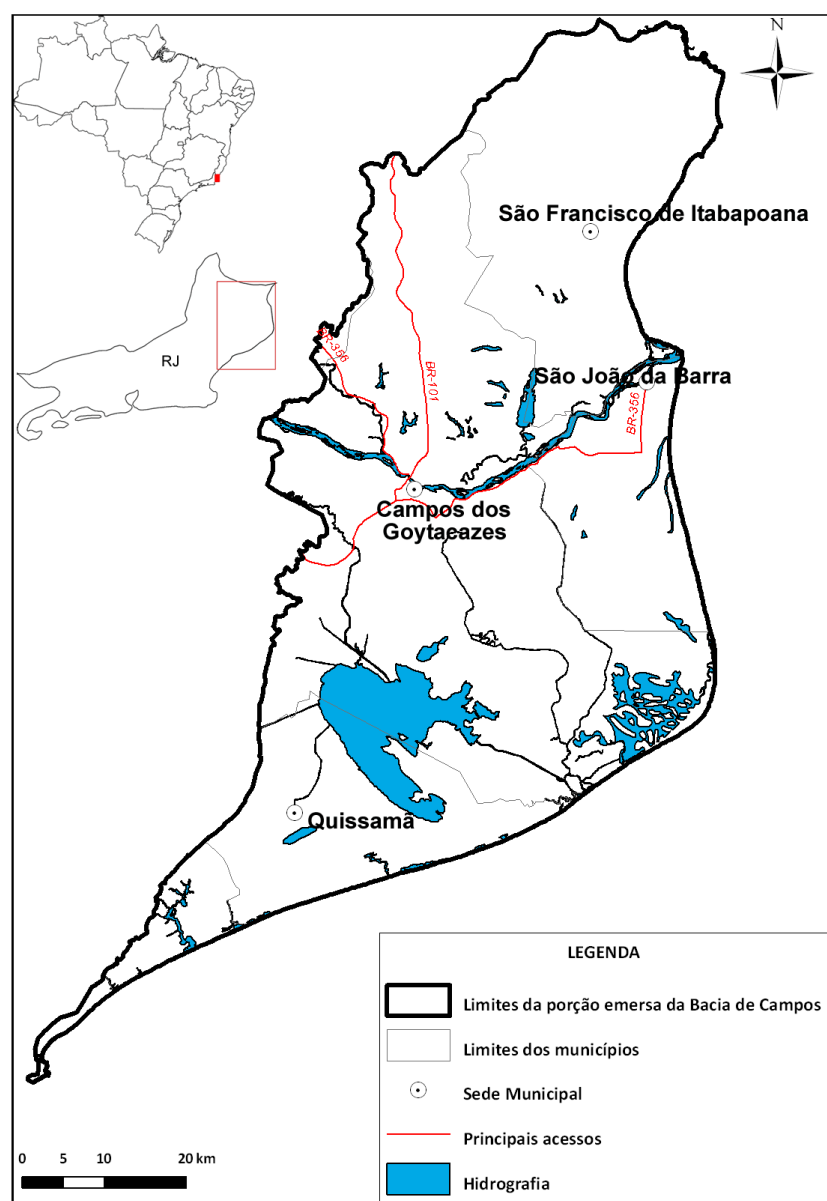


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, com principais localidades e acessos

4.2) Geologia Regional

A região se insere no contexto geotectônico da Província Mantiqueira definida por Almeida *et al.* (1981), que consiste em um sistema de orógenos formados durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (630-490 Ma), responsável pela deformação e metamorfismo de rochas de idades arqueanas e proterozóicas. Essa província é subdividida em três segmentos geográficos (Figura 2), que são: a) segmento setentrional que corresponde ao Orógeno Araçuaí; b) o segmento central que engloba o Orógeno Ribeira, a Zona de Interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira, e os terrenos Apiaí, São Roque e Embu; e c) e o segmento meridional que inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel.

A área de estudo tem como embasamento rochas associadas ao Orógeno Ribeira, segmento central da Província Mantiqueira.

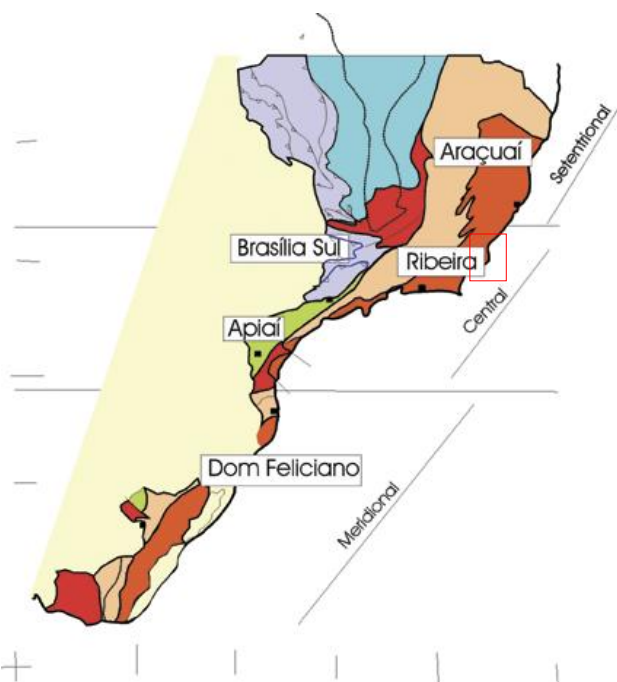


Figura 2- Subdivisão do Sistema Orogênico Mantiqueira: o segmento setentrional é o Orógeno Araçuaí; o segmento central inclui a porção sul do Orógeno Brasília e os orógenos Ribeira e Apiaí; e o segmento meridional inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel. As cores roxo e laranja indicam os terrenos que alojam os arcos magmáticos neoproterozóicos (Heilbron *et al.*, 2004 a). O quadrado em vermelho é a localização aproximada da área de estudo.

O Orógeno Ribeira é interpretado com o resultado da interação do Cráton São Francisco com a porção sudoeste da placa do Congo, além de microplacas e arcos de ilha, ao longo do Ciclo Brasileiro (580 Ma). Em consequência a este evento colisional,

houve um empilhamento de terrenos de leste para oeste-noroeste, que pelo caráter obliquo da colisão, é representado por zonas com predomínio de encurtamento frontal e zonas com componente transpressivo dextral. Dessa forma, o orógeno Ribeira foi subdividido em cinco terrenos tectono-estratigráficos separados por falhas de empurrão ou por zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas: Terreno Ocidental, Paraíba do Sul, Embu, Oriental e Cabo Frio – Figura 3 (Heilbron *et. al.*, 2004).

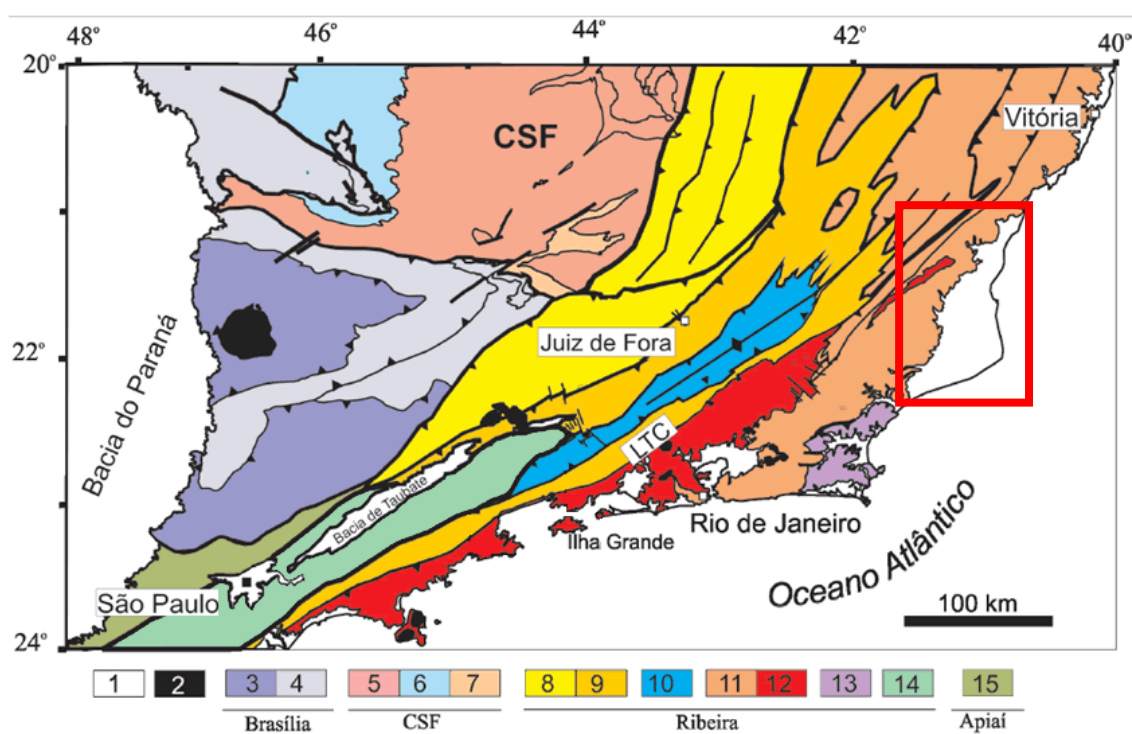


Figura 3 - Mapa tectônico do sudeste brasileiro mostrando as principais unidades do setor central do Sistema Orogênico Mantiqueira e a localização da área de estudo (modificado de Heilbron *et al.*, (2004).
 Legenda: 1) Bacia do Paraná e sedimentos cenozóicos; 2) rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília: 3) nappes inferiores, 4) nappes superiores; Cráton do São Francisco (CSF): 5) embasamento, 6) Supergrupo São Francisco, 7) rochas metassedimentares do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira: 8 e 9) Terreno Ocidental (Domínios Andrelândia e Juiz de Fora), 10) Terreno Paraíba do Sul, 11) Terreno Oriental incluindo 12) arco magmático Rio Negro, 13) Terreno Cabo Frio, 14) Terreno Embu; 15) Orógeno Apiaí (Terreno São Roque). LTC – Limite Tectônico Central da Faixa Ribeira. Modificado de Heilbron *et. al.*, (2004).

As principais características geológicas dos terrenos constituintes da Faixa Ribeira e seu embasamento serão brevemente explicadas abaixo:

- Embasamento Paleoproterozóico–Arqueano: Constituído pelo Complexo Quirino (2,19 e 2,17 Ga), que compreende granitóides tonalítico-granodioríticos inseridos no

Terreno Paraíba do Sul; e Complexo Juiz de fora, que define-se por ortogranulitos, como charnokitos (2,30 Ga) e enderbitos (2,13 Ga) que compõem o Terreno Ocidental da Faixa Ribeira.

- Terreno Ocidental: Subdivide-se nos domínios tectônicos Andrelândia e Juiz de Fora. Intercalação tectônica entre as rochas do Complexo Juiz de Fora e metassedimentos (xistos, quartzitos e migmatitos) Neoproterozóicos da Megassequência Andrelândia, ambos metamorfisados em fácies granulito.

- Terreno Oriental: Subdivide-se em três domínios estruturais: Cambuci, Costeiro e Italva, sendo constituídos por sequências metassedimentares distintas. Além dos metassedimentos, compreende os ortognaisses do Complexo Rio Negro (790-620 Ma), que corresponde ao arco magmático da Faixa Ribeira, e diversas rochas granitóides das etapas sin a póscolisionais.

- Terreno Paraíba do Sul: Corresponde a uma Klippe, sobre o Terreno Oriental, constituída de metassedimentos de alto grau, pelíticos e carbonáticos, com intercalações de ortognaisses do Complexo Quirino e rochas granitóides brasileiras.

- Terreno Cabo Frio: Limitado por zona rúptil NNW-SSE, corresponde a metassedimentos de alto grau. Possui idade Cambriana, sendo vinculado a uma colisão tardia (ca.535-510 Ma) , denominado por Orogênese Búzios (Schmitt, 2000 *apud* Heilbron *et al.*, 2004).

Além das províncias pré-cambrianas, a região de estudo é de fato representada, pela extensa cobertura sedimentar cenozóica, conhecida como porção emersa da Bacia de Campos. A evolução da Bacia de Campos será explicada resumidamente a seguir.

4.3) Geologia da Bacia de Campos

A Bacia de Campos está localizada na região costeira, entre o norte do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo, abrangendo uma área de cerca de 100.000 km², sendo que 500 km² correspondem a sua porção emersa. Tem como limite norte o Alto de

Vitória, que a separa da Bacia do Espírito Santo, e como limite sul o Alto de Cabo Frio, que a separa, da Bacia de Santos.

A evolução tectono-sedimentar desta bacia está associada ao processo de reativação tectônica mesozoica-cenozoica, que culminou com a ruptura do paleocontinente Gondwana e abertura do oceano Atlântico-Sul, denominada Evento Sul-Atlântico (Schobbenhaus *et al.*, 1984 *apud* Riccomini *et al.*, 2004). O início da fase de rifte é marcado por intenso vulcanismo representado pelos derrames basálticos da Fm. Cabiúnas (Halteriviano), com idade correlacionável a dos derrames Serra Geral, da bacia do Paraná. A Fm. Cabiúnas constitui a base do pacote sedimentar e embasamento econômico da Bacia de Campos.

Diversos autores analisaram a estratigrafia desta bacia, tendo em comum o foco na litoestratigrafia. Schaller (1973 *apud* Winter *et al.*, 2007), confeccionou a primeira carta estratigráfica da bacia com base nos dados dos primeiros poços perfurados na bacia. A partir disso, foram realizadas diversas atualizações, com destaque para Rangel *et al.* (1994). Winter *et al.* (2007) propôs uma revisão da estratigrafia da Bacia de Campos com ênfase na análise cronoestratigráfica, no qual mapeou as principais sequências deposicionais que possuem registro nas demais bacias costeiras brasileiras.

Segundo Winter *et al.* (2007), o arcabouço sedimentar pode ser dividido em três supersequências associadas a evolução do rifte: Supersequência Rifte ou Continental; Supersequência Pós Rifte ou Transicional; e Supersequência Drifte ou Marinha.

- Supersequência Rifte:

Corresponde ao registro de uma expressiva sedimentação siliciclástica e carbonática, associada a lagos tectonicamente controlados. O registro dessa supersequência ocorre na Fm. Itabapoana (siliciclásticos proximais e de borda de falha), Fm. Atafona (siliciclásticos associado a ambiente alcalino) e Coqueiros (folhelhos e coquinas), reunidas no Grupo Lagoa Feia (elevado a grupo por esse autor).

- Supersequência Sin-Rifte

É caracterizada por depósitos associados a um período de quiescência tectônica, ocorrendo sobreposição de sedimentos marinhos aos sedimentos lacustres. Compreende os depósitos siliciclásticos da Fm. Itabapoana, sedimentos carbonáticos, margas e arenitos, das Formações Gargaú e Macabu e evaporitos da Formação Retiro,

depositadas no andar Aptiano médio e superior do Grupo Lagoa Feia. A halocinese constitui importante condicionante na configuração sequências mais jovens, pois moldou o assoalho marinho e criou caminhos preferenciais para as areias depositadas no Cretáceo Superior (Winter *et al.*, 2007).

- Supersequência Drifte

Compreende sedimentos marinhos associados a um regime de subsidência térmica, relacionada a tectonismo adiastrófico. Engloba a sequência de plataforma rasa; com sedimentação marinha transgressiva do Grupo Macaé e as sequências de sedimentação marinha transgressivo e marinha regressiva do Grupo Campos.

A sequência plataformal, de idade Eo a Mesoalbiana, inclui as porções basal e superior do Grupo Macaé. A porção basal (Neoaptiano e o Eoturoniano) é composta pelas Formações Goitacás e Quissamã, que compreendem sedimentos siliclásticos relacionados a uma complexa associação de leques aluviais, leques Deltaicos e fan-deltas, além de bancos e lagunas calco-pelíticos, ao longo da borda oeste da bacia. A porção superior é composta por calcilitos da Formação Outeiro, conglomerados polimíticos e arenitos da Formação Goitacás e arenitos hiperpicnais da Formação Namorado. As margas da Formação Imbetiba (Cenomaniano) correspondem a sequência transgressiva do Grupo Macaé, possuindo no seu limite inferior a discordância que marca a transição do Cretáceo inferior para o Cretáceo superior.

O Grupo Campos abrange as sequências transgressiva e progradante, com deposição entre o Cretáceo superior e o Terciário inferior. A primeira compreende as Formações Ubatuba (Membro Tamoios), Carapebus e Emborê (Membro São Tomé - fácies clástica), composta por arenitos plataformais avermelhados, de depósitos de leques deltaicos, que gradam para folhelhos e margas distais, com corpos arenosos intercalados. A sequência progradante (Paleoceno – Pleistoceno), compreende as Formações Ubatuba (Membro Geribá), Carapebus, Emborê (Membro São Tomé, Grussaí e Siri) e a Formação Barreiras. É composta por arenitos conglomeráticos e lamas costeiras (Fm. Barreiras), arenitos conglomeráticos e carbonatos plataformais (Fm. Emborê), que gradam para folhelhos e margas distais, intercalados com arenitos, da

Formação

Ubatuba.

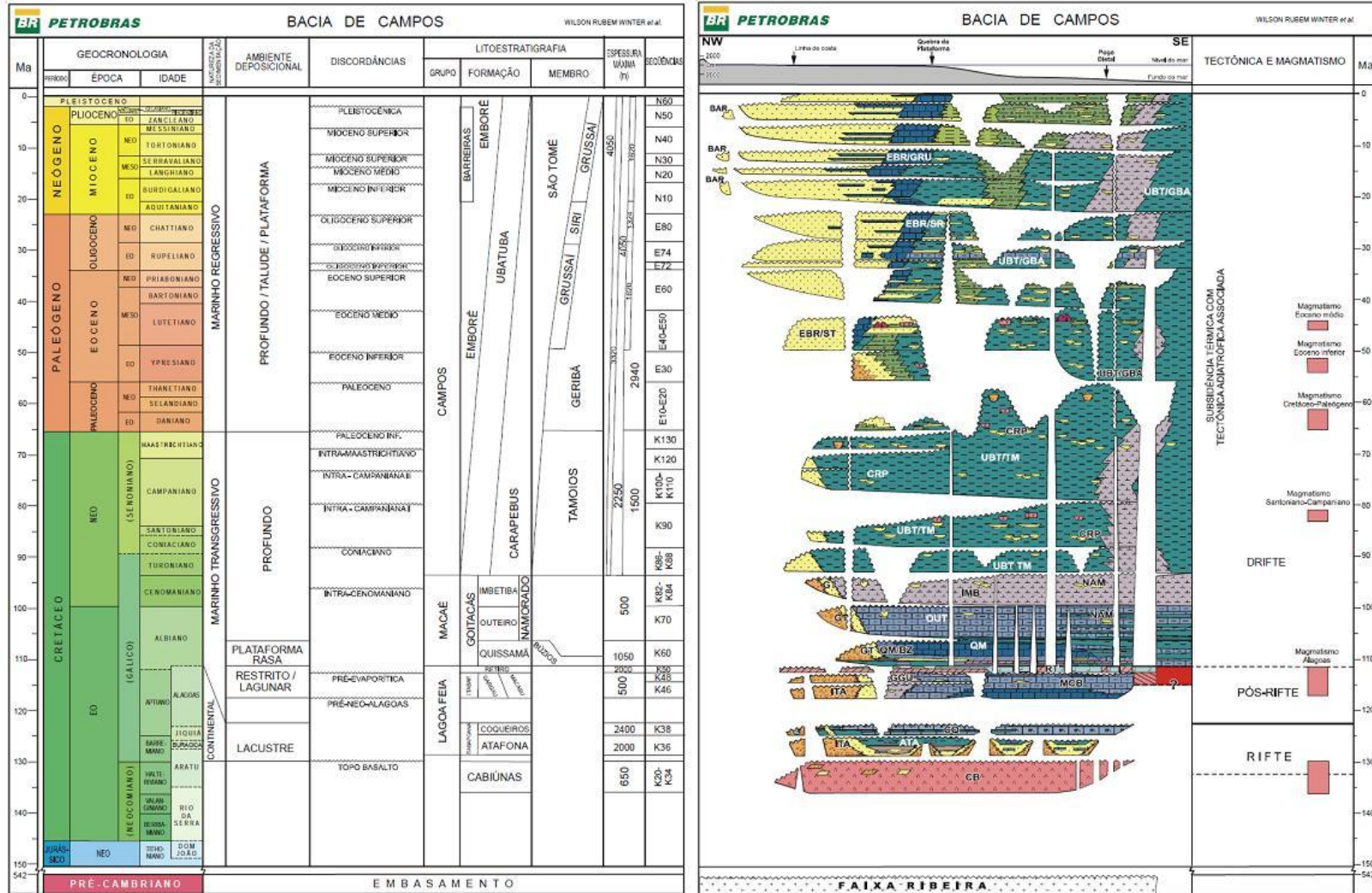


Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia de Campos (Winter et al., 2007)

4.3.1) Geologia da porção emersa da Bacia de Campos

A área de estudo compreende a porção emersa da bacia de Campos, ocorrendo como unidades aflorantes: rochas pré-cambrianas do embasamento, correspondentes a unidade Bela Joana, Unidade São Fidélis e Granito Itaoca; depósitos continentais, de idade pliocênica, da Formação Barreiras; e sedimentos quaternários, como aluviões, coluviões, areias marinhas e lagunares. O mapa da geologia da porção emersa da Bacia de Campos (RJ), (Anexo 1), se insere no PROJETO EMBORÊ, uma parceria entre o DRM-RJ e a UFRJ. A seguir, será realizada uma breve descrição das principais unidades aflorantes, com base no trabalho de Silva e Cunha, (2001).

Embasamento

A unidade São Fidélis, que representa a maior área de ocorrência do Complexo Paraíba do Sul, é constituída essencialmente por metassedimentos detríticos, pelito-grauvaqueanos: granada-biotita-(silimanita) gnaisses quartzo-feldspáticos (metagrauvas), com ocorrência generalizada de bolsões e veios de leucossomas graníticos derivados de fusão parcial *in situ* e injeções Variedades portadoras de cordierita e sillimanita (kinzigitos), comumente apresentando horizontes de xistos grafitosos, exibem contatos transicionais com os granada-biotita gnaisses. De ocorrência mais restrita, por vezes são observadas intercalações de quartzitos (qz), rochas metacarbonáticas e calcissilicáticas (ca), além de corpos de anfibolitos e concentrações manganésíferas.

A unidade Bela Joana compreende granitóides de cor cinza-escuro a esverdeado, de granulação média a grossa, frequentemente porfiríticos, com fenocristais euédricos de feldspato de até 2cm. São constituídos de quartzo, feldspato esverdeado, orto e clinopiroxênio em pequenos prismas pretos a esverdeados, granada rósea e pouca biotita. São isotrópicos, apresentando, próximo aos contatos, foliação cataclástica que imprime uma textura gnáissica. Petrograficamente, os termos mais frequentes são os charnoenderbitos com variações para charnockitos e noritos.

O granito Itaoca, segundo Silva e Cunha (2001), está inserido em um grupo de diversos granitóides pós tectônicos, de idade cambriana. Estes corpos apresentam formas geralmente circulares, discordantes das estruturas regionais NE-SW das encaixantes, com as quais mostram contatos abruptos e térmicos. Ocorrem também como corpos tabulares, diques e pequenos batólitos. As estruturas internas são homogêneas, isotrópicas, ou podem ser

anisotrópicas, quando apresentam estruturas de fluxo magmático ou deformações em suas bordas. Veios e diques aplíticos tardios são constantes, o mesmo acontecendo com bolsões pegmatíticos de formato irregular. A composição é (hornblenda)-biotita granitóides do tipo-I, de granulação fina a média, textura equigranular a porfirítica, localmente com foliação de fluxo magmático preservado.

Formação Barreiras

Constitui uma das unidades mais expressivas da faixa litorânea, se estendendo desde o Amapá até o Rio de Janeiro (Batista *et al.*, 1984 *apud* Silva e Cunha, 2001). Os afloramentos ocorrem sob a forma de extensos tabuleiros ou falésias, de vários metros de altura. Esta unidade aflora na região de Carapebus-Quissamã e, mais restritamente, próximo às cidades de Búzios e Macaé, sendo a área de maior expressão na região do Delta do rio Paraíba do Sul.

Esse pacote sedimentar é constituído de três unidades: areias grossas a conglomeráticas, com matriz caulínica e estruturas de estratificação cruzada planar na base do pacote; uma unidade intermediária composta de interlaminções de areias grossas quartzosas com matriz areno-argilosa e argilas arroxeadas levemente arenosas; e, no topo do pacote, um nível de argilas de cores vermelha e branca (Ferrari *et al.*, 1981 *apud* Silva e Cunha, 2001).

Sedimentos Quaternários

Na área de estudo ocorre uma série de depósitos sedimentares pleistocênicos e holocênicos, associados a sistemas deposicionais de origem continental e transicional/marinho, incluindo depósitos colúvio-aluvionares e marinhos a lagunares (Silva e Cunha, 2001).

Os depósitos colúvio-aluvionares, são relacionados às porções proximais, e compreendem depósitos fluviais areno-siltico-argilosos, com camadas de cascalhos, associados a depósitos de tálus junto à base e à meia encosta dos tabuleiros da Formação Barreiras. Na porção mais distal, localizados em regiões de baixa declividade e ao longo das drenagens, compreendem sedimentos arenosos e lamosos, eventualmente com cascalheiras, geralmente bem estratificados, refletindo deposição a partir de fluxos torrenciais canalizados e não canalizados. Encontram-se subdivididos em depósitos de fundo de canal, de planície de inundação, de rompimento de diques marginais e de meandro (barra de pontal),

correlacionados na área de estudo à planície fluvial do rio Paraíba do Sul. Também ocorrem como sedimentos lacustrinos retrabalhados, localizados na margem norte da Lagoa Feia.

Os sedimentos marinhos e/ou lagunares são constituídos por areias quartzosas esbranquiçadas, finas a médias, bem selecionadas, apresentando estratificação plano-paralela com mergulho suave em direção ao mar; recobertas por areias eólicas com granulometria mais fina, em forma de depósitos eólicos mantiformes, quando próximos à linha de costa, ou na forma de dunas transgressivas, quando mais interiorizadas. Segundo Martin *et al.* (1997), na planície situada na desembocadura do rio Paraíba do Sul, os depósitos arenosos pleistocênicos são bem desenvolvidos, sobretudo na porção sul, entre Barra do Furado e Macaé.

4.4) Geomorfologia

A área de estudo abrange, segundo Gatto *et al.* (1983) em trabalho inserido no Projeto RADAMBRASIL, a Região das Planícies Costeiras e a Região dos Tabuleiros Costeiros, inseridas no Domínio dos Depósitos Sedimentares. A Região das Planícies Costeiras é representada pela unidade geomorfológica Planícies Litorâneas e Delta do Paraíba do Sul, dividida em duas subunidades. A área de estudo engloba a subunidade Delta do Paraíba do Sul, que constitui um complexo deltaico caracterizado por um conjunto de ambientes sedimentares relacionados principalmente às fases de progradação costeira, tendo como fatores fundamentais na sua configuração a influência marinha, o regime fluvial e atividade tectônica. A Região dos Tabuleiros Costeiros é constituída, na área de estudo, por depósitos argilo-arenosos da Formação Barreiras. Apresenta como limite a oeste a unidade Colinas e Maciços Costeiros, e a leste entra em contato com o mar ou apresenta alguns trechos limitados pelo Delta do Paraíba do sul. Comumente em direção ao litoral, apresenta relevo marcado por falésias, que podem ou não estar em contato com o mar. No primeiro caso, as falésias apresentam depósitos ferruginizados, correspondentes às variações do nível do lençol freático, em função de flutuações do nível do mar, encontrando-se na base desses perfis níveis areníticos calcificados do tipo *beach rock*.



Figura 5: Mapa geomorfológico da área de estudo e adjacências (modificado de Gatto et al., 1983)

4.5) Hidrogeologia da Bacia de Campos

Os aquíferos sedimentares da porção emersa da Bacia Campos têm sido na última década alvo de vários estudos, como Caetano (2000), Capucci (2003), Barreto (2000) e Martin *et al.* (2006), porém há dúvidas quanto à divisão e compartimentação destes aquíferos, devido à falta de consenso de sua estratigrafia.

Conforme Barreto *et al.* (2000), a evolução estrutural da Bacia de Campos é fundamental para a definição da geometria de seus depósitos, onde falhas normais NE-SW moldam o arcabouço da parte emersa. Já os lineamentos NW-SE formam um gráben a SW da cidade de Campos, em que a oeste ocorrem os sedimentos flúvio-deltaicos e a leste uma cunha sedimentar relacionada a depósitos da Formação Emborê, localizada na região do Farol de São Tomé.

Os autores Martins *et al.* (2006), Barreto (2000), Caetano (2000) e Capucci (2003) adotaram denominações e divisões diferenciadas para os aquíferos Barreiras e São Tomé I e II da bacia de Campos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2– Correspondência entre os aquíferos da Bacia de Campos (modificada de Martins et al., 2006).

Caetano, (2000)	Barreto, et al.(2000)	Capucci, (2003) e Martins et al.,(2006)
Quaternário Deltaico	Flúvio Deltaico	Aluviões de Campos
Terciário Formação Barreiras	São Tomé II	Formação Barreiras Recente
	São Tomé I	
	Barreiras	Formação Barreiras Primitiva
Terciário Formação Emborê	Emborê	Emborê

Segundo Caetano (2000), os sedimentos neogênicos e paleogênicos desta bacia correspondem às formações Barreiras e Emborê, respectivamente. Este autor definiu a ocorrência de três aquíferos: Quaternário deltaico, Terciário Formação Barreiras e Terciário Formação Emborê. A Formação Barreiras está em parte aflorante e parte soterrada por sedimentos pleistocênicos.

A denominação adotada por Barreto *et al.* (2000) para os sistemas aquíferos (Figura 6) foi: Flúvio-deltaico, Emborê (com redefinição de seus limites e indagações sobre sua correlação aos sedimentos da Formação Emborê), São Tomé I e II (divisão do aquífero São Tomé devido à diferença de espessura e algumas características hidrodinâmicas), e Barreiras. Outros sistemas aquíferos de menor extensão ainda podem ser descritos. Possuem normalmente menor expressão, mas nem por isto são menos importantes que os ligados às bacias sedimentares de maior pujança. Alguns destes aquíferos podem atingir produtividades substanciais, sendo fundamentais para as localidades onde se encontram. Para a área de estudo são os aquíferos Cordões, Restingas e Cordões Litorâneos e o Aquífero Alúvio Lacustre.

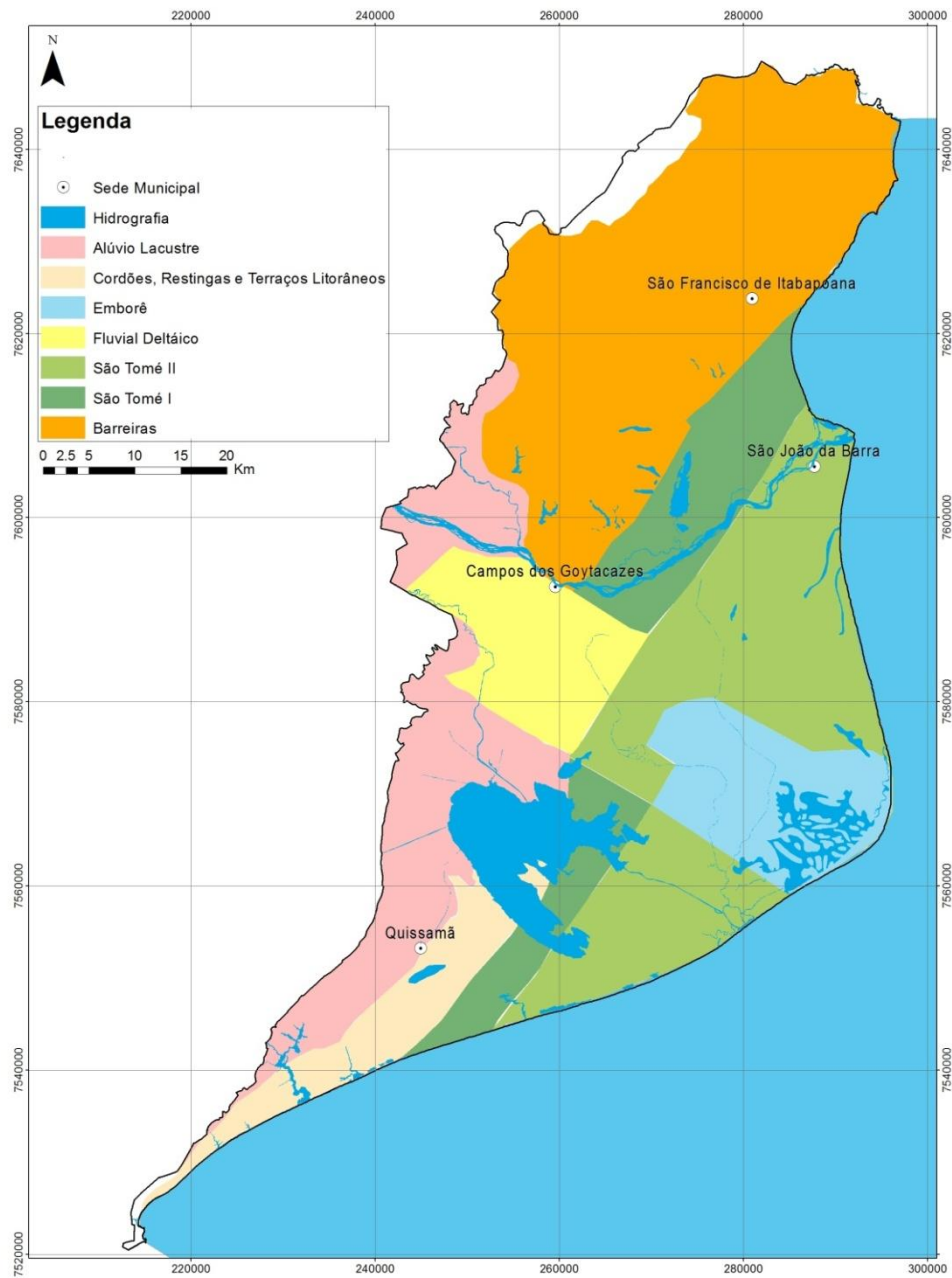


Figura 6: Sistemas aquíferos sedimentares da porção emergida da Bacia de Campos (modificado de Barreto *et al.*, 2000).

Martins *et al.* (2006) definem os aquíferos sedimentares a partir de aspectos geotectônicos (reconhecimento de três blocos resultantes da reativação tectônica: os altos estruturais de São Francisco do Itabapoana, a norte, e Quissamã, a sul; e o bloco rebaixado de Campos e São João da Barra ao centro), litológicos e da qualidade das águas subterrâneas. Os

aquíferos foram definidos como (Figura 7) Barreiras primitiva, Barreiras recente, Emborê e Aluviões de Campos.

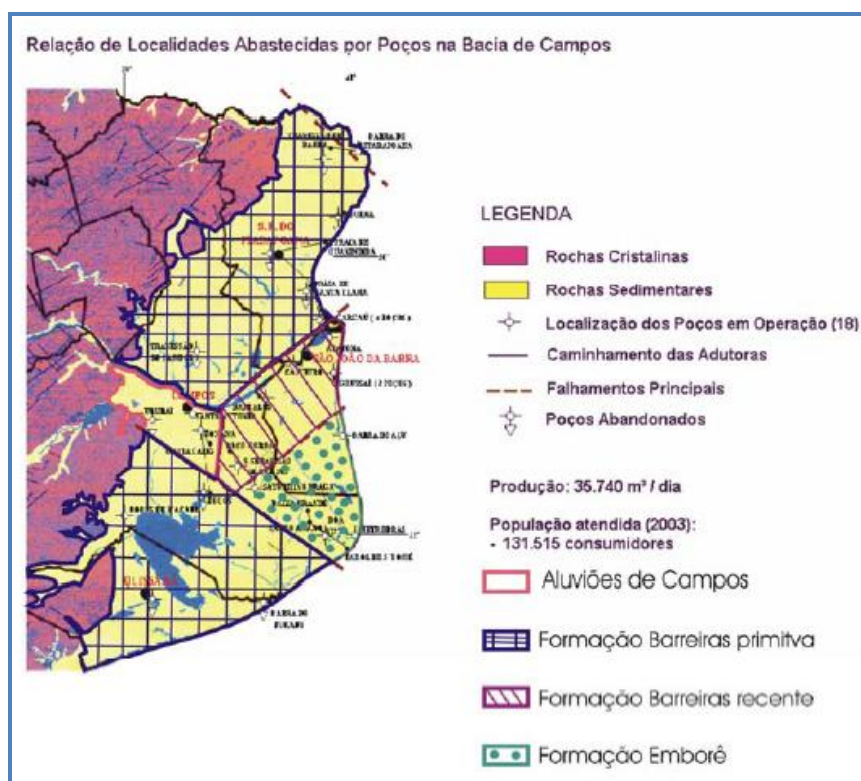


Figura 7 - Subdivisão dos aquíferos sedimentares da bacia de Campos, segundo Martin et al., (2006).

Apesar da discussão sobre a divisão dos aquíferos da Bacia de Campos na área de estudo, o aquífero da Formação Barreiras possui caracterização similar em ambos os estudos, Barreto, et al.(2000) e Martins *et al.* (2006), que o denominaram como aquíferos Barreiras e aquífero Formação Barreiras Primitivo. No presente estudo foi adotado o termo aquífero Barreiras, devido à correlação com a atual estratigrafia desta bacia (Winter *et al.*, 2007).

O aquífero Barreiras, situado na borda oeste da bacia de Campos, faz contato lateral com o embasamento cristalino, ocorrendo em uma área de aproximadamente 1630km². É constituído por sedimentos terciários aflorantes, que cobrem os dois altos estruturais, compostos por argilas lateríticas e areias com óxido de ferro, sobrepostos ao embasamento cristalino. Trata-se de um aquífero livre, pouco produtivo, de baixa permeabilidade, com vazões máximas da ordem de 2 m³/h e capacidade específica média de 0,33m³/h/m. Salienta-se que compreende o aquífero de menor qualidade da região. Possui águas normalmente ferruginosas. Com espessura crescente em direção ao litoral, alcançando 216m em Gargaú, município de São Francisco do Itabapoana.

5) METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado nas seguintes etapas:

5.1) Compilação e seleção dos dados

Os dados do presente trabalho são uma compilação de informações de poços profundos da porção emersa da bacia de campos. A compilação é composta de dados utilizados no trabalho de Caetano (2000), o qual apresenta um cadastramento de diversos poços profundos da região da baixada campista, mais os dados de trabalhos anteriores e atuais do Laboratório de Hidrogeologia UFRJ. Além disso, há dados do cadastro da CPRM – SIAGAS e de outras fontes. Os Anexos 2 e 3 contemplam os dados dos poços, com suas respectivas coordenadas UTM, e a respectiva fonte da informação.

5.2) Geoprocessamento dos dados selecionados

Afim de melhor compreender a espacialização dos dados e seu contexto hidrogeológico, os poços selecionados foram plotados em uma base de SIG utilizando-se o programa *ArcGIS*[®], versão 9.3. Sobrepondo-se a localização geográfica dos poços no mapa hidrogeológico da área de estudo foi possível obter uma classificação inicial dos poços por aquífero. Sobre esta, foram desenvolvidas elaborações e argumentações, que buscaram analisar e caracterizar padrões hidrogeoquímicos para amostras de um mesmo aquífero.

Além disso, com o programa *ArcGIS 9.3.*, foram confeccionados mapas de isotores para os parâmetros pH, Condutividade Elétrica e Cloreto. Esses mapas foram feitos através da ferramenta *Spatial Analyst->Interpolate to raster-> Inverse distance weighted*.

5.3) Caracterização e Modelagem hidrogeoquímica

Utilizando-se o programa *AquaChem* da *Schlumberger Water Services*, versão 2011.1, foram realizadas elaborações de caracterização hidrogeoquímicas, como Diagramas de Piper, Schoeller e de Dispersão, com o intuito de ilustrar e melhor compreender os padrões dos tipos de águas existentes na área de estudo.

Para se obter um melhor entendimento dos processos hidrogeoquímicos em um aquífero, são necessárias caracterizações mais específicas. Com essa visão e com o intuito de contribuir para as características do aquífero Embora foram calculados os índices de saturação

relativos às espécies minerais mais importantes para as amostras de água dos poços BF-01, BF-02 e BF-03, realizados à fronteira entre os municípios de Quissamã e Campos, na localidade de Barra do Furado. Tais cálculos foram realizados utilizando o programa *PHREEQCi 2.18* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (Parkhurst e Appelo, 2005). Desse modo o estado de saturação das amostras de águas subterrâneas para minerais relevantes e a especiação iônica foram calculados com o código PHREEQC, a fim de investigar os controles termodinâmicos sobre a composição da água. A base de dados termodinâmica aplicada foi a *phreeqc.dat*. Estes cálculos dão os índices de saturação (SI) de minerais que poderiam estar reagindo no sistema. O SI é calculado como:

$$SI = \log_{10} (IAP/K_T),$$

onde o *IAP* é o produto de atividade iônica da reação água- mineral e *K_T* é a constante termodinâmica de equilíbrio ajustada para a temperatura da amostra.

Também foram realizadas algumas simulações com o *PHREEQCi* visando compreender o funcionamento do sistema aquífero Emborê na área dos poços perfurados pela UFRJ, com base em suas características hidrogeoquímicas. Essas simulações envolveram a mescla de soluções para avaliar as proporções prováveis de águas subterrâneas ou superficiais que contribuem para a composição hidroquímica de um aquífero (comando MIX) e a modelagem inversa, usada para calcular a quantidade de matéria de minerais e gases que deve dissolver ou precipitar para dar conta da diferença na composição entre os membros inicial e final de água (comando INVERSE MODELING), segundo APPELO E POSTMA (2005). Os caminhos de fluxo foram selecionados com base na hidrogeologia da área de estudo (padrão de variação da química da água, carga hidráulica variação dentro do sistema de fluxo regional, e a localização geográfica do ponto da amostragem (Belkhiri et al., 2011).

Após essas etapas foram consistidos e sistematizados os resultados obtidos e realizada uma discussão seguida das conclusões.

6) RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1) Compilação e seleção de dados

De posse dos dados foi feita uma primeira seleção das informações que seriam realmente relevantes para o propósito do trabalho. Por exemplo, a compilação feita por Caetano, (2000) conta com 87 poços cadastrados, porém somente 38 possuem algum dado hidroquímico e destes, apenas 9 apresentam dados hidroquímicos básicos balanceados (pH, Condutividade Elétrica e Principais ânions e cátions). Os dados oriundos de projetos anteriores e atuais do Laboratório de Hidrogeologia totalizam 22 poços que apresentam análises químicas balanceadas, logo nenhum dado de poço do Laboratório de Hidrogeologia foi descartado. Ao final dessa primeira etapa, temos que 60 poços levantados poderiam contribuir com os objetivos do presente trabalho, apresentados na Tabela 3– Poços selecionados para estudo

Tabela 3– Poços selecionados para estudo

	Poço	X	Y	Profundidade	Fonte
1	Farol 01	282801	7563714	220	Lab. Hidro UFRJ
2	São Sebastião 02	271520	7581764	170	Lab. Hidro UFRJ
3	Saturnino Braga 03	273187	7577892	137,5	Lab. Hidro UFRJ
4	Donana 04	262475	7585579	104,0	Lab. Hidro UFRJ
5	Sto Antônio 05	262289	7589022	70,0	Lab. Hidro UFRJ
6	INB 06	289946	7629650	45	Lab. Hidro UFRJ
7	Aldeia 07	279608	7643925	40	Lab. Hidro UFRJ
8	Sto Amaro 08	280419	7647555	108	Lab. Hidro UFRJ
9	São Paulinho 09	285621	7644726	128	Lab. Hidro UFRJ
10	Lagoa Feia 10	288166	7648020	130	Lab. Hidro UFRJ
11	Morro do Bode 11	288564	7645821	100	Lab. Hidro UFRJ
12	Atafona 12	291591	7606720	210	Lab. Hidro UFRJ
13	Grussaí 13	289432	7600431	161	Lab. Hidro UFRJ
14	Gargaú 14	285445	7612155	138	Lab. Hidro UFRJ
15	Degredo 15	282320	7596882	178	Lab. Hidro UFRJ
16	Barcelos 16	273794	7594558	158	Lab. Hidro UFRJ

17	Fazenda Vista Alegre I	242679	7555852	36	Lab. Hidro UFRJ
18	Fazenda Machadinho	246817	7561440	128	Lab. Hidro UFRJ
19	Fazenda Vista Alegre II	242713	7556023	30	Lab. Hidro UFRJ
20	BF-01	257811	7591236	250	Lab. Hidro UFRJ
21	BF-02	219123	7501522	250	Lab. Hidro UFRJ
22	BF-03	212345	7123454	150	Lab. Hidro UFRJ
23	27-URU	252600	7586400	150	Caetano, (2000)
24	28-URU	252750	7585850	144	Caetano, (2000)
25	32-ANA	262600	7585950	96	Caetano, (2000)
26	33-ANA	262550	7585950	96,3	Caetano, (2000)
27	52-SCL	284474	7617678	161	Caetano, (2000)
28	53-SJB	287732	7604453	200	Caetano, (2000)
29	55-GAR	286133	7612400	163	Caetano, (2000)
30	58-GAR	285150	7612000	155	Caetano, (2000)
31	39-FAR	283054	7562245	160	Caetano, (2000)
32	40-FAR	283360	7563216	168	Caetano, (2000)
33	03-GOY	264090	7584650	100	Caetano, (2000)
34	10-RAI	263600	7591450	135	Caetano, (2000)
35	24-PGF	258500	7571500	61,4	Caetano, (2000)
36	29-ANA	262650	7585950	104	Caetano, (2000)
37	30-URU	252100	7586600	29	Caetano, (2000)
38	31-BEC	262250	7588950	77	Caetano, (2000)
39	38-TOC	261150	7578700	115	Caetano, (2000)
40	35-GRU	287620	7597126	176	Caetano, (2000)
41	41-SSE	271436	7581719	170	Caetano, (2000)
42	54-BAR	273797	7594543	158	Caetano, (2000)
43	56-SES	289600	7597973	203	Caetano, (2000)
44	57-GRU	287732	7597200	176	Caetano, (2000)

45	59-GAR	285450	7611020	166	Caetano, (2000)
46	61-BAR	274133	7595333	152	Caetano, (2000)
47	68-DMA	241250	7566250	68	Caetano, (2000)
48	81-GAR	284343	7611375	150	Caetano, (2000)
49	82-GAR	283843	7610863	216	Caetano, (2000)
50	83-GAR	285473	7611027	138	Caetano, (2000)
51	84-BIT	294324	7643665	118,9	Caetano, (2000)
52	88-GRU	288183	7597545	161	Caetano, (2000)
53	92-FAR	283100	7562200	220	Caetano, (2000)
54	36-SAB	273136	7577833	137,5	Caetano, (2000)
55	76-GRU	289400	7599750	220	Caetano, (2000)
56	77-ATA	289735	7606762	210	Caetano, (2000)
57	79-AÇU	293791	7577601	210	Caetano, (2000)
58	25 - Usina Santo Amaro	279681	7571173	205	Caetano, (2000)
59	25/26 (GOY)	264700	7584650	100	Caetano, (2000)
60	07(TOC)	264000	7576300	198	Caetano, (2000)

Um dos objetivos do trabalho consiste em classificar os possíveis tipos de água dos diferentes aquíferos, utilizando para isso, diagramas como o de Piper. Porém dos 60 poços úteis apenas 34 satisfazem os parâmetros necessários para a classificação. E, a fim de qualificar os dados analisados, foi calculado o erro analítico, definido anteriormente, para essas amostras. Segundo a literatura são admitidos erros analíticos de até 10%.

Os dados utilizados são de datas distintas, principalmente os utilizados por Caetano (2000), cuja base possui dados de décadas passadas, e portando erros analíticos um pouco acima do tolerável foram admitidos, tendo em vista que os procedimentos de coleta e análises antigos não eram tão regulados como hoje em dia. Algumas amostras de datas mais recentes, como as do Laboratório de Hidrogeologia, também mostraram erros analíticos superiores ao permitido, porém foram consideradas de baixa qualidade informativa nas discussões dos

resultados. A Tabela 4, mostra o erro analítico calculado para as amostras de íons básicos completos.

Tabela 4 - Cálculo de erro analítico (%) para as amostras de íons básicos completos.

Poço	erro (%)	Fonte
27-URU	-0.41	Caetano, (2000)
28-URU	-23.70	Caetano, (2000)
30-URU	9.09	Caetano, (2000)
32-ANA	-0.34	Caetano, (2000)
33-ANA	-12.96	Caetano, (2000)
52-SCL	-98.88	Caetano, (2000)
53-SJB	14.52	Caetano, (2000)
55-GAR	-100.52	Caetano, (2000)
58-GAR	-117.61	Caetano, (2000)
39-FAR	-16.70	Caetano, (2000)
40-FAR	-35.14	Caetano, (2000)
88-GRU	8.62	Caetano, (2000)
Fazenda Vista Alegre I	3.61	Lab. Hidro. UFRJ
Fazenda Machadinha	-6.26	Lab. Hidro. UFRJ
Fazenda Vista Alegre II	-10.64	Lab. Hidro. UFRJ
Farol 01	0.26	Lab. Hidro. UFRJ
São Sebastião 02	0.77	Lab. Hidro. UFRJ
Saturnino Braga 03	0.40	Lab. Hidro. UFRJ
Donana 04	0.40	Lab. Hidro. UFRJ
Sto Antônio 05	-0.13	Lab. Hidro. UFRJ
INB 06	0.20	Lab. Hidro. UFRJ
Aldeia 07	-15.09	Lab. Hidro. UFRJ
Sto Amaro 08	-14.88	Lab. Hidro. UFRJ
São Paulinho 09	-19.03	Lab. Hidro. UFRJ
Lagoa Feia 10	-24.04	Lab. Hidro. UFRJ
Morro do Bode 11	-16.83	Lab. Hidro. UFRJ
Atafona 12	1.19	Lab. Hidro. UFRJ
Grussaí 13	-0.30	Lab. Hidro. UFRJ
Gargaú 14	-2.77	Lab. Hidro. UFRJ
Degredo 15	-0.18	Lab. Hidro. UFRJ
Barcelos 16	-1.46	Lab. Hidro. UFRJ
BF-01	2.71	Lab. Hidro. UFRJ
BF-02	11.33	Lab. Hidro. UFRJ
BF-03	5.98	Lab. Hidro. UFRJ

Dos poços que satisfazem os parâmetros do Diagrama de Piper, 15 poços apresentam erro iônico acima de 10%. Os poços 52-SCL, 55-GAR e 58-GAR apresentam erros analíticos exageradamente fora do aceitável, e por isso foram descartados das análises de classificação de tipos de águas.

6.2) Classificação dos poços por aquíferos

Sobre o mapa hidrogeológico de Barreto *et, al.* (2001), foram plotados os poços utilizados (Figura 8), sendo possível realizar a classificação de cada poço por sistema aquífero. A Figura 9 e Figura 10 ilustram com maior detalhe o posicionamento dos poços por aquíferos. As elaborações e argumentações desenvolvem-se a partir dessa classificação inicial, buscando analisar e caracterizar padrões hidrogeoquímicos para amostras de um mesmo aquífero. A Tabela 5, sumariza a classificação dos poços por aquíferos.

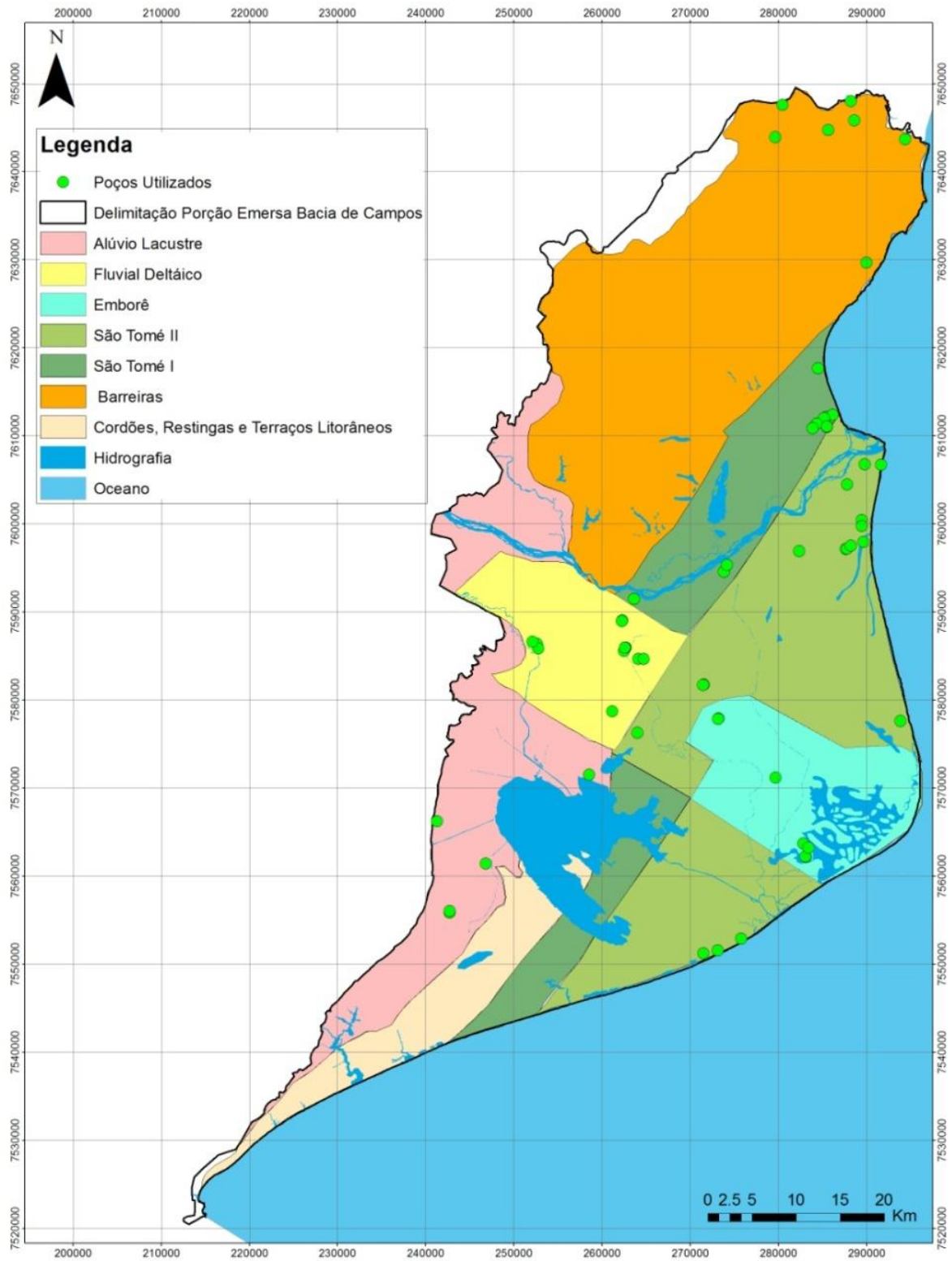


Figura 8- Distribuição dos poços utilizados sobre os aquíferos, segundo Barreto *et. al.* (2000), da porção emersa da Bacia de Campos.

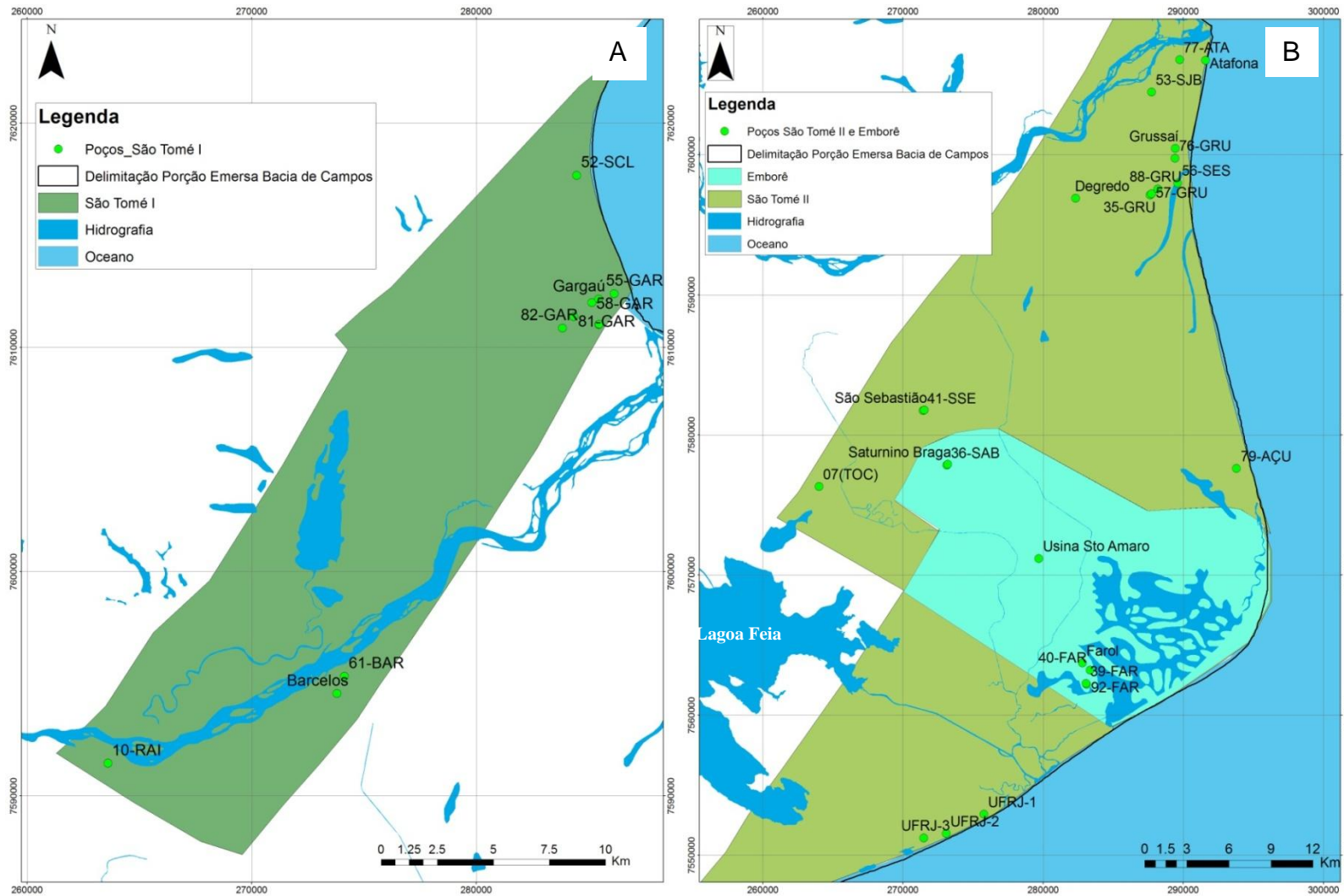


Figura 9- A) Poços pertencentes ao Aquífero São Tomé I; B) Poços pertencentes ao Aquífero São Tomé II e Emborê

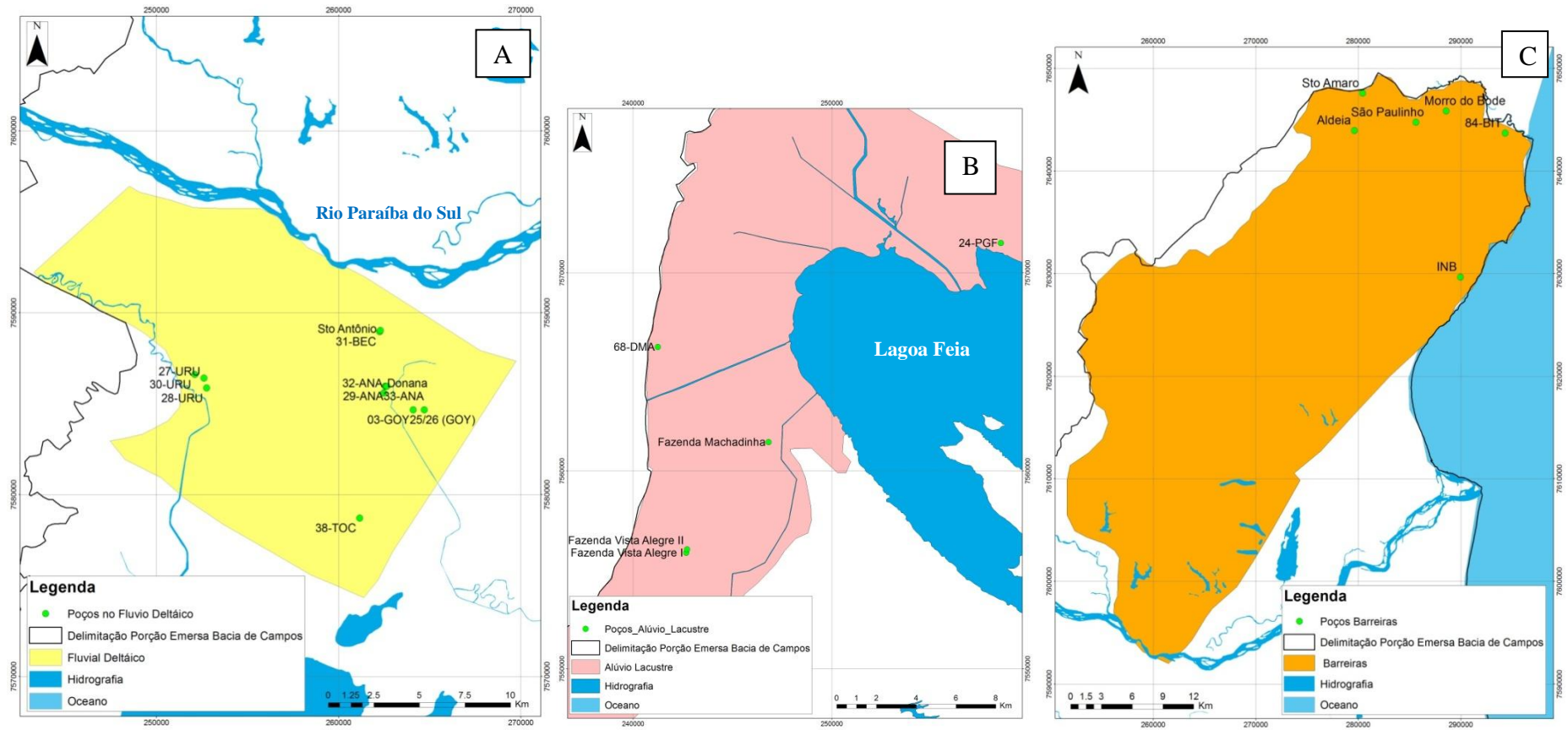


Figura 10 – a- Poços no Aquífero Flúvio-Deltaico; b- Poços no Aquífero Alúvio Lacustre e c- Poços no Aquífero Barreiras.

Tabela 5 - Classificação dos poços por aquíferos

Aquífero	Poço	X	Y	Profundidade
Alúvio Lacustre	24-PGF	258500	7571500	61,4
	68-DMA	241250	7566250	68
	Fazenda Vista Alegre I	242679	7555852	36
	Fazenda Machadinha	246817	7561440	128
	Fazenda Vista Alegre II	242713	7556023	30
Flúvio Deltaico	Donana 04	262475	7585579	104
	Sto Antônio 05	262289	7589022	70
	03-GOY	264090	7584650	100
	25/26 (GOY)	264700	7584650	100
	27-URU	252600	7586400	150
	28-URU	252750	7585850	144
	29-ANA	262650	7585950	104
	30-URU	252100	7586600	29
	31-BEC	262250	7588950	77
	32-ANA	262600	7585950	96
	33-ANA	262550	7585950	96.3
	38-TOC.	261150	7578700	115
São tomé II	São Sebastião 02	271520	7581764	170
	Atafona 12	291591	7606720	210
	Grussaf 13	289432	7600431	161
	Degredo 15	282320	7596882	178
	07(TOC)	264000	7576300	198
	35-GRU	287620	7597126	176
	41-SSE	271436	7581719	170
	53-SJB	287732	7604453	200
	56-SES	289600	7597973	203
	57-GRU	287732	7597200	176
	76-GRU	289400	7599750	220
	77-ATA	289735	7606762	210
	79-AÇU	293791	7577601	210
88-GRU	288183	7597545	161	
São Tomé I	Gargaú 14	285445	7612155	138
	Barcelos 16	273794	7594558	158
	10-RAI	263600	7591450	135
	52-SCL	284474	7617678	161
	55-GAR	286133	7612400	163
	54-BAR	273797	7594543	158
	58-GAR	285150	7612000	155
	59-GAR	285450	7611020	166
	61-BAR	274133	7595333	152
	81-GAR	284343	7611375	150
82-GAR	283843	7610863	216	

	83-GAR	285473	7611027	138
Barreiras	INB 06	289946	7629650	45
	Aldeia 07	279608	7643925	40
	Sto Amaro 08	280419	7647555	108
	São Paulinho 09	285621	7644726	128
	Lagoa Feia 10	288166	7648020	130
	Morro do Bode 11	288564	7645821	100
	84-BIT	294324	7643665	118,88
Emborê	Farol 01	282801	7563714	220
	39-FAR	283054	7562245	160
	40-FAR	283360	7563216	168
	BF-01	257811	7591236	250
	BF-02	219123	7501522	250
	BF-03	212345	7123454	150
	92-FAR	283100	7562200	220
	36-SAB	273136	7577833	137,5
	Saturnino Braga 03	273187	7577892	137,5
	25 - Usina Santo Amaro	279681	7571173	205

Com a base de dados do presente trabalho, apenas cinco poços podem ser classificados como referentes ao Aquífero Alúvio Lacustre. Para o aquífero Flúvio Deltaico, conta-se com uma total de doze poços. Os aquíferos São Tomé I e II totalizam respectivamente com 14 e 12 poços. Note-se que o aquífero São Tomé I é dividido em duas partes, uma ao Norte onde estão todos os poços do aquífero, e a Sul, onde nenhum poço da presente base de dados faz parte. O aquífero Barreiras é representado por sete poços, que se concentram no limite norte da área de estudo.

Embora os poços BF-01, BF-02 e BF-03, estejam sobrepostos ao aquífero São Tomé II (Figura 9- A) Poços pertencentes ao Aquífero São Tomé I; B) Poços pertencentes ao Aquífero São Tomé II e Emborêsão classificados aqui como pertencentes ao aquífero Emborê, já que apresentam características hidrogeológicas segundo dados do projeto como tal. Além disso, já se sabe que o poço BF-03 apresenta características hidrogeológicas distintas dos outros dois. Porém, esses três poços são inicialmente representados como aquífero Emborê para facilitar, sendo sempre destacados ao longo dos resultados e discussões. Portanto, o aquífero Emborê possui dez poços para a sua caracterização.

O domínio hidrogeológico denominado de Cordões Restingas e Terraços Litorâneos não conta com nenhum poço da base de dados, e por isso não é caracterizado neste trabalho.

6.3) Condutividade elétrica, pH e concentração de Cloretos

Das propriedades físico-químicas, o pH, a condutividade e a concentração de cloreto, constituem importantes indicadores de tipos de água de um aquífero. A seguir, serão apresentados os valores desses parâmetros por poço, e os valores médios por sistema aquífero considerados.

Aquífero Alúvio-Lacustre

Contou-se apenas com 5 amostras com média de valores de pH igual a 5,15 sendo o mínimo 4,6 e o máximo 5,61, caracterizando dessa forma uma água relativamente ácida. Para um aquífero com característica essencialmente livre, raso, tais valores são normais e refletem a íntima relação com a água de recarga da chuva. A sedimentação lacustre e o ambiente redutor e ácido que frequentemente está associado a esses materiais também podem contribuir para esses valores de pH. O valor médio de condutividade elétrica é de 1527 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tal valor é bastante elevado para o aquífero e suas condições de contorno e não é muito representativo devido ao pequeno número de amostras e às grandes diferenças de condutividade entre os valores individuais, como por exemplo a amostra Fazenda Machadinho, de maior valor 3240 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e a amostra Fazenda Machadinho II, de menor valor, 441 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de cloretos são muito heterogêneos, variando de 71 a 1800 mg/L. O valor elevado de cloreto do poço 24-PGF é muito contrastante com os demais, podendo refletir somente um erro de leitura da época de coleta, ou ainda uma situação muito localizada, referente a alguma paleoágua ou efeito evaporativo.

Tabela 6: Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Alúvio Lacustre.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet.($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl (mg/L)
24-PGF	61,4	-	-	1800
68-DMA	68	5,61	-	71
Fazenda Vista Alegre I	36	4,60	900	281
Fazenda Machadinho	128	5,40	3240	979
Fazenda Vista Alegre II	30	5	441	114
Média		5,15	1527	649

Aquífero Flúvio-Deltaico

As 12 amostras classificadas como pertencentes ao aquífero Flúvio-Deltaico, apresentam uma média dos valores de pH igual a 7,2, sendo o mínimo 6,5 e o máximo 8, caracterizando uma água próxima a neutralidade. Ambientes fluviais continentais com pacotes espessos de sedimentos podem resultar em águas com tais valores de pH devido a hidrólise dos silicatos presentes com o relativamente longo tempo de trânsito das águas. O valor médio de condutividade elétrica para o aquífero é de 816 $\mu\text{S}/\text{cm}$, variando de 299 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O valor médio de cloreto é 140 mg/L, variando de 25 a 485 mg/L.

Tabela 7 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Flúvio Deltaico.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet.($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl (mg/L)
Donana 04	104	7,3	953	226,03
Sto Antônio 05	70	7,5	299	37,01
03-GOY	100	7,12		485
25/26 (GOY)	100	7,7	1000	
27-URU	150	7,0	1000	25
28-URU	144	7,5	1000	180
29-ANA	104	6,7		106
30-URU	29	7,8		173
31-BEC	77	7,0		55
32-ANA	96	8,0	1000	85
33-ANA	96.3	6,5	462	85,2
38-TOC	115	6,6		78
Média		7,2	816	140

Aquífero São Tomé I

Os poços do aquífero São Tomé I mostram uma variação de pH de 4,6 a 7,9, com média 6,6, caracterizando águas com valores de pH próximos à neutralidade. Seus valores de condutividade elétrica variam de 528 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1132 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resultando em uma média de 998

$\mu\text{S/cm}$. Os valores de cloretos são heterogêneos variando de 67 a 714 mg/L e média de 207mg/L. A situação geológica (estratigráfica e deposicional) é semelhante à do Aquífero Flúvio-Deltaico, sendo os valores tanto de pH como de condutividade elétrica frutos dos mesmos fenômenos.

Tabela 8- Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero São Tomé I.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet.($\mu\text{S/cm}$)	Cl (mg/L)
Gargaú 14	138	5,2	1132	192,66
Barcelos 16	158	4,6	528	95,95
10-RAI	135	7,32	1000	225
52-SCL	161	7,9	1200	714
55-GAR	163		1449	270
54-BAR	158			71
58-GAR	155		680	126
59-GAR	166	7,2		102
61-BAR	152	6,6		78
81-GAR	150	6,86		91,5
82-GAR	216	6,36		453,7
83-GAR	138	7,4		67
Média		6,6	998	207

Aquífero São Tomé II

Os poços do aquífero São Tomé II mostram uma média de valores de pH de 6,8, variando de 4,3 a 8,4, o que caracteriza águas relativamente neutras. A situação é semelhante à do aquífero Flúvio-deltaico, com pacotes relativamente espessos de sedimentos arenosos arcoseanos e efeito de hidrólise de silicatos. O pH da amostra Degredo 15 é anômalo com respeito à média local e difícil de explicar considerando a profundidade do poço, podendo indicar erro analítico. A condutividade elétrica varia de 529 $\mu\text{S/cm}$ a 1626 $\mu\text{S/cm}$, com valor médio de 898,5 $\mu\text{S/cm}$. Os valores de cloreto mostram certa homogeneidade, com mínimo de 88 mg/L e máximo 407mg/L, e valor médio 138,9mg/L. Os valores de salinidade e cloretos

apontam para águas pouco mineralizadas com alguns picos refletindo fenômenos locais, como explicado anteriormente.

Tabela 9- Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero São Tomé II.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet.(μ S/cm)	Cl (mg/L)
São Sebastião-02	170	7,2	1626	407,9
Atafona 12	210	6.8	983	156,61
Grussaí 13	161	6.8	739	143,31
Degredo 15	178	4,3	607	98,86
07(TOC)	198	6,6		
35-GRU	176	7,36		121
41-SSE	170	6,8		88
53-SJB	200		850	134
56-SES	203			85
57-GRU	176			121
76-GRU	220	7.1	896	161,7
77-ATA	210	7	958	137,2
79-AÇU	210	8,4	529	28,9
88-GRU	161			123
Média		6,8	898,5	138,9

Aquífero Barreiras

O aquífero Barreiras mostra valores de pH que variam de 3,4 a 7,1 com média de 5, caracterizando uma água relativamente ácida. Esse quadro explica-se basicamente por dois motivos: o caráter hidrogeológico mais livre destes aquíferos e a composição litológica do mesmo, com a presença de óxidos de ferro e outros metais que levam a uma maior acidez do meio. Com relação aos valores de condutividade elétrica tem-se uma média de 855 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com valores que variam de 461 a 1515 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores de cloreto variam de 7 a 404,25 mg/L, e com média de 159 mg/L. Tais valores são semelhantes aos dos demais aquíferos presentes na região de estudo.

Tabela 10 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Barreiras.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl ⁻ (mg/L)
INB 06	45	5,1	355	99,78
Aldeia 07	40	3,55	685	102,09
Sto Amaro 08	108	4,52	461	54,79
São Paulinho 09	128	7,81	1515	332,32
Lagoa Feia 10	130	3,4	1464	404,25
Morro do Bode 11	100	4,21	655	110,25
84-BIT	118,88	6,5		7
Média		5,0	855	159

Aquífero Emborê

As amostras dos poços do Aquífero Emborê apresentam valores de pH de 7 a 8,2, com média de 7,5, caracterizando águas quimicamente de caráter neutro. Há uma notável semelhança entre os valores de pH das amostras desse aquífero, quando comparadas aos demais corpos hídricos regionais. Os valores de condutividade elétrica variam de 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 3951 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com uma média de 839 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Essa média não é muito representativa, já que a maioria dos valores varia de 300 – 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e apenas a amostra BF-03 possui um valor muito elevado, de 3951 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como já dito, a amostra BF-03, embora classificada neste

trabalho como pertencente ao aquífero Emborê, em verdade pertence à uma porção mais rasa que, próximo à costa ao menos, é claramente diferenciada daquele aquífero. Os valores de cloreto, com exceção do BF-03 (1210 mg/L), mostram-se homogêneos, variando de 10 a 38,15 mg/L. Tais valores de cloreto são em geral bem mais baixos que os das demais amostras de aquíferos regionais, podendo refletir uma menor influência marinha.

Tabela 11 - Valores de pH, condutividade elétrica e teor de cloreto para poços do aquífero Emborê.

Poço	Profundidade (m)	pH	Cond. Elet.(μ S/cm)	Cl(mg/L)
Farol 01	220	7,6	452	24,26
39-FAR	160	7,8	380	14
40-FAR	168	7,7	400	10
BF-01	250	7,1	315	13,8
BF-02	250	7,0	467	29,2
BF-03	150	7,04	3951	1210
92-FAR	220	6,8	310	9,8
36-SAB	137.5	7,9		77
Saturnino Braga 03	137.5	8,2	435	38,15
25 - Usina Santo Amaro	205	7,8		
Média		7,4	838,7	158

6.4) Mapas de isovalores

Em estudos hidrogeoquímicos, frequentemente os resultados referentes à informação espacializada são apresentados sob a forma de mapas de isovalores. No caso de água subterrânea, esses permitem a visualização rápida das variações espaciais das características químicas de um aquífero (Bento, 2006). Os mapas caracterizam-se pela presença de isolinhas que correspondem ao mesmo teor do parâmetro analisado acrescido de alguns desvios padrões, dependendo da amplitude da população analisada. No caso do presente trabalho, os mapas consistem na interpolação dos valores, do parâmetro analisado (pH, condutividade elétrica e concentração de cloretos), para cada poço, calculada para a porção emersa da Bacia de Campos.

O mapa de isovalores de ph (Figura 11-a) evidencia na parte central da área de estudo, uma faixa de valores de ph que varia de 7 a 8, onde estariam os aquíferos Emborê e Flúvio Deltaico e partes dos aquíferos São Tomé I e II. Isso pode indicar uma relação genética entre os dois primeiros aquíferos.

Com relação aos valores de cloretos (Figura 11-c), observa-se claramente a delimitação do Aquífero Emborê, com suas águas de baixo teor desse íon, conforme comentado no subitem 6.3. Um fato interessante são os valores anômalos de salinidade observados em poços na porção norte da margem da Lagoa Feia, fenômeno que pode estar relacionado a alguma anomalia local. As mesmas evidências podem ser observadas no mapa de isovalores de condutividade elétrica (Figura 11-b).

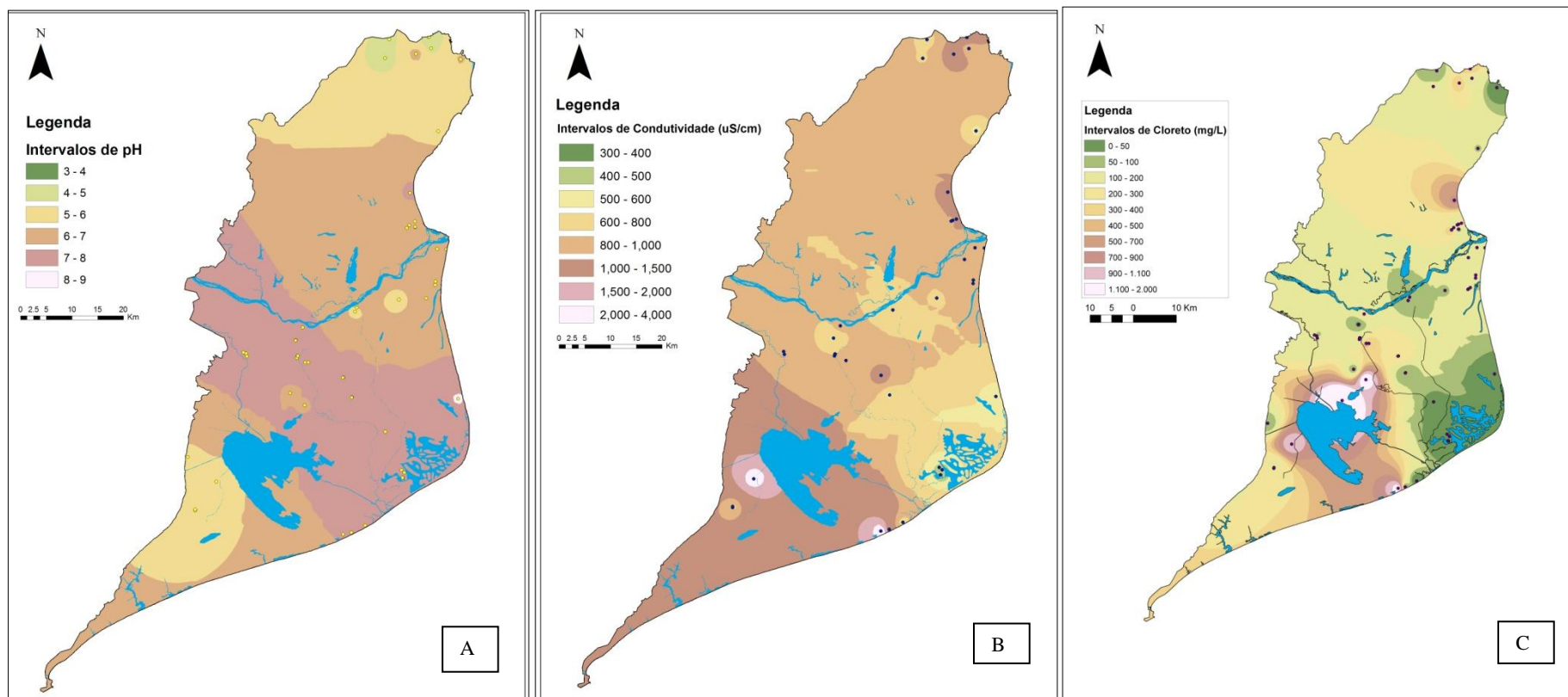


Figura 11- Mapas de isovalores para: a- ph; b- condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); c- concentração (mg/L) de cloretos. Os pontos em cada mapa mostra a localização dos poços que contribuíram com os valores de cada parâmetro.

6.5) Classificação das Águas

O estudo e visualização dos resultados de análises químicas podem ser simplificados com a utilização de gráficos e diagramas, como o Diagrama Triangular de Piper e o Diagrama de Scholler, que servem para classificar e comparar os distintos grupos de água quanto aos íons dominantes. Fazem parte desta classificação os poços com dados de íons básicos completos e com erros analíticos aceitáveis, anteriormente discutidos no subitem da Metodologia referente à compilação e seleção dos dados. A Tabela 12 mostra os poços utilizados nessa classificação. Essa análise permite distinguir os diferentes tipos de águas amostradas, sendo esperado que as amostras de águas dos mesmos aquíferos apresentem semelhantes comportamentos no diagrama. Em seguida, temos os Diagramas de Piper e Schoeller para todas as amostras de todos os aquíferos.

Tabela 12 - Relação de poços com íons básicos completos, valores em mg/L.

Aquífero	Sample ID	HCO ₃	SO ₄	Cl	Na	K	Ca	Mg	CO ₃
Alúvio Lacustre	Fazenda Vista Alegre I	8,58	114	281,0	179	10,90	28,60	21,60	0
	Fazenda Machadinha	0	240	979	483	114	68,70	65,90	0
	Fazenda Vista Alegre II	0	104	114	76,70	8,12	6,10	12,80	0
Flúvio Deltaico	Donana 04	96,85	28,49	226,03	119,39	5,421	41,437	15,433	0
	Sto Antônio 05	47,69	0,09	37,01	23,889	2,722	8,209	3,695	0
	27-URU	170	200	25	33	0	104	12	0
	28-URU	122	7	180	62	0	40	12	0
	30-URU	101	32,4	173	95,5	3,1	69,4	2,28	0
	32-ANA	146	6	85	66	0	24	10	0
33-ANA	154,2	10	85,2	67	0,78	31,4	0,1	0	
São Tomé II	São Sebastião 02	78	39,59	407,9	212,17	13,12	45,247	22,698	0
	Atafona 12	121	99,78	156,61	153,88	6,355	19,43	9,09	2,39
	Grussaí 13	94,54	45,52	143,31	119,15	4,77	11,82	7,54	0
	Degredo 15	90,34	53,77	98,86	106,35	4,354	7,01	3,52	0
	53-SJB	109	54,9	134	136	5,55	34	0	0
88-GRU	191	163	123	219	10,5	21	0,62	0	
São Tomé I	Gargaú 14	141,1	130,3	192,66	188,95	5,516	17,03	11,64	0
	Barcelos 16	61,99	36,98	95,95	90,25	3,517	5,61	1,58	0
Barreiras	INB 06	0	12,21	99,78	63,6	1,718	1,05	3,477	0
	Aldeia 07	0	6,53	102,09	46,64	11,27	11,97	20,2	0
	Sto Amaro 08	6,49	12,57	54,79	23,05	5,175	4,736	5,837	0
	São Paulinho 09	141,5	22,38	332,32	175	1,166	27,36	12,49	0
	Lagoa Feia 10	0	21,02	404,25	180,2	7,726	7,442	16,59	0

	Morro do Bode 11	4,54	13,96	110,25	44,92	6,927	4,268	11,47	0
Emborê	BF-01	169	7,33	13,8	54,7	6,87	11,6	3,26	0
	BF-02	181	12,5	29,2	59,4	7,03	23	7,58	0
	BF-03	209	165	1210	602	16,4	209	78	0
	Farol 01	207,2	0,52	24,26	33,16	5,188	34,962	11,291	0
	Saturnino Braga 03	194,4	0,08	38,15	52,11	57	24,703	7,895	0
	39-FAR	208	8,8	14	2,5	0,2	47	11	155
	40-FAR	190	7,3	10	2,7	0,2	44	2	116

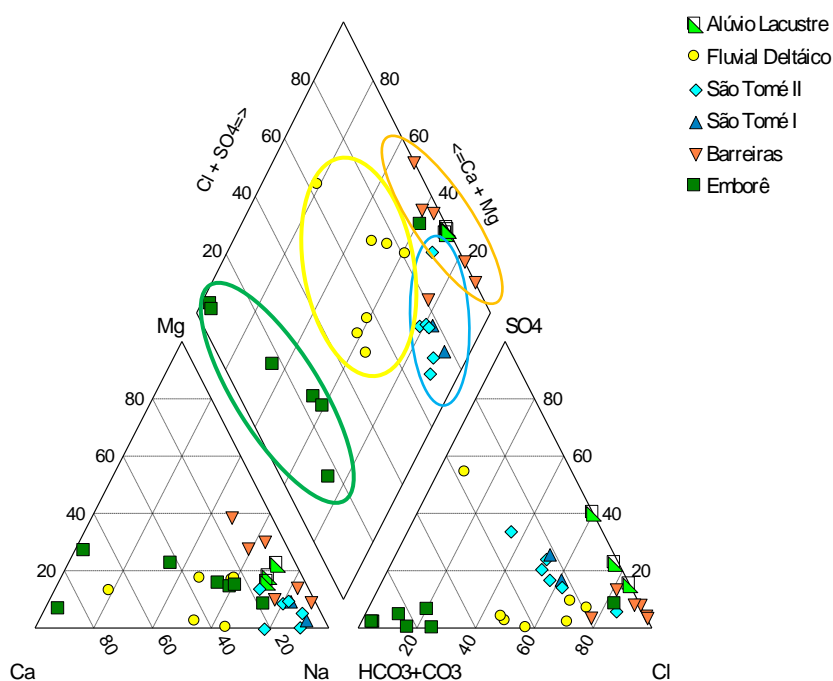


Figura 12- Diagrama de Piper para todos os poços utilizados

Observando o diagrama da Figura 12 verifica-se que amostras do mesmo aquífero comportam-se de maneira semelhante, salvo algumas exceções discutidas mais adiante no texto. Pelo gráfico daquela figura, temos que predominantemente as amostras tendem à fácies Cloretada Sódica, e secundariamente à fácies Bicarbonatada Sódica e ainda Bicarbonatada Cálcica. Quatro famílias de águas podem ser diferenciadas. Observando a Figura 12 tem-se que:

- Há uma clara individualização hidroquímica entre os diferentes aquíferos presentes na área de estudo, em particular o Emborê e o Flúvia-deltaico, que parecem também apresentar uma afinidade química, como sugerido pelos mapas da Figura 12.

- as águas do Aquífero São Tomé I e II são muito semelhantes do ponto de vista dos íons maiores, não sendo possível separá-las;
- as amostras do Aquífero Barreiras e do Aquífero Alúvio-lacustre são semelhantes, o que pode ser em parte explicado pelo caráter livre a semiconfinado de ambos aquíferos;
- o comportamento das amostras do Aquífero Emborê, no diamante, sugere que ocorra o fenômeno de troca iônica, mais que uma eventual lavagem do aquífero com águas doces (Appelo e Postma, pág. 244).

No diagrama logarítmico de Scholler a seguir (Figura 13), foram plotadas as concentrações dos principais íons constituintes, dos poços e uma amostra característica da água marinha. Esse diagrama fornece informações sobre as proporções entre os parâmetros escolhidos, entre as amostras.

Observa-se que, na maioria das amostras, há um comportamento de diluição e visível alinhamento das proporções entre os íons das amostras com as proporções da água marinha. Algumas amostras dos aquíferos Fluvial-Deltaico e Emborê mostram um empobrecimento em Mg, K e SO_4 .

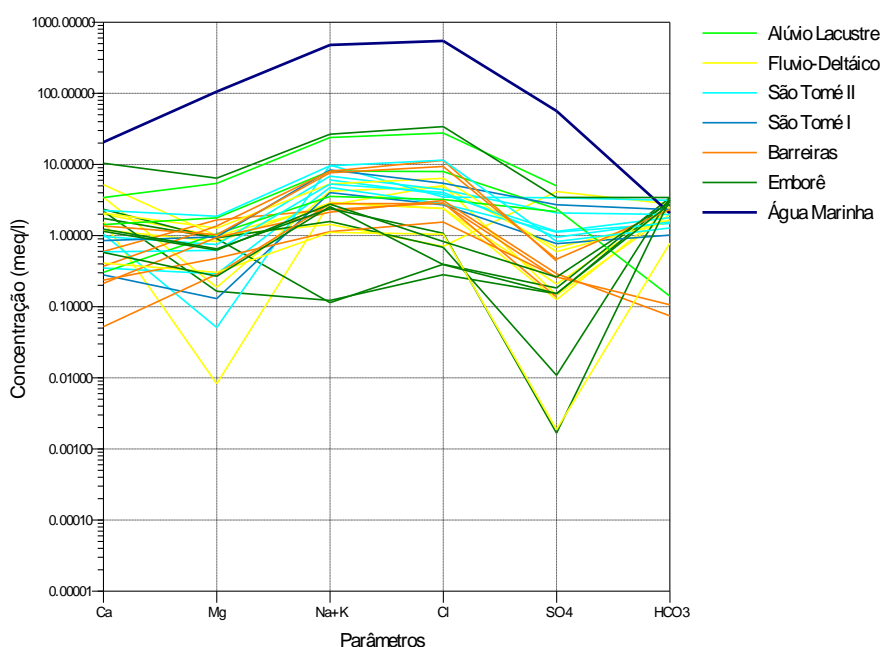


Figura 13 – Diagrama Logarítmico de Scholler para todos os poços e concentração da água marinha.

A seguir, segue uma análise mais detalhada das classificações acima para cada aquífero.

Alúvio-Lacustre

As três amostras que apresentam análises balanceadas para o aquífero Alúvio-Lacustre são associadas à fácies Cloretada Sódica (Figura 14). No diamante as amostras indicam um comportamento hidroquímico de possível contribuição de água marinha, com notável coincidência com a água do mar. Do diagrama de Scholler vemos um comportamento homogêneo das proporções entre íons, sendo que o poço Fazenda Machadinha (linha logo abaixo da linha marinha na Figura 14), apresenta concentrações mais elevadas em íons com relação às demais. O comportamento das amostras com relação à amostra marinha mostra que essas amostras representam, quimicamente, uma diluição da água do mar, podendo evidenciar uma possível contribuição pretérita de águas marinhas para esse aquífero.

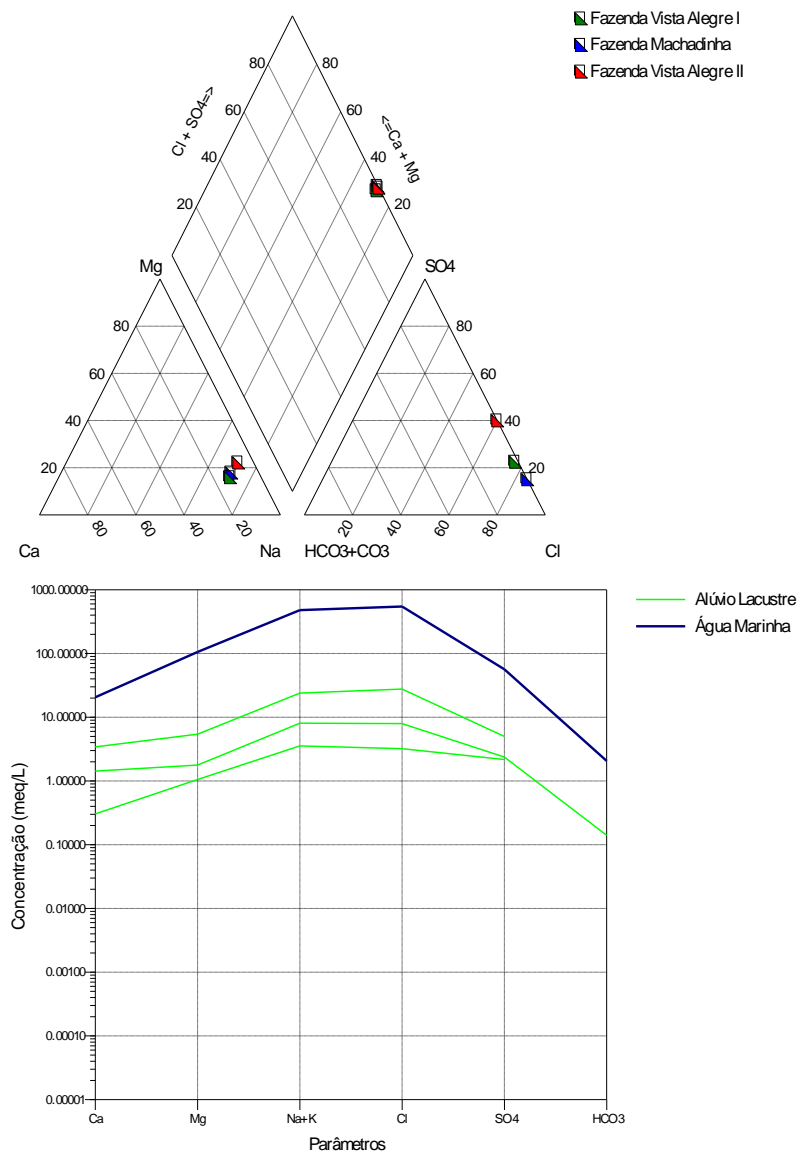


Figura 14 - Diagramas de Piper e de Scholler para os poços do aquífero Alúvio-Lacustre.

Flúvio-Deltaico

O aquífero Flúvio-Deltaico associa-se, segundo suas amostras de águas, predominantemente com a fácies Cloretada Sódica, apresentando algumas amostras de fácies mistas e uma amostra (27-URU) associada à fácies Sulfatada Cálcica. Tanto no triângulo dos ânions quanto no triângulo dos cátions pode-se notar uma variação de concentração de elementos. A posição das amostras no diamante indica uma possível mescla entre águas doce e águas mais salgadas.

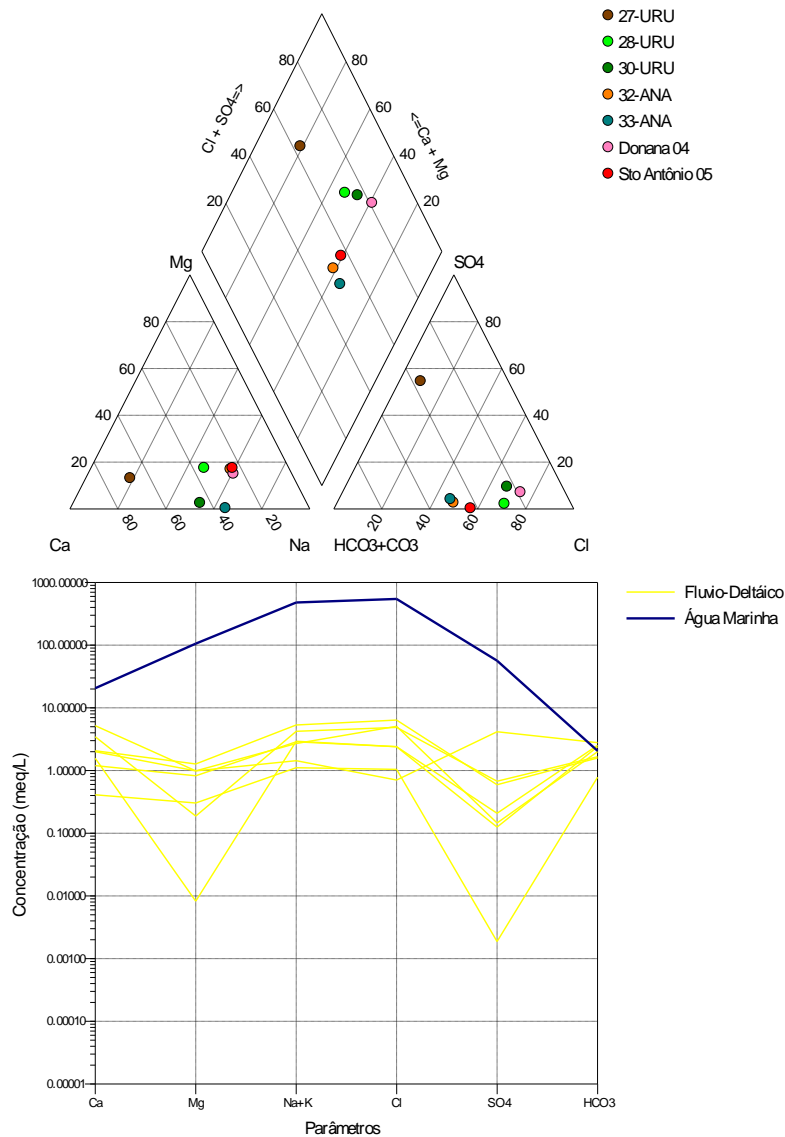


Figura 15- Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Flúvio Deltaico.

O diagrama de Shoeller mostra uma relativa homogeneidade das amostras com respeito aos íons sódio e cloreto, que apresentam característica de diluição marinha, porém os teores de magnésio e sulfato são extremamente variáveis, embora em geral baixos. Isso pode sugerir complexas interações entre as águas e materiais geológicos continentais por elas percolados, típicos de aquíferos livres e mais rasos.

São Tomé I e II

O diagrama de Piper da Figura 16 permite classificar as amostras de águas do Aquíferos São Tomé I II como Cloretadas Sódicas. No triângulo dos ânions um alinhamento que indica o aumento relativo da concentração de cloreto, pode ser observado. Esse alinhamento é típico de dissolução de halita, o que pode ser consequência de presença de evaporitos ou mesmo de aerossóis marinhos durante a recarga e circulação de água.

O diagrama de Schoeller para as amostras do Aquífero São Tomé I e II mostram uma relativa homogeneidade nas proporções entre os íons. Mais uma vez a semelhança entre proporções entre Na-K-Cl das amostras com a composição marinha é observada.

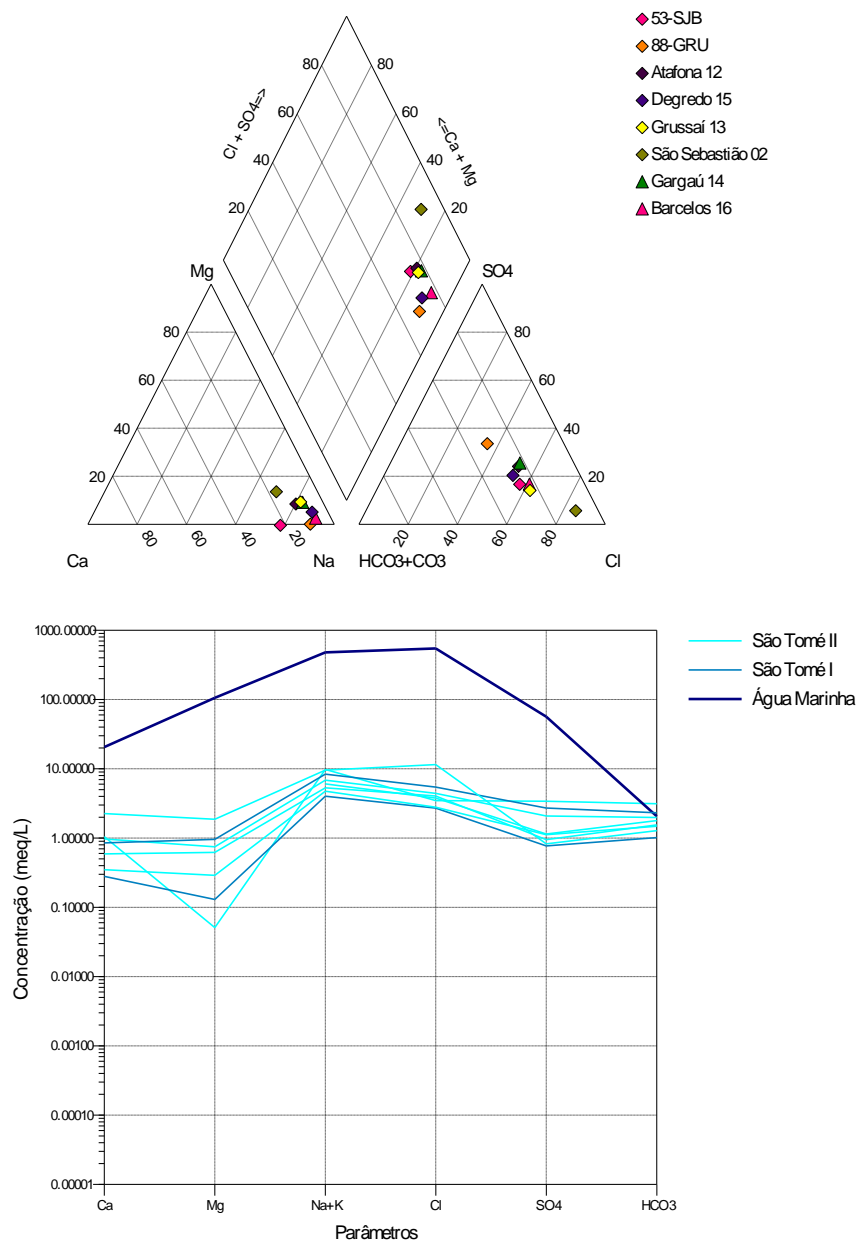


Figura 16 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero São Tomé II.

Barreiras

O aquífero Barreiras evidencia uma afiliação a fácies Cloretada Sódica como predominante. No triângulo dos cátions pode-se observar que as amostras tendem a ser mais enriquecidas em magnésio e sódio. O triângulo dos ânions evidencia que amostras são relativamente ricas em cloreto. O diamante evidencia um comportamento que reflete uma

possível interação com águas de origem marinha que poderiam ter contribuído para essa água, talvez o aerossol marinho.

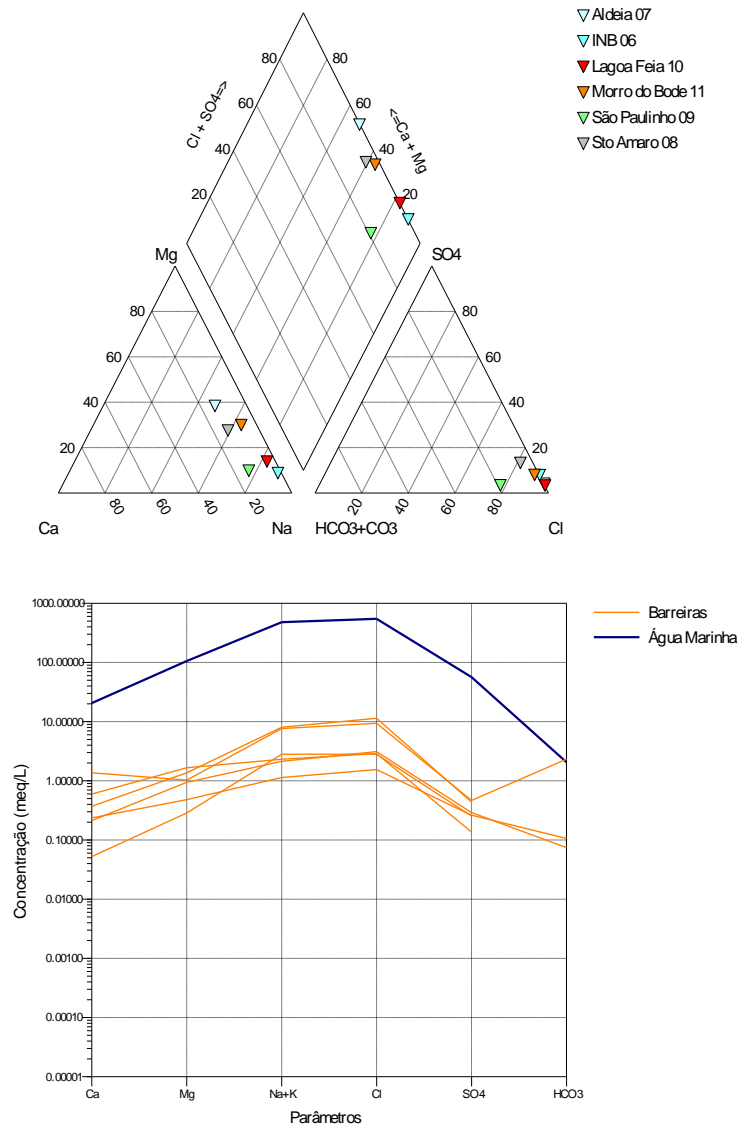


Figura 17 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Barreiras.

Com exceção do poço São Paulino 09, os poços tendem a uma homogeneidade hidrogeoquímica do ponto de vista dos íons principais. A semelhança de proporção entre os íons com as proporções da água marinha é um fato que pôde ser novamente evidenciado.

Emborê

As amostras do Aquífero Emborê são nitidamente distintas das demais águas subterrâneas. Mostram uma tendência a fácies Bicarbonatada Sódica, ou Bicarbonatada

Cálcica. A amostra BF-03 destaca-se por ser mais concentrada em cloreto que as demais. As águas desse aquífero apresentam uma maior variabilidade química que a dos demais. A maior parte das amostras apresenta um *trend*, que pode evidenciar um comportamento hidroquímico vinculado a processos de “lavagem” dessas águas por águas doces continentais. A amostra do poço BF-03, contrastante com as demais águas aqui classificadas como pertencentes ao aquífero Emborê, pode ser em realidade, conforme já comentado, vinculada a um aquífero distinto do Emborê, possivelmente uma fácies particular do São Tomé (?).

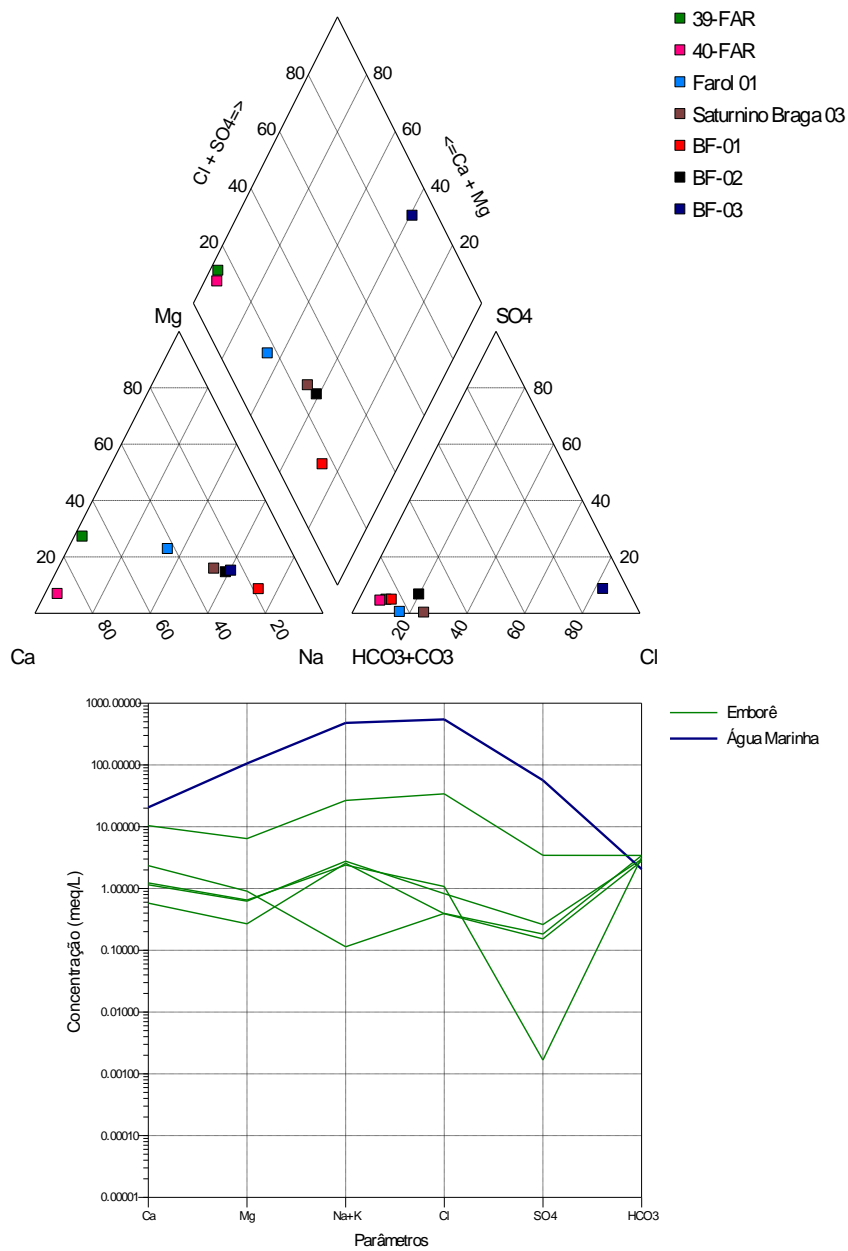


Figura 18 - Diagramas de Piper e Schoeller para os poços do aquífero Emborê.

O diagrama de Schoeller revela um comportamento não tão homogêneo como acontece nas amostras dos aquíferos anteriores. A amostra logo abaixo da amostra de água marinha é o poço BF-03, que mais uma vez diferencia-se das demais, apresentando maiores concentrações dos íons e forte semelhança de suas proporções de parâmetros com os parâmetros marinhos. O empobrecimento relativo em SO_4 é observado nas amostras Farol-01 e Saturnino Braga-03. Tais diferenças são em realidade pequenas variações absolutas no conteúdo desse íon, devidas provavelmente a variações litológicas ou faciológicas de menor significado.

6.6) Razões Iônicas

Algumas das razões mais amplamente utilizadas em estudos hidrogeoquímicos são bastante relevantes para este estudo, tais como as razões, rMg/rCa , rK/rNa , rNa/rCl , $rHCO_3/rCl$ e rCl/rBr que nos reportam processos importantes na composição e dinâmica hidrogeoquímica locais. A Tabela 13 apresenta os valores de razões iônicas calculadas para todas as amostras possíveis.

Tabela 13– Valores das principais razões iônicas utilizadas

Aquífero	Poço\Razão	rK/rNa	rMg/rCa	$rCl/rHCO_3$	Na/Cl	rCl/rBr
Alúvio Lacustre	Fazenda Vista Alegre I	0,04	1,25	56,28	0,98	727,96
	Fazenda Vista Alegre II	0,06	3,46	-	1,04	570,97
	Fazenda Machadinho	0,14	1,58	-	0,76	2206,49
	24-PGF	-	-	-	-	-
	68-DMA	-	0,81	8,35	-	-
Flúvio Deltaico	Donana 04	0,03	0,62	4,01	0,81	628,93
	Sto Antônio 05	0,07	0,74	1,33	1	834,14
	03-GOY	-	0,63	7,95	-	-
	25/26 (GOY)	-	0,71	3,92	-	-
	27-URU	-	0,19	0,25	2,04	-
	28-URU	-	0,50	2,54	0,53	-
	29-ANA	-	-	1,92	-	-
	30-URU	0,02	0,05	2,94	0,85	-
	31-BEC	-	0,49	0,97	-	-
	32-ANA	0	0,69	1	1,20	-
	33-ANA	0,01	0,01	0,95	1,21	-
	38-TOC	-	-	1,90	-	-

São tomé II	São Sebastião 02	0,04	0,83	8,99	0,80	723,88
	Atafona 12	0,02	0,77	2,23	1,52	665,98
	Grussaí 13	0,02	1,05	2,61	1,28	659,17
	07(TOC)	-		9	-	-
	Degredo 15	0,02	0,83	1,88	1,66	655,33
	35-GRU	-	2,18	1,42	-	-
	41-SSE	-	-	2,44	-	-
	53-SJB	0,02	0	2,11	1,57	-
	56-SES	-	-	1,94	-	-
	57-GRU	-	2,19	1,43	-	-
	76-GRU	0,02	-	1,58	1,84	-
	77-ATA	0,03	-	1,09	2,39	-
	79-AÇU	0,03	-	0,21	6,89	-
	88-GRU	0,03	0,05	1,11	2,75	-
São Tomé I	Gargaú 14	0,02	1,13	2,35	1,51	689,24
	Barcelos 16	0,02	0,47	2,66	1,45	675,79
	10-RAI	-	0,44	3,82	-	-
	52-SCL	-	0,53	10,97	-	-
	54-BAR	-	-	3,82	-	-
	55-GAR	0,18	0,13	1,71	0,13	-
	58-GAR	0,02	1,24	2	-	-
	59-GAR	-	-	1,64	-	-
	61-BAR	-	-	2,50	-	-
	81-GAR	-	-	0,86	-	-
	82-GAR	-	-	2,56	-	-
83-GAR	-	-	0,65	-	-	
Barreiras	84-BIT	-	-	0,18	-	-
	INB 06	0,02	5,47	-	0,98	977,77
	Aldeia 07	0,14	2,79	-	0,70	1533,95
	Sto Amaro 08	0,13	2,04	14,51	0,65	823,24
	São Paulinho 09	-	0,75	4,03	0,81	870,92
	Lagoa Feia 10	0,03	3,68	-	0,69	949,07
	Morro do Bode 11	0,09	4,44	41,73	0,63	637,14
Emborê	Farol 01	0,09	0,53	0,20	2,11	781,11
	Saturnino Braga 03	0,06	0,53	0,34	2,11	661,41
	36-SAB	-	0,64	0,75	-	-
	39-FAR	0,05	0,39	0,12	0,28	-
	40-FAR	0,04	0,08	0,09	0,42	-
	25 - Usina Santo Amaro	-	0,41	0,32	-	-
	92-FAR	-	-	0,07	-	-
	BF-01	0,07	0,46	0,14	6,11	777,57
	BF-02	0,07	0,54	0,28	3,14	387,13
BF-03	0,02	0,62	9,96	0,77	729,18	

A Figura 19 ilustra os diferentes valores para a razão rCl/rBr . Observa-se um comportamento homogêneo de quase todas as amostras, que evidenciam um alinhamento com o *trend* da razão da água marinha ($rCl/rBr = 655$). Tal fato é particularmente relevante, quando se avalia que os íons cloreto e brometo são conservativos, ou seja, pouco sensíveis a variações químicas do meio de modo que seria um indicativo da forte influência exercida pelo mar sobre as águas subterrâneas regionais. As diferenças entre as águas dos diversos aquíferos presentes, algumas bastante marcantes, seriam então devidas a fenômenos químicos modificadores posteriores, como trocas iônicas, mesclas, interação com a matéria orgânica do solo e atmosfera.

Outro poço que se destaca é o BF-03, que apresenta um alinhamento relativamente próximo a linha de concentração marinha e apresenta concentração superior, às demais amostras, nos íons analisados. Essa elevada concentração principalmente de brometo pode ser explicada pela contribuição da cunha salina nesse poço.

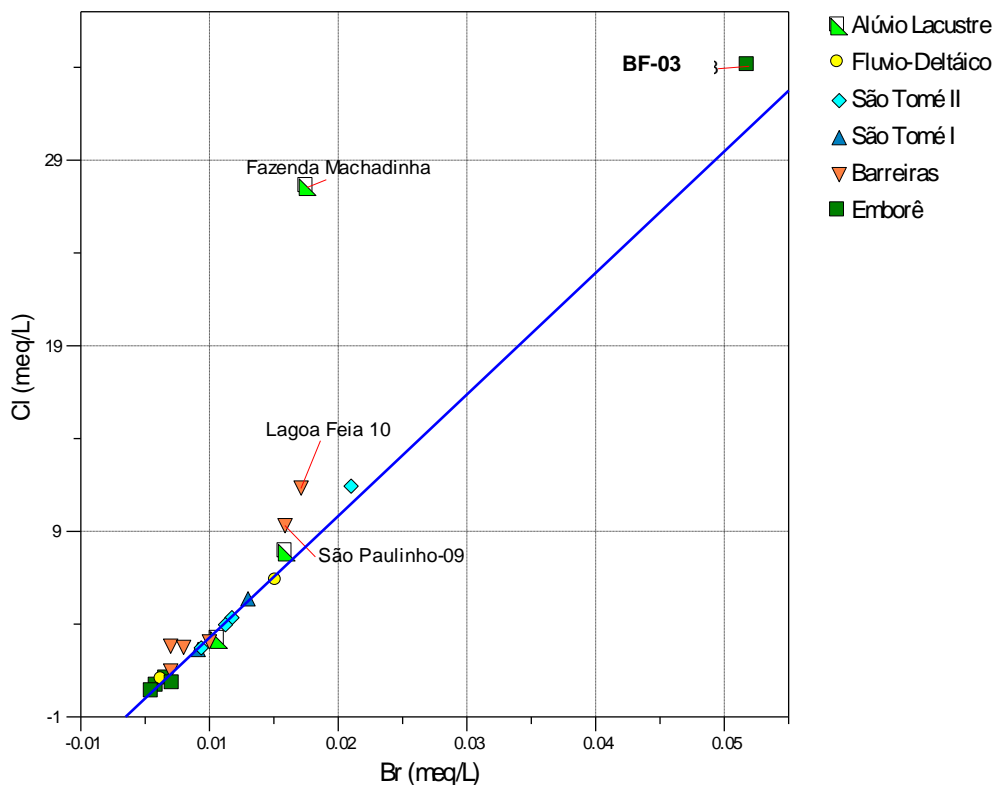


Figura 19 – Razão rCl/rBr para todos os poços possíveis. A linha azul representa a mesma razão para a água marinha.

Boa parte das amostras mostra um alinhamento com o *trend* da razão Na/Cl para águas marinhas ($r_{Na}/r_{Cl} = 0,876$). Novamente as amostras (BF-03 e Fazenda Machadinha) contrastam das demais, evidenciando concentração dos íons Na e Cl relativamente elevadas. Os fenômenos de troca iônica e outros processos levam a uma maior dispersão das amostras no gráfico quando a razão r_{Na}/r_{Cl} é considerada comparada com a razão r_{Cl}/r_{Br} . Porém, a tendência geral de diluição da água do mar permanece nas amostras. Nota-se claramente um excesso de sódio na maioria das amostras do Aquífero Emborê e do Aquífero São Tomé I e II. Isso pode indicar a tendência geral de dessalinização desses aquíferos, que possivelmente vem ocorrendo desde o final da última grande contribuição marinha.

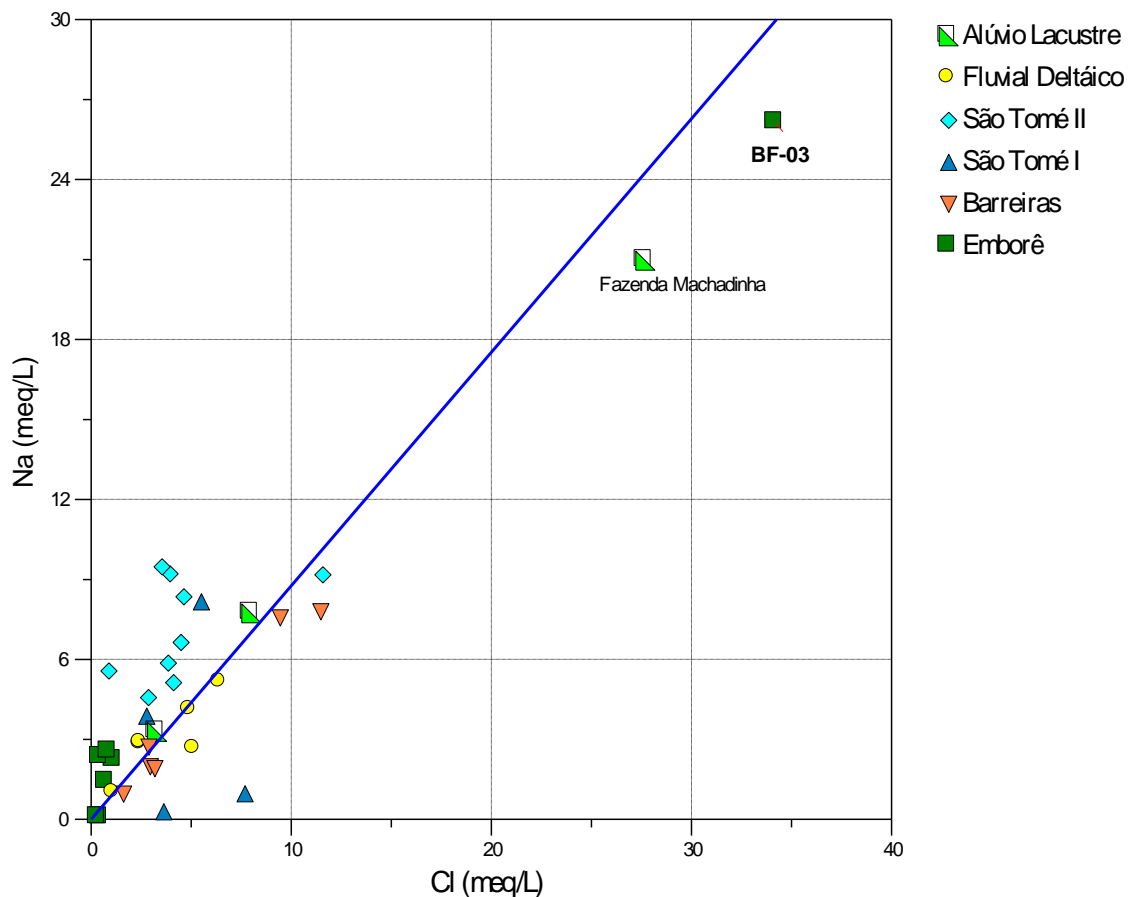


Figura 20: Razão r_{Na}/r_{Cl} para todos os poços possíveis. A linha azul representa a mesma razão para a água marinha ou para processos de substituição de Na por Ca e Mg.

A Figura 21 ilustra os valores da relação r_{Cl}/r_{HCO_3} . Pode-se evidenciar um comportamento homogêneo para maioria dos aquíferos, onde a maior parte das amostras possui um caráter continental, uma vez que se encontra entre as linhas de valores para águas

continentais. Uma parte secundária das amostras mostra um caráter intermediário entre águas continentais e marinhas, mais próximas à linha do *trend* continental. Os poços do aquífero Alúvio-lacustre tendem a se alinhar com o *trend* marinho, o mesmo ocorre para a maioria dos poços do Aquífero Barreiras. Tal relação continua a mostrar a tendência de comportamento semelhante entre os aquíferos Barreiras e Alúvio-lacustre e diferenciado com relação às demais águas subterrâneas.

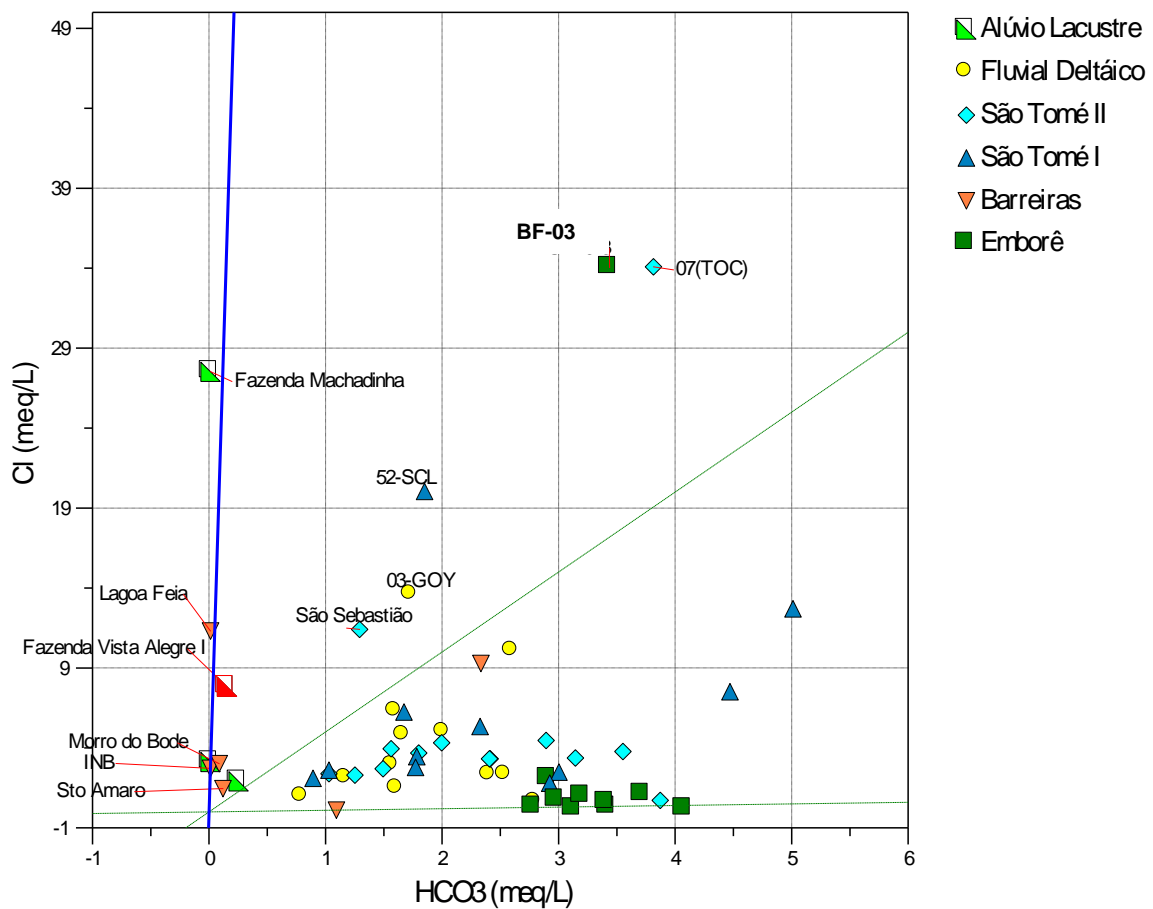


Figura 21: Razão iônica $rCl/rHCO_3$ para os todos os poços possível. A linha azul representa a razão $rCl/rHCO_3$ para água marinha e as linhas verdes tracejadas representam a mesma razão para águas continentais.

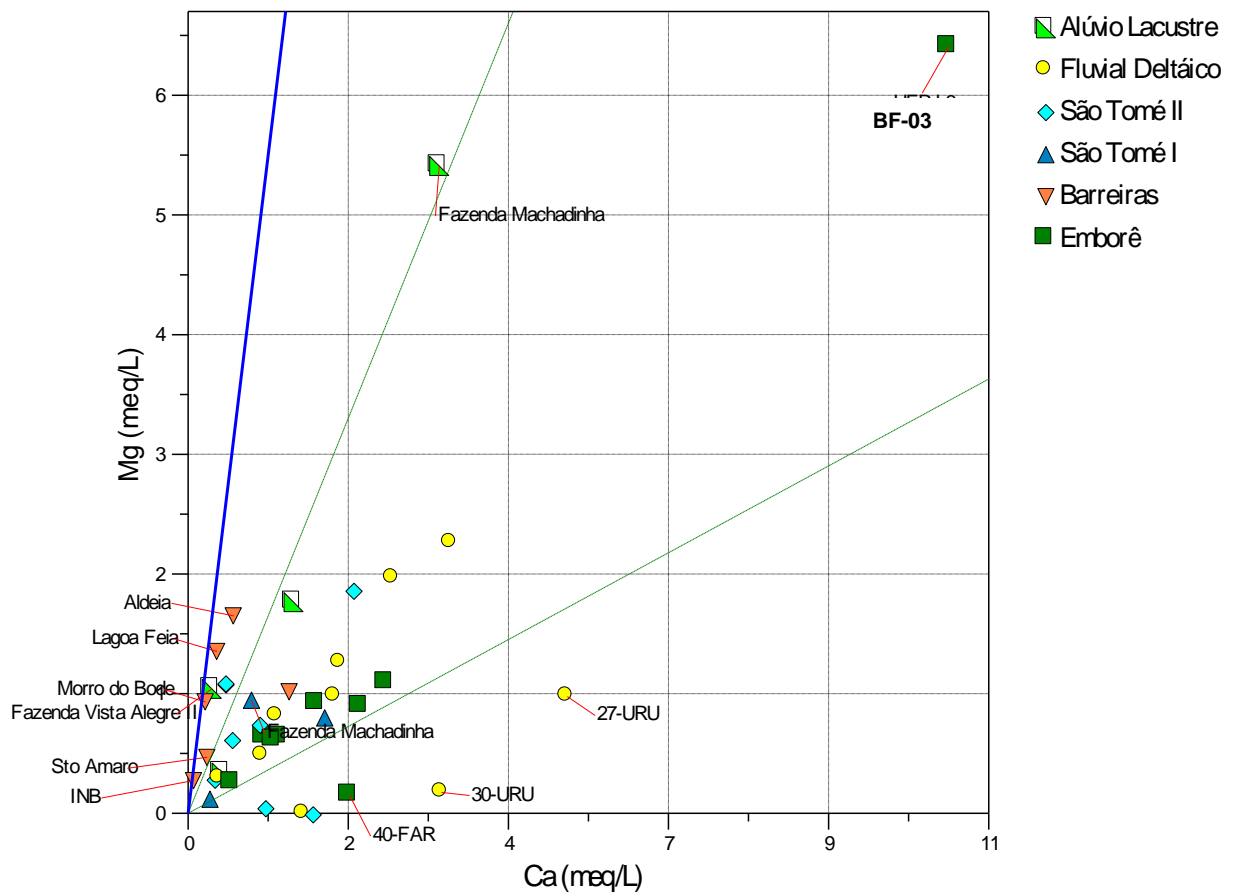


Figura 22 - Razão iônica rMg/rCa para os todos os poços possíveis. A linha azul representa a razão rMg/rCa para água marinha ou para processos de trocas catiônicas entre e as linhas verdes tracejadas representam a mesma razão para águas continentais.

As razões de rMg/rCa dos poços apresentam características de águas continentais, já que se encontram entre os *trends* da razão iônica para águas continentais (Linhas Verdes tracejadas na Figura 22). Novamente, a maioria dos poços do Aquífero Barreiras tende a se aproximar do *trend* correspondente a água marinha. Diferenciam-se das demais as amostras Fazenda Machadinha, que se assemelha a razão de água tendendo à marinha e algumas amostras de aquíferos Flúvio-deltaico, São Tomé e Emborê, muito ricas em cálcio. Essa ocorrência de águas ricas em cálcio relativamente aos teores de magnésio pode estar relacionada à presença de depósitos de materiais carbonáticos (conchíferos), abundantes naqueles aquíferos e que podem desequilibrar a relação entre o Mg e o Ca. No entanto, esta é uma hipótese que necessita maiores detalhes litológicos dos poços.

6.7) Modelagem Hidrogequímica

O *PHREEQCi* foi empregado para o cálculo do índice de saturação de minerais para os poços BF-01, BF-02 e BF-03. Num segundo momento foi realizado um modelo de mescla (módulo MIX do *PHREEQCi*) com as amostras da água do mar e com a água da chuva. Os resultados obtidos, que se dão através de parâmetros medidos em laboratório, assim como a partir do banco de dados do próprio programa, foram comparados com o proporcionado pela interpretação convencional das amostras das águas subterrâneas.

A modelagem hidrogeoquímica compreendeu somente as águas dos poços BF-01, BF-02 e BF-03, além da chuva, água marinha e da Lagoa Feia próxima, pois são as entidades hidrogeologicamente melhor conhecidas e dados hidrogeoquímicos mais confiáveis.

6.7.1) Índices de Saturação

Foram calculados os índices de saturação dos principais minerais, para os poços BF-01, BF-02 e BF-03.

Minerais Sulfatados

Os minerais sulfatados (Figura 23) mostram-se subsaturados ($IS < 0$), exceto para a barita que se mostra levemente subsaturada no poço BF-01 sendo supersaturada nos poços BF-02 e 03. O aumento de saturação pode ser evidenciado em direção ao poço BF-03 para todos os minerais sulfatados.

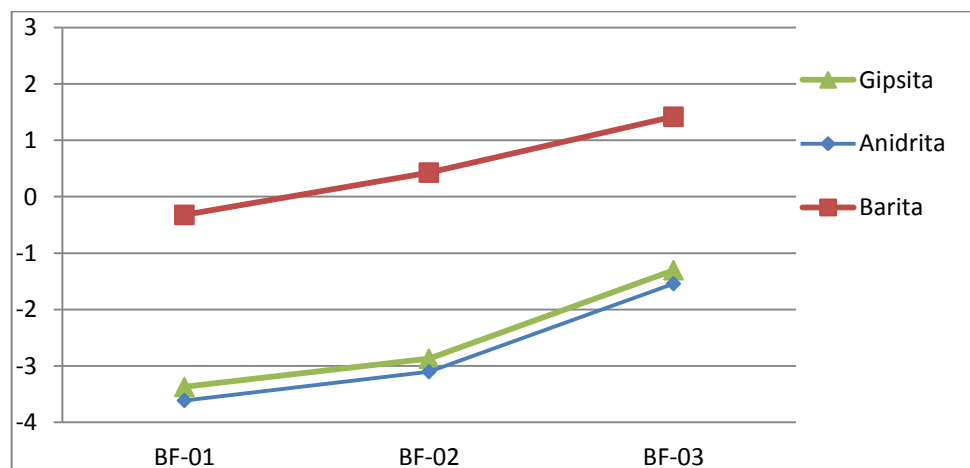


Figura 23 – Índices de minerais sulfatados.

Minerais Carbonáticos

Os poços BF-01 e 02 apresentam comportamento semelhante, estando subsaturados para os minerais carbonáticos, com exceção da siderita que se apresenta levemente saturada no BF-01. O BF-03 apresenta índices levemente subsaturados para a maioria dos minerais carbonáticos com exceção da siderita que está bem mais subsaturada.

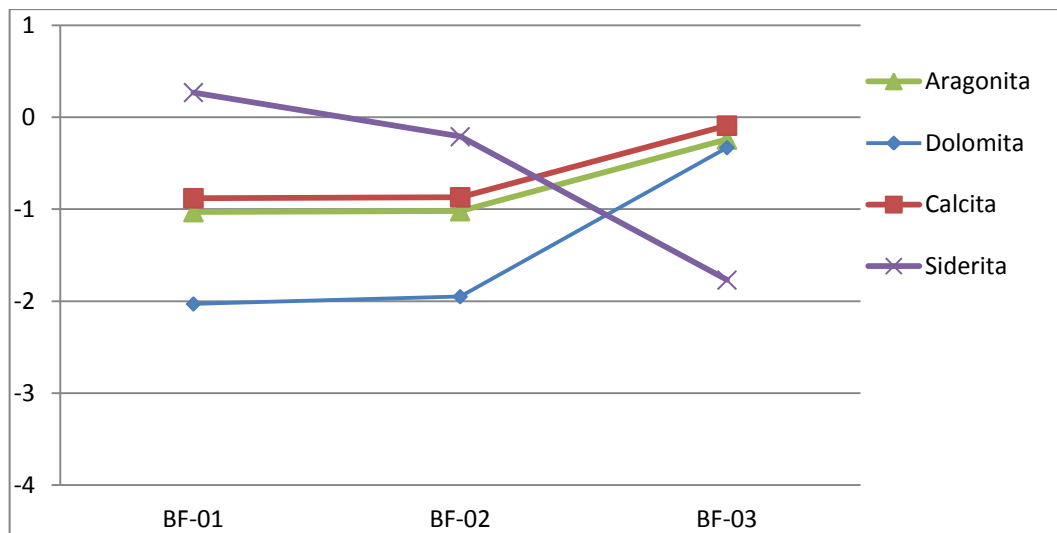


Figura 24 – Índices de saturação de minerais carbonáticos.

Minerais Silicáticos

Os silicatos apresentam índices de saturação, em sua maioria, positivos nos três poços analisados. Os poços BF-01 e 02 mostram uma subsaturação em anortita ao passo que o BF-03 mostra-se em equilíbrio com o mesmo. Pode ser observado que a muscovita (mica potássica) apresenta-se altamente supersaturada em todas as amostras analisadas.

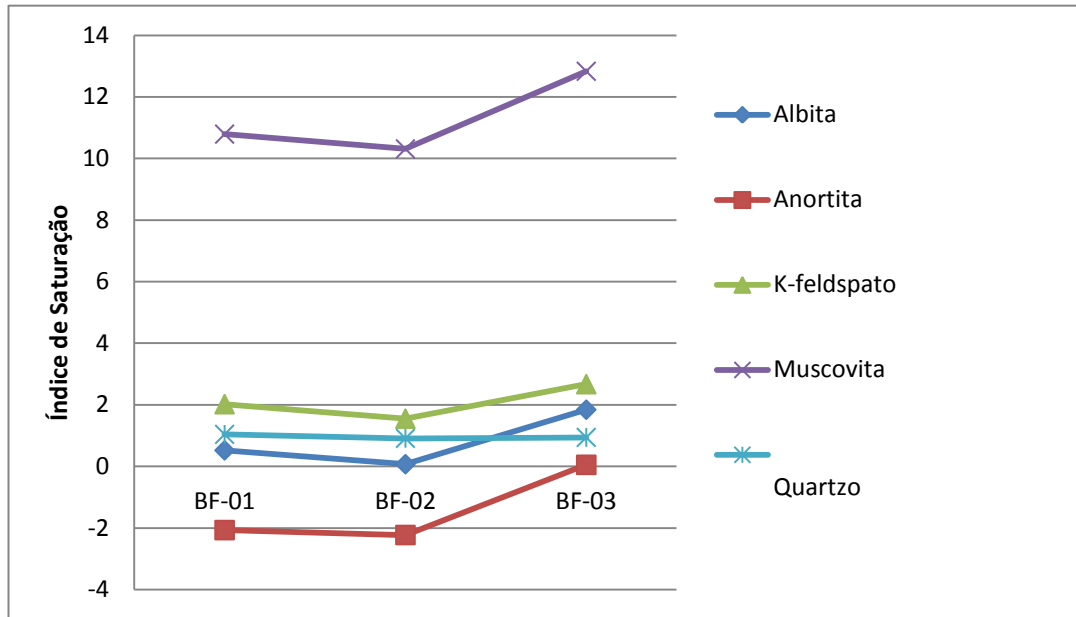


Figura 25 – Índices de saturação para os principais silicatos.

Óxido de ferro

O óxido de ferro (ferro amorfo) apresenta-se supersaturado em todas as amostras analisadas, sendo mais supersaturado no poço BF-3 e menos no BF-02.

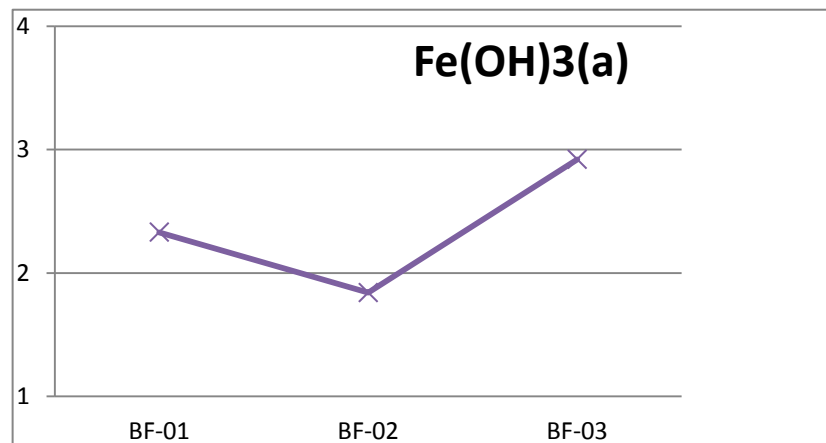


Figura 26 – Índice de saturação para óxido de ferro, ferro amorfo.

Halita

A halita mostra-se altamente subsaturada em todas as amostras, mostrando um aumento de saturação em direção ao poço BF-03.

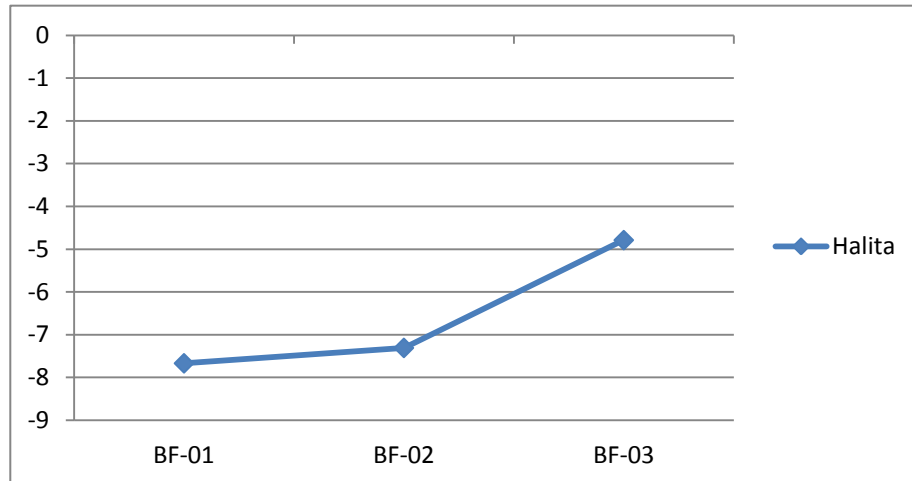


Figura 27 – Índices de saturação para halita

6.7.2) Modelagem de Mescla

Primeiramente, tentou-se avaliar o que resultaria de uma mescla de águas do aquífero Emborê típica (aquífero profundo: poço BF-01) com relativamente pequenas proporções de água marinha – variando de 0 a 9% do total da mescla – para avaliar se a água resultante seria quimicamente associada à do aquífero mais raso, representada pelo poço BF-03, mais salinizado, já que há um fluxo vertical ascendente do nível inferior do aquífero ao superior (Figura 28). Na mescla, cada solução é multiplicada pela sua fração de mescla e uma nova solução é calculada pela soma de todas as frações de soluções. Os moles de todos os elementos são multiplicados pela fração de mescla da solução.

Os resultados (Figura 29) indicam que tal mescla não é muito provável como geradora das características químicas do aquífero superior, mais salinizado, pois não há uma boa coincidência entre os dados e a mescla ótima (que corresponderia a uma amostra com mescla de 6% segundo o programa), ou seja, a que representaria melhor a semelhança entre as águas dos dois corpos aquíferos.

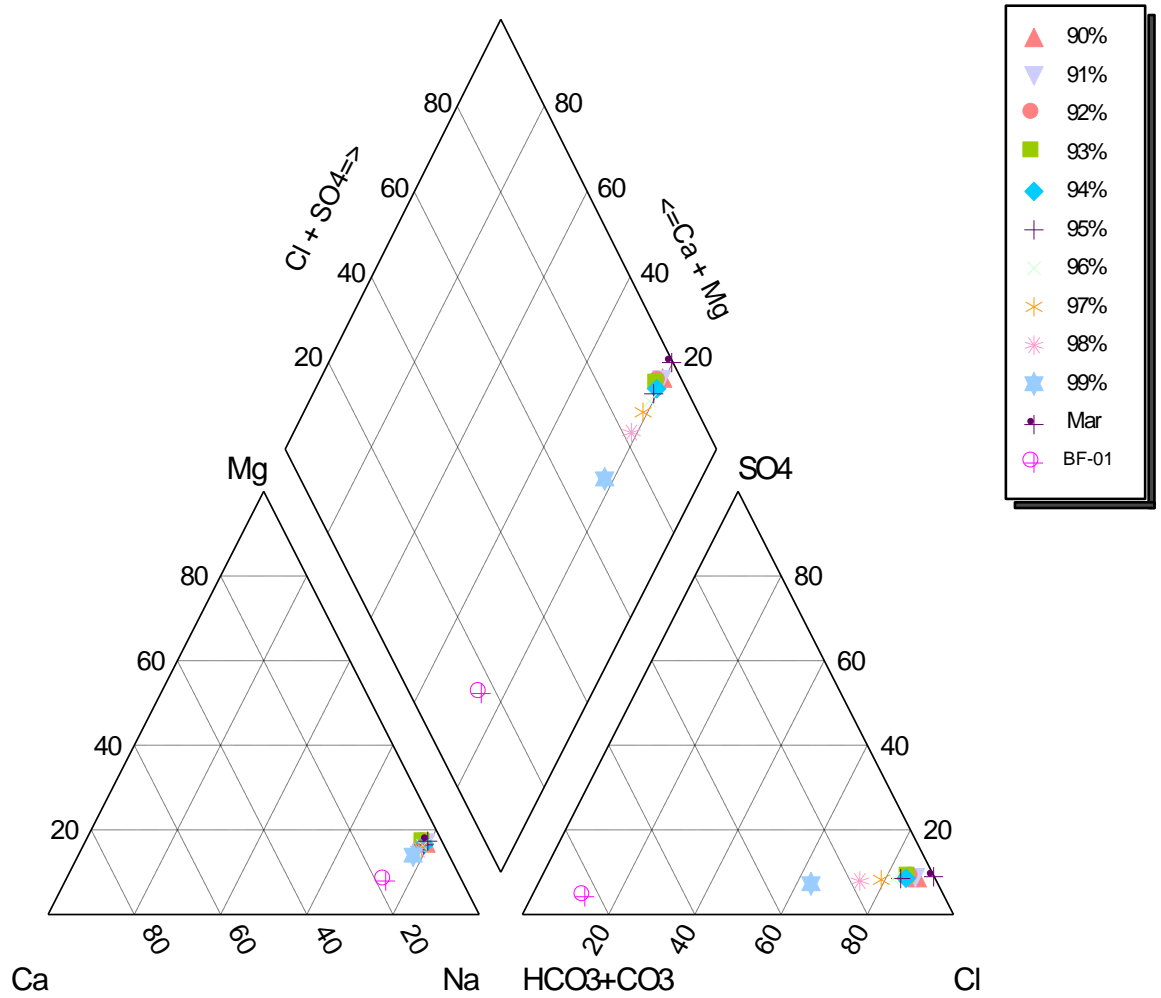


Figura 28- Misturas graduais da água marinha com a água do poço BF-01.

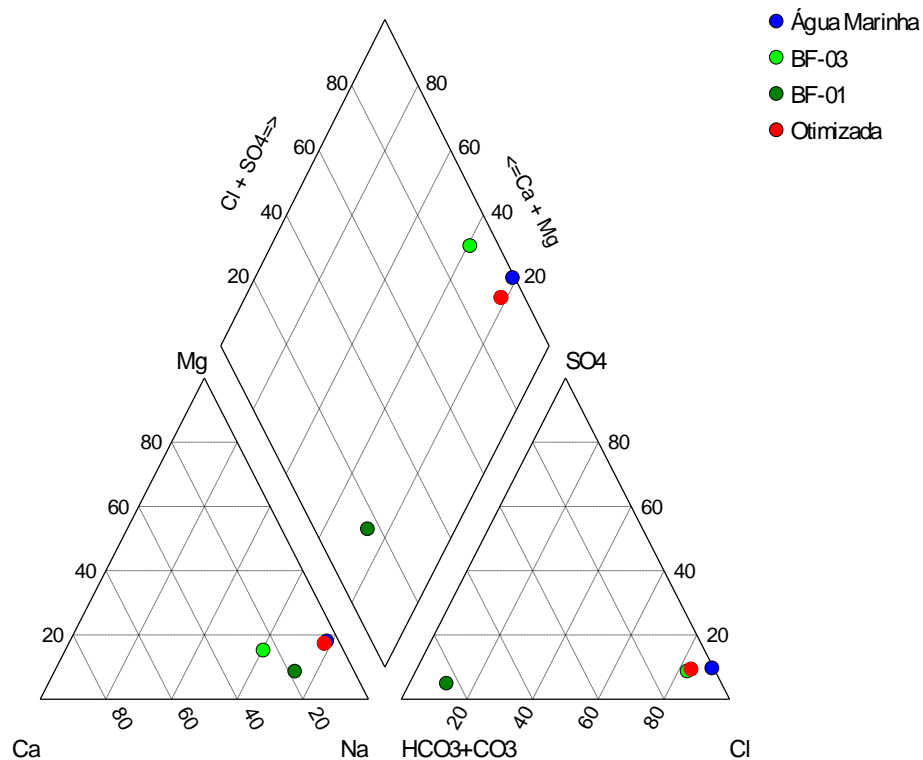


Figura 29 - Diagrama de Piper com a água otimizada entre as águas do mar e do poço BF-01.

6.7.3) Modelagem Inversa

Os modelos inversos foram formulados de modo que pudessem ser testadas hipóteses conceituais sobre o funcionamento dos aquífero da área de estudo, a partir da interpretação dos resultados de análises químicas dos poços BF-01, BF-02, BF-03, água marinha e Lagoa Feia.

A primeira hipótese (Figura 30) seria a evolução das águas da Lagoa Feia para a água encontrada no poço BF-03, através das interações iônicas ocorridas durante a percolação dos materiais geológicos. A segunda hipótese (Figura 31) de evolução da água do poço BF-03, resultaria da mistura de águas de chuvas concentradas em aerossóis marinhos com as águas lentamente ascendentes providas do aquífero profundo (poços BF-1 e 2).

Das hipóteses propostas, nenhuma das duas consiste em uma evolução termodinamicamente viável, embora alguns resultados tenham sido gerados, os erros são demasiadamente grandes para serem considerados modelos viáveis na natureza. Provavelmente, efeitos mais complexos e de mais difícil ordenamento e quantificação

respondam pelas características registradas pelo poço BF-03. Desse modo, não foi possível ainda idealizar uma hipótese de trabalho que leve em conta os fenômenos geoquímicos locais que tenham levado à composição das águas do aquífero raso na zona dos poços BF-01, BF-02 e BF-03 (ver os resultados da modelagem hidrogeoquímica no Anexo 4).

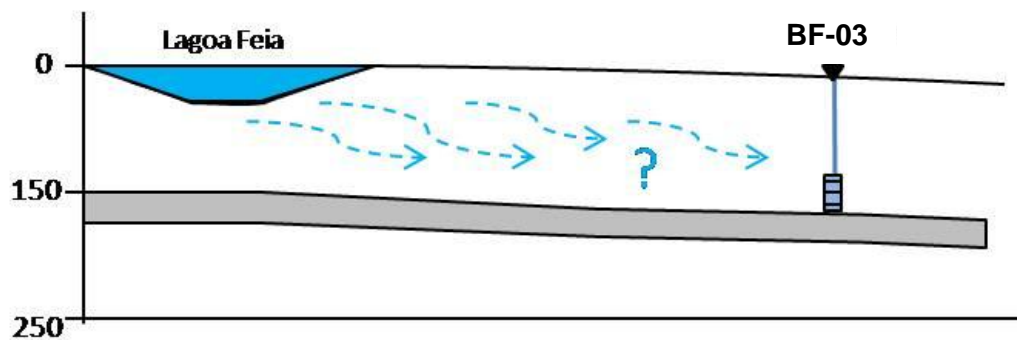


Figura 30- Croqui ilustrativo da hipótese de modelo inverso, Lagoa Feia como origem.

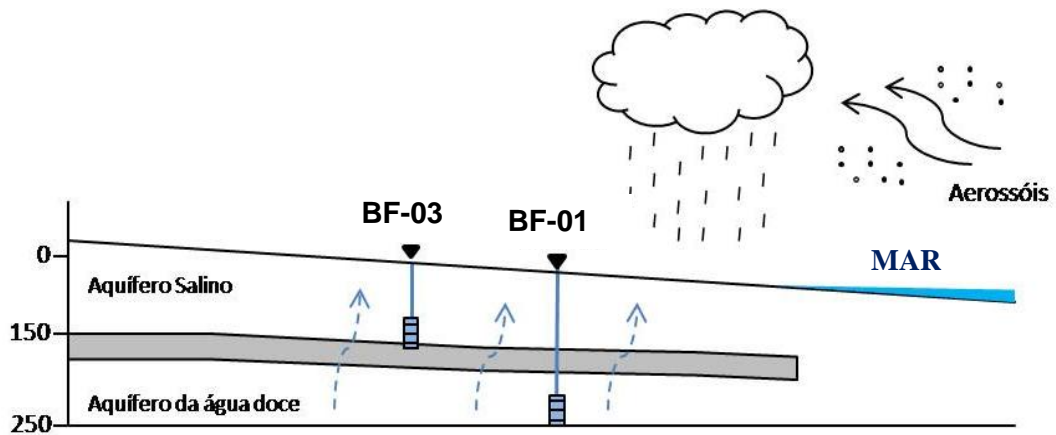


Figura 31 - Croqui ilustrativo da segunda hipótese de modelo inverso, na qual a água do aquífero raso e salino seria a mistura de águas de chuvas com aerossóis marinhos com águas ascendentes do aquífero mais profundo e de água doce.

7) CONCLUSÕES

Apesar da base de dados, do presente trabalho, ser composta de análises químicas de diferentes datas e fontes, foi possível caracterizar e correlacionar padrões hidrogeoquímicos para os distintos aquíferos sedimentares que compõem a porção emersa da Bacia de Campos.

Os mapas de isovalores permitiram a visualização da delimitação espacial inferida de alguns aquíferos segundo os parâmetros analisados. Do mapa de pH pôde-se observar uma faixa contínua ao centro da área, evidenciando uma possível correlação genética entre os aquíferos Flúvio-Deltaico e Emborê, onde o primeira seria a zona de recarga. Mas essa hipótese necessita de um estudo hidrogeológico e litoestratigráfico de maior detalhe. Além disso os mapas de salinidade (cloretos e condutividade elétrica) permitem salientar o aquífero Emborê, caracterizando as zonas de menor salinidade nos mapas.

Dos Diagramas de Piper foi evidenciado que as águas dos aquíferos associam-se, preferencialmente, com a fácies cloretada sódica, com exceção do aquífero Flúvio-Deltaico que apresenta uma parte secundária com características mistas e as do aquífero Emborê que são caracterizadas como bicarbonatada cálcica ou sódica.

Os diagramas de Schoeller permitiram evidenciar que há em quase todos os aquíferos uma semelhança do comportamento das amostras com o comportamento das variações de parâmetros da água do mar, sugerindo um processo de diluição de águas marinhas. Essa relação não é tão clara para os aquíferos São Tomé I e II e praticamente inexistente para o aquífero Emborê, sugerindo uma gênese menos associada à interação com águas marinhas (fonte mais distante do mar).

Os valores da razão iônica r_{Cl}/r_{Br} , indicam que todos os aquíferos em um dado momento foram influenciados por águas marinhas. As demais razões iônicas permitiram observar que as amostras dos aquíferos Barreiras e Alúvio-Lacustre apresentam uma maior similaridade hidrogeoquímica com as águas marinhas, que os demais aquíferos.

Os resultados sugerem uma semelhança hidrogeoquímica entre que os aquíferos Alúvio-Lacustre e Barreiras. Ambos possuem águas de características ácidas, além de seus valores de pH, condutividade elétrica e teores de cloreto, salvo algumas amostram, serem parecidos. Além disso, suas respectivas razões iônicas comportam-se sempre de maneira semelhante. Tal

fato pode ser explicado por ambos aquíferos serem mais rasos e de caráter livre a semiconfinado.

Os aquíferos São Tomé I e São Tomé II, segundo os resultados, não apresentam muitas diferenças hidrogeoquímicas. Caracterizam-se por águas que tendem a neutralidade, pertencentes à fácies cloretada sódica apresentando razões iônicas típicas de águas continentais.

As amostras dos poços BF-01 e 02 de fato mostram uma afinidade hidrogeoquímica, em quase todos os aspectos, com as demais amostras entendidas como aquífero Emborê. Esse fato corrobora a proposição dos pesquisadores do Projeto Emborê que entendem que há uma extensão do aquífero até os arredores dos poços BF-01 e 02. Essa hipótese, no entanto, demanda estudos hidrogeológicos e estratigráficos detalhados.

O poço BF-03, como já esperado, mostrou-se de fato hidroquimicamente incompatível, em praticamente todos os parâmetros, com as demais amostras do aquífero Emborê analisadas nesse trabalho. Além disso, também não apresentam características hidrogeoquímicas compatíveis com o aquífero São Tomé II. Das simulações de modelagens propostas, não houve um resultado muito positivo, indicando a necessidade de estudos adicionais para que hipóteses conceituais mais robustas possam ser construídas.

Quanto ao estado de saturação das amostras analisadas com o PHREEQCi, observou-se que as águas subterrâneas dos poços BF-01 e BF-02 têm comportamento muito semelhante entre si, apresentando-se em geral subsaturadas a levemente subsaturadas nos minerais mais importantes presentes na área de estudo (sulfatados, carbonáticos), à exceção da barita no poço BF-01. Particularmente a halita está fortemente subsaturada em todos os poços analisados. Os hidróxidos de ferro e silicatos nos três poços estão em geral supersaturados nessas águas, principalmente a muscovita, o que não é surpresa dada a baixa solubilidade desses compostos. A exceção fica por conta da anortita, bastante subsaturada.

Com respeito à modelagem hidrogeoquímica, não foi possível até o momento obter hipóteses de trabalho que levassem em conta os fenômenos locais que respondessem pela composição das águas do aquífero raso na zona dos poços BFs, pois, embora alguns resultados tenham sido gerados, os erros são demasiadamente grandes para serem

considerados modelos viáveis na natureza. Isso remete à grande complexidade genética daquelas águas subterrâneas.

8) BIBLIOGRAFIA

ALCALÁ, F.J.; CUSTODIO, E. Using the Cl/Br Ratio As a Trace to Identify the Origin of Salinity in Aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, v. 359, p. 189-207, 2008.

APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Rotterdam, Holanda: Balkema, 2005. 2nd Ed. 649 p.

BARRETO, A.B.C.; MONSORES, A.L.M.; LEAL, A.S. & PIMENTEL, J. *Caracterização Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro*, Brasília/CPRM, 2001. Mapa. CD-ROM. (Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro).

BELKHIRI, L.; MOUNI, L.; TIRI, A. Water-rock interaction and geochemistry of groundwater from the Ain Azel aquifer, Algeria. *Environ Geochem Health*. 2011. Online Edition DOI 10.1007/s10653-011-9376-4

BENTO, E.S. *Hidrogeoquímica e Modelo Hidrogeológico das Águas Subterrâneas no Baixo curso do Rio Macaé, Município de Macaé – RJ*. 2006. 180 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CAETANO, L. C. *Água subterrânea no município de Campos dos Goytacazes (RJ): uma opção para o abastecimento*. 2000. 163 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CAPUCCI, E. B. – *Água Subterrânea na Baixada Campista*. I SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE 2003. Petrópolis, RJ. Anais. ABAS.

CPRM/LABHID-UFPE. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza - CE. Coordenadores: FEITOSA, F. A. C.; MANUEL FILHO, J. 412 p., 1997.

CPRM, 2001. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro* / organizado por Luiz Carlos da Silva e Hélio Canejo da Silva Cunha. – Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega, 2º ed., v.1, 2350 p., 1983.

DRM-Departamento de Recurso Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Mapa Geológico da Porção Emersa da Bacia de Campos, RJ – Projeto Emborê, Jun/2011. Mapa col. Escala 1:200.000

GATTO, L.C.S. (1983). Geomorfologia. In: BRASIL Projeto RADAMBRASIL. Folhas SF 23/24 – Rio de Janeiro/Vitória.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano - evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 203-235.

HEM, J. D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 3º edição, 1985.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J.M.L.; FLEXOR, J.M.. *Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo*. Belo Horizonte, CPRM-FAPESP, 104 p., 1997.

MARTINS, A. M; CAPUCCI, E.; CAETANO, L. C.; CARDOSO, G.; BARRETO, A. B. C.; MONSORES, A.L. M.; LEAL, A. S.; VIANA, P. Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro – Síntese e estágio atual do conhecimento. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2006, Curitiba, Anais. Paraná. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2006. P 1-17.

PARKHURST, D. L., APPELO, C. A. J. User's guide to PHREEQC – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Colorado: 2005. U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99-4259 .

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In FEITOSA, F.A.C. MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, p. 81-102, 2000.

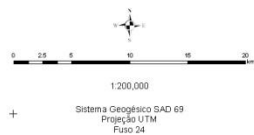
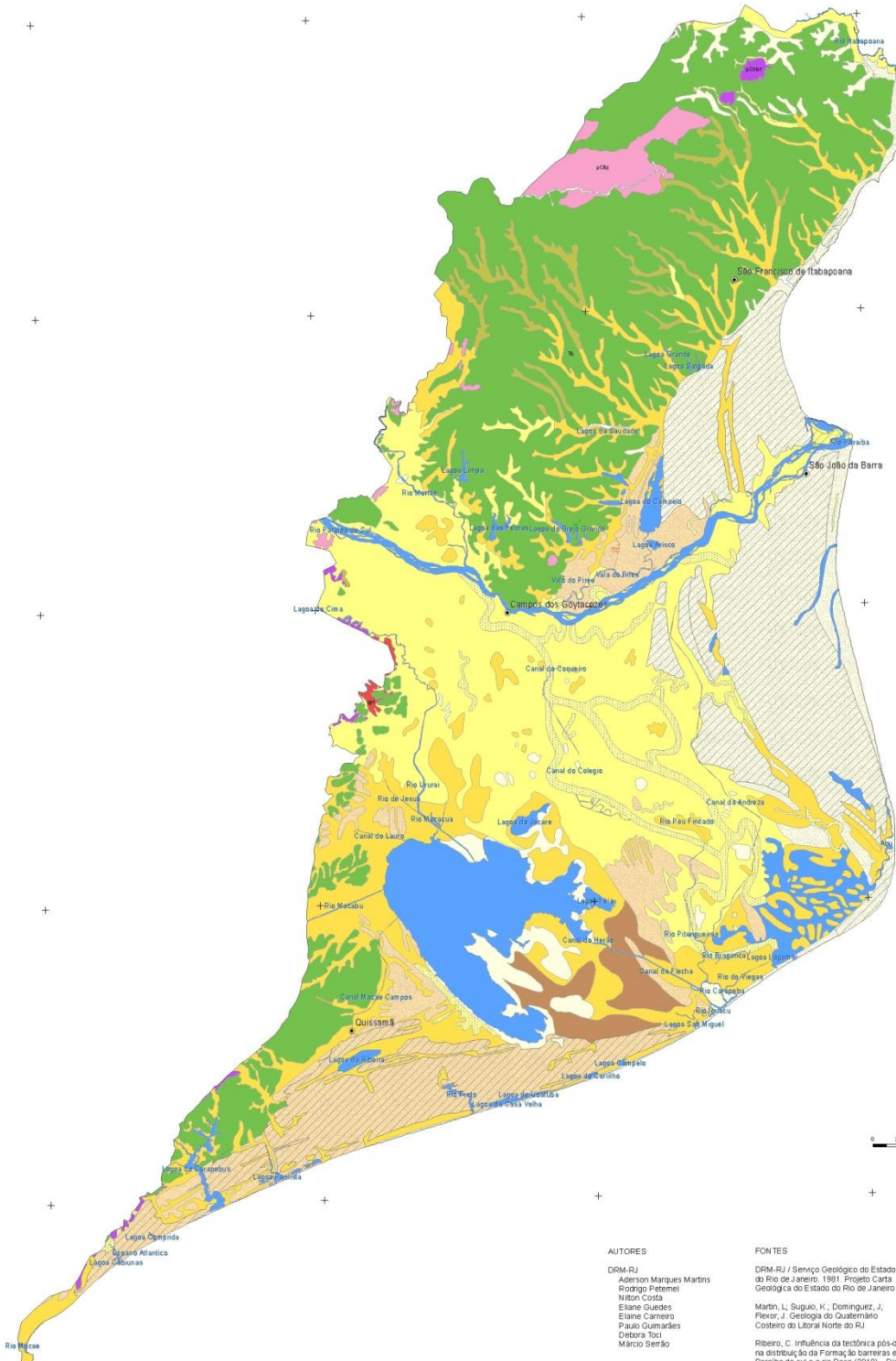
SILVA, L. C, & CUNHA, H.C.S. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro*: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, escala 1:400.000. Brasília: CPRM, 20001 (1 CD-ROM).

WINTER, R. W. et al. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v.15, n.2 p.501-509, maio/nov. 2007.

ANEXO 1

MAPA GEOLÓGICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE CAMPOS

MAPA GEOLÓGICO DA PORÇÃO EMERSA DA BACIA DE CAMPOS, RJ - PROJETO EMBORÊ



AUTORES

DRM-RJ
Aderson Marques Martins
Rodrigo Petrelet
Nilson Costa
Elaine Guedes
Elaine Carneiro
Paulo Guimarães
Débora Toci
Márcio Serão

DGEOIG-UFRJ

Claudio Limeira Mello
Thais Coelho Breda

REV 01
em 30/05/2011


FONTES

DRM-RJ / Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro. 1981. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro.
Martin, L., Suguio, K., Dominguez, J., Florin, J. Geologia do Quaternário Costeiro do Litoral Norte do RJ
Ribeiro, C. Influência da tectônica pós-deposicional na distribuição da Formação barreiras entre o rio Paraíba do sul e o rio Doce (2010) – Dissertação de Mestrado – PPRL – DQEQ – IG-UFRJ
Breda, T. Análise multiclar da Formação Barreiras na área emersa da Bacia de Campos entre Búzios e Campo dos Goytacazes (RJ) – Dissertação de Mestrado em desenvolvimento – PPRL/DQEQ-IG/UFRJ



+ LEGENDA


Geologia

 Areia marinha litorânea

Areias marinhas litorâneas bem selecionadas.

 Sedimentos arenosos de paleocanais

Sedimentos arenosos de paleocanais.

+  Sedimento lagunar ou de fundo de baía indiferenciados

Sedimentos lagunares ou de fundo de baía indiferenciados (areias a argila). Podem conter conchas de molusco. Frequentemente esses sedimentos estão recobertos por uma camada turfosa.


 Sedimento continental indiferenciado

Sedimentos continentais indiferenciados: aluviões e coluviões.

 Sedimento indiferenciado de lagos e pântanos

Sedimentos indiferenciados de lagos e pântanos (frequentemente argilas ricas em matéria orgânica).

PLEISTOCENO

+  Areia marinha litorânea

Areias marinhas litorâneas bem selecionadas. Podem apresentar uma coloração escura em consequência da presença de matéria orgânica de origem secundária.

 Sedimento continental indiferenciado

Sedimentos continentais indiferenciados: aluviões e coluviões.

 Sedimento indiferenciado de lagos e pântanos

Sedimentos indiferenciados de lagos e pântanos (frequentemente argilas ricas em matéria orgânica).

QUATERNÁRIO INDIFERENCIADO

 Sedimento continental indiferenciado

Sedimentos continentais indiferenciados: aluviões e coluviões.

PLIOCENO

 Formação Barreiras

Depósitos continentais representados por níveis descontínuos alternados de material friável e mal selecionado, desde arenosos, areno-argilosos e argilosos, constituídos principalmente por grãos de quartzo.


PRÉ CAMBRIANO

 Granito Itaoca

Granito cinza-claro, granulação média, textura granular-xenomórfica e algo porfírica, com leve foliação, constituído por K-feldspato, plagioclásio, oligoclásio, quartzo, biotita e acessórios: apatita, zircão allanita e magnetita.

 Unidade São Fidélis

Migmatitos constituídos predominantemente de (k-fd)-gd-(sil)bi-qz-pg-gnaisses, granulação média à grossa, textura granoblástica a porfiroblástica, contendo leuossoma leptinitico e lentes de rocha calcossilicatada.

 Unidade Bela Joana

Migmatitos constituídos geralmente de (hn)-(hp)-(kfd)-bi-qz-pg-gnaisses, de granulação grossa à média, coloração cinza-esverdeada, apresentando texturas gnáissicas, estruturas migmáticas do tipo "schlieren" e nebulítica. Presença de neossomas leptiniticos.


Morfologia

 Cordão arenoso

Alinhamentos de antigos cordões arenosos

Conv. Cartográfica

 Sede municipal

 Delimitação do Projeto Emborê

 Hidrografia

AUTORES

DRM-RJ
Aderson Marques Martins
Rodrigo Petemel
Nilton Costa
Eliane Claudes
Elaine Carneiro
Paulo Guimarães
Deltora Toci
Márcio Serrão

DIGEOIG-UFRJ
Claudio Limeira Mello
Thaís Coelho Branda

REV. 01
em 30/06/2011

FON TES

DRM-RJ / Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro. 1981. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro.

Martin, L.; Suguio, K.; Dominguez, J.; Flexor, J. Geologia do Quaternário Costeiro do Litoral Norte do RJ.

Ribeiro, C. Influência da tectônica pós-deposicional na distribuição da Formação Barreiras entre o rio Paraíba do sul e o rio Coque (2010) – Dissertação de Mestrado – PPGI – DGEO – IG-UFRJ

Breda, T. Análise multiescalar da Formação Barreiras na área emersa da Baía de Campos entre Búzios e Campos dos Goytacazes (RJ) – Dissertação de Mestrado em desenvolvimento – PPGI/DGEO/IG-UFRJ



ANEXO 2

TABELA DE DADOS RETIRADOS DE CAETANO (2000)

Poço	X	Y	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁼	Fe	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	STD	pH	C.E
03-GOY	264090	7584650	485	nd	105	0	5,6	72	27,6	nd	nd	1112	7,12	nd
10-RAI	263600	7591450	225	nd	101,26	0	0,7	37,2	9,84	nd	nd	520	7,32	>1000
24-PGF	258500	7571500	1800	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
27-URU	252600	7586400	25	200	170	0	48	104	12	33	0	480	7	>1000
28-URU	252750	7585850	180	7	122	0	13	40	12	62	0	410	7,5	>1000
29-ANA	262650	7585950	106	87,5	95,16	0	0,4	nd	nd	nd	nd	222	6,7	nd
30-URU	252100	7586600	173	32,4	101	0	1,76	69,4	2,28	95,5	3,1	nd	7,8	nd
31-BEC	262250	7588950	55	nd	97,6	0	4,8	20	6	nd	nd	260	7	nd
32-ANA	262600	7585950	85	6	146	0	0	24	10	66	0	285	8	1000
33-ANA	262550	7585950	85,2	10	154,2	0	0,12	31,4	0,1	67	0,78	300	6,5	462
38-TOC	261150	7578700	78	886	70,76	0	0,9	nd	nd	nd	nd	1117	6,6	nd
35-GRU	287620	7597126	121	nd	146,4	0	0,1	10	13,2	nd	nd	547	7,36	nd
41-SSE	271436	7581719	88	75	62	0	0,5	nd	nd	nd	nd	nd	6,8	nd
52-SCL	284474	7617678	714	66	112	124	0	102	33	1,4	0,1	1753	7,9	1200
53-SJB	287732	7604453	134	54,9	109	0	nd	34	0	136	5,55	553	nd	850
54-BAR	273797	7594543	71	47,5	32	0	nd	nd	nd	nd	nd	440	nd	nd
55-GAR	286133	7612400	270	29	272	0	nd	53	4,2	23,4	7	720	nd	1449
56-SES	289600	7597973	85	115	75,6	0	nd	nd	nd	nd	nd	266	nd	nd
57-GRU	287732	7597200	121	0	146	0	nd	10	13,3	nd	nd	547	nd	nd
58-GAR	285150	7612000	126	57	108	60	nd	12	9	7,8	0,2	553	nd	680
59-GAR	285450	7611020	102	52,4	107,36	0	0,2	nd	nd	nd	nd	168	7,2	nd
61-BAR	274133	7595333	78	174,6	53,68	0	0,1	nd	nd	nd	nd	267	6,6	nd
68-DMA	241250	7566250	71	nd	14,64	0	0,4	8,8	4,3	nd	nd	198	5,61	nd
76-GRU	289400	7599750	161,7	82,5	175,68	0	<0,05	nd	nd	193,2	7,9	nd	7,1	896
77-ATA	289735	7606762	137,2	132	215,94	0	0,3	nd	nd	213	9,3	nd	7	958
79-AÇU	293791	757760	28,9	49,5	235,46	3,54	0,06	nd	nd	129,2	6,4	nd	8,4	529
81-GAR	284343	7611375	91,5	nd	182,39	0	0,15	nd	nd	nd	nd	463	6,86	nd
82-GAR	283843	7610863	453,7	nd	305	75	0,3	nd	nd	nd	nd	949	6,36	nd
83-GAR	285473	7611027	67	58,3	177,6	0	0,2	nd	nd	nd	nd	174	7,4	nd

84-BIT	294324	7643665	7	168	65,88	0	0	nd	nd	nd	nd	215	6,5	nd
88-GRU	288183	7597545	123	163	191	0	0,1	21	0,62	219	10,5	nd	nd	nd
92-FAR	283100	7562200	9,8	nd	248	0	0,1	nd	nd	nd	nd	190	6,82	310
36-SAB	273136	7577833	77	nd	176,9	0	0,5	20,4	7,9	nd	nd	nd	7,9	nd
39-FAR	283054	7562245	14	8,8	208	155	0,4	47	11	2,5	0,2	294	7,8	380
40-FAR	283360	7563216	10	7,3	190	116	0,4	44	2	2,7	0,2	279	7,7	400

ANEXO 3

TABELA DE DADOS RETIRADOS DA BASE DE DADOS DO LABORATÓRIO DE
HIDROGEOLOGIA UFRJ

POÇO	Projeto	X	Y	PROF.	Ph	Cond	SO4	O3	HCO3	Br	Cl	Ba	Mn	Na	Ca	Sr	Fe	Mg	K	SiO2	TSD	Dureza
Farol 01	FAPERJ-2009	282801	7563714	220	7.60	452.00	0.52	0.00	207.15	0.07	24.26	0.628	0.135	33.160	34.962	0.416	0.020	11.291	5.188	20.252	267.39	155.00
São Sebastião 02	FAPERJ-2010	271520	7581764	170	7.20	1626.00	39.59	0.00	78.00	1.27	407.90	0.567	0.286	212.170	45.247	0.613	0.003	22.698	13.118	15.186	813.58	220.00
Saturnino Braga 03	FAPERJ-2011	273187	7577892	137.5	8.20	435.00	0.08	0.00	194.43	0.13	38.15	0.384	0.057	52.110	24.703	0.298	0.017	7.895	5.007	16.846	262.53	125.00
Donana 04	FAPERJ-2012	262475	7585579	104	7.30	953.00	28.49	0.00	96.85	0.81	226.03	0.205	0.186	119.390	41.437	0.598	0.006	15.433	5.421	15.955	525.94	200.00
Sto Antônio 05	FAPERJ-2013	262289	7589022	70	7.50	299.00	0.09	0.00	47.69	0.10	37.01	0.418	0.176	23.889	8.209	0.104	0.000	3.695	2.722	8.920	119.12	50.00
INB 06	FAPERJ-2014	289946	7629650	45	5.10	355.00	12.21	0.00	0.00	0.23	99.78	0.098	0.010	63.600	1.050	0.018	0.009	3.477	1.718	5.366	198.27	30.00
Aldeia 07	FAPERJ-2015	279608	7643925	40	3.55	685.00	6.53	0.00	0.00	0.15	102.09	0.154	0.047	46.640	11.970	0.190	0.026	20.200	11.270	3.509	350.46	135.00
Sto Amaro 08	FAPERJ-2016	280419	7647555	108	4.52	461.00	12.57	0.00	6.49	0.15	54.79	0.143	0.069	23.050	4.736	0.099	0.006	5.837	5.175	8.129	141.99	110.00
São Paulinho 09	FAPERJ-2017	285621	7644726	128	7.81	1515.00	22.38	0.00	141.54	0.86	332.32	0.165	0.053	175.000	27.360	0.735	0.000	12.490	1.166	10.230	664.57	170.00
Lagoa Feia 10	FAPERJ-2018	288166	7648020	130	3.40	1464.00	21.02	0.00	0.00	0.96	404.25	0.190	0.064	180.200	7.442	0.154	0.110	16.590	7.726	8.983	695.48	125.00
Morro do Bode 11	FAPERJ-2019	288564	7645821	100	4.21	655.00	13.96	0.00	4.54	0.39	110.25	0.095	0.035	44.920	4.268	0.089	0.000	11.470	6.927	5.068	236.03	125.00
Atafona 12	FAPERJ-2020	291591	7606720	210	6.80	983.00	99.78	2.39	121.02	0.53	156.61	0.041	0.656	153.880	19.430	0.234	0.019	9.090	6.355	29.580	571.86	95.00
Grussaí 13	FAPERJ-2021	289432	7600431	161	6.80	739.00	45.52	0.00	94.54	0.49	143.31	0.046	0.247	119.150	11.820	0.152	0.072	7.540	4.770	32.150	448.72	60.50
Gargaú 14	FAPERJ-2022	285445	7612155	138	5.20	1132.00	130.31	0.00	141.10	0.63	192.66	0.037	0.487	188.950	17.030	0.210	0.042	11.640	5.516	27.030	675.17	90.50
Degredo 15	FAPERJ-2023	282320	7596882	178	4.30	607.00	53.77	0.00	90.34	0.34	98.86	0.048	0.046	106.350	7.010	0.090	0.245	3.520	4.354	28.100	379.70	32.00
Barcelos 16	FAPERJ-2024	273794	7594558	158	4.60	528.00	36.98	0.00	61.99	0.32	95.95	0.056	0.019	90.250	5.610	0.073	0.234	1.580	3.517	24.720	318.50	20.50
Fazenda Vista Alegre I		242679	7555852	36.00	4.60	900.00	114.00	0.00	8.58	0.87	281.00	0.027	0.360	179.000	28.600	0.170	3.040	21.600	10.900	4.580	736.00	160.00
Fazenda Machadinha		246817	7561440	128.00	5.40	3240.00	240.00	0.00	0.00	1.00	979.00	0.053	0.076	483.000	68.700	0.710	0.680	65.900	114.000	9.330	2250.00	443.00

Fazenda Vista Alegre II		242713	7556023	30.00	5.00	441.00	104.00	0.00	0.00	0.45	114.00	0.021	0.030	76.700	6.100	0.089	0.032	12.800	8.120	8.510	428.00	68.00
BF- 01	Emborê	275771	7552916	250.00	7.10	315.00	7.33	0.00	169.00	0.04	13.80	0.150	0.100	54.700	11.600	0.140	1.420	3.260	6.870	57.800	206.00	42.30
BF-02	Emborê	273084	7551542	250.00	7.00	467.00	12.50	0.00	181.00	0.17	29.20	0.530	0.054	59.400	23.000	0.220	0.780	7.580	7.030	43.400	263.00	88.60
BF-03	Emborê	271479	7551234	150.00	7.04	3951.00	165.00	0.00	209.00	3.74	1210.00	1.380	0.210	602.000	209.000	1.450	10.700	78.000	16.400	45.400	2610.00	843.00

ANEXO 4

DADOS DAS MODELAGENS HIDROGEOQUÍMICAS

- SOLUTION Lagoa Feia
- temp 25.5
- pH 9.3
- units mg/l
- Alkalinity 12.5 as HCO3
- Ca 5.84
- Na 12.2
- K 3.26
- Cl 10.2
- S(6) 9.03
- SOLUTION UFRJ-3
- temp 20
- pH 7.04
- units mg/l
- Alkalinity 209 as HCO3
- Ca 209
- Na 602
- K 16.4
- Cl 1210
- S(6) 165
- INVERSE_MODELING 1
- solutions 63 23
- uncertainty 0.3 0.2
- phases
- H2O(g) pre
- Calcite
- Halite
- Anhydrite
- range 1000
- tolerance 1e-005
- mineral_water true
- multiple_precision true
- mp_tolerance 1e-012
- censor_mp 1e-020

Solution fractions:	Minimum	Maximum
Solution 63	4.363e+001	7.276e+001
Solution 23	1.000e+000	1.000e+000

Phase mole transfers:	Minimum	Maximum
H2O(g)	-2.366e+003	-2.366e+003
Calcite	-2.409e-003	-2.148e-003
Halite	1.105e-002	1.529e-002
Anhydrite	-1.674e-003	-8.049e-004

Redox mole transfers:

Sum of residuals (epsilons in documentation):	1.493e+002
Sum of delta/uncertainty limit:	8.920e+000
Maximum fractional error in element concentration:	3.000e-001

Model contains minimum number of phases.

=====

Summary of inverse modeling:

Number of models found:	1
Number of minimal models found:	1
Number of infeasible sets of phases saved:	5
Number of calls to cl1:	19

• Reading input data for simulation 2.

• -----

• SOLUTION 4 UFRJ-3

• temp 20

• pH 7.04

• pe 4

• redox pe

• units mg/l

• density 1

• Alkalinity 208.6 as HCO3

• Na 602

• Ca 209

• K 16.4

• Cl 1210

• S(6) 165

• Si 45.4

• water 1 # kg

• INVERSE_MODELING 1

• solutions 3 4

• uncertainty 0.25 0.25

• phases

• H2O(g) pre

• Calcite

• CO2(g)

• Gypsum

• Halite

• K-Mica

• K-feldspar

• range 1000

• tolerance 1e-09

• uncertainty_water 0.2

• mineral_water true

• END

• SOLUTION 1 Agua Marinha

• units ppm

• pH 8.22

• pe 8.451

• density 1.023

• Ca 412.3

• # Mg 1291.8

• Na 10768.0

• K 399.1

• Si 4.28

• Cl 19353.0

• Alkalinity 141.682 as HCO3

• S(6) 2712.0

• SOLUTION 2 Chuva

• pH 5.5

• MIX 1

• 1 0.00129

• 2 0.99871

• SAVE solution 3

• Solution fractions: Minimum Maximum

• Solution 3 9.964e-001 9.964e-001 1.004e+000

• Solution 4 1.000e+000 1.000e+000 1.000e+000

• Phase mole transfers: Minimum Maximum

• Calcite 1.792e-003 1.779e-003 1.993e-003 CaCO3

• CO2(g) 2.759e-003 2.667e-003 3.064e-003 CO2

• Gypsum 2.115e-003 1.911e-003 2.124e-003 CaSO4:2H2O

• Halite 2.563e-002 2.488e-002 3.226e-002 NaCl

• K-mica -1.509e-004 -1.578e-004 -1.491e-004

• KAl3Si3O10(OH)2

• K-feldspar 4.526e-004 4.474e-004 4.734e-004 KAlSi3O8

• Redox mole transfers:

• Sum of residuals (epsilons in documentation): 6.541e+000

• Sum of delta/uncertainty limit: 6.543e+000

• Maximum fractional error in element concentration: 2.500e-001

• Model contains minimum number of phases.

• =====

• Summary of inverse modeling:

• Number of models found: 1

• Number of minimal models found: 1

• Number of infeasible sets of phases saved: 13

• Number of calls to cl1: 31

• -----

• End of simulation.

• -----