

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

FRANCISCO DE ASSIS CHAVES DE BRITO

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇOS NO CRISTALINO

N.Cham. D 551.492 B875v

Autor: Brito, Francisco de

Título: Variabilidade espacial e tempora



13848052

Ac. 74319

BLCM

FORTALEZA
2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇOS NO CRISTALINO
FRANCISCO DE ASSIS CHAVES DE BRITO

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇOS NO CRISTALINO

Dissertação submetida à Comissão
de Pós-graduação em Física, da Universidade
Federal do Ceará, como requisito para a obtenção
do título de Mestre em Física.

FORTALEZA
2005

FRANCISCO DE ASSIS CHAVES DE BRITO

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇOS NO CRISTALINO**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Física, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Física.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Marlúcia F.Santiago

**FORTALEZA
2005**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA
DE POÇOS NO CRISTALINO**

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Física, da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Mestre em Física .

Aprovada em 17 / 02 / 2005

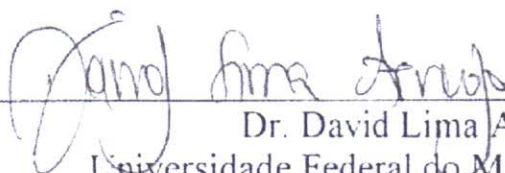
BANCA EXAMINADORA



Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará - UFC



Dr. Horst Frischkorn
Universidade Federal do Ceará - UFC



Dr. David Lima Azevedo
Universidade Federal do Maranhão - UFMA



Dr. Luís Parente Maia
Universidade Federal do Ceará - UFC

Aos meus adorados pais, Assis Brito e Fátima Chaves, pela orientação moral e excelência com que desempenham os seus papéis. Aos meus queridos irmãos, Daniel, André, Rafael e Raquel, pela amizade e apoio ao longo da minha vida e à minha amada namorada, Sarah, pelo carinho, companheirismo e compreensão no decorrer deste trabalho.

O sucesso nasce do querer. Sempre que o homem aplicar a determinação e a persistência para um objetivo, ele vencerá os obstáculos e, se não atingir o alvo, pelo menos fará coisas admiráveis.

(José de Alencar)

AGRADECIMENTOS

Expresso meu especial agradecimento:

A Deus por ter me dado o dom da vida e sabedoria para guiar meus passos.

À professora Maria Marlúcia Freitas Santiago, pela paciência, apoio incondicional, compreensão, ensinamentos, disponibilidade e incentivo no desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor José Ossian Gadelha de Lima pela paciência e ajuda indispensável nas análises químicas.

Ao Vinícius Feijó Cordeiro, por sua amizade e valiosa ajuda nas coletas de água em Caucaia para análise.

Aos professores da graduação e da pós-graduação do Departamento de Física, que contribuíram para a minha formação.

Aos Drs. José Soares de Andrade Junior e Josué Mendes Filho respectivamente coordenador e vice-coordenador do Curso de Pós-Graduação pelo apoio recebido.

A Maria do Carmo Germano (Carminha) pela valiosa colaboração na montagem do texto final, convivência, força e amizade.

Aos colegas do Grupo do Carbono 14, Carlos José Freire Machado, Luiz Alberto Ribeiro Mendonça, Maria Aparecida Belém Fernandes, Lucilene Pereira Carla Maria Salgado Vidal Silva e Manuel Roberval, pela convivência, força e amizade.

Aos amigos da Pós-Graduação José Alves, Geová Marciel, Hiroshi Kimura, André Girão e Demétrius, pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários da secretaria da pós-graduação da Física pela disponibilidade e à D. Sílvia pelos cuidados na limpeza do meu ambiente de trabalho.

Aos meus amigos indispensáveis do INTERFASE, Andréa Pinheiro, Crisostomo Brito, Ismênia Brito, Roberta Brito, Daniel Quitiliano, Ítalo Farias e Prof. Márcio Rebouças pela

cumplicidade nos momentos alegres e difíceis da minha vida e pelo carinho prestado ao longo dessa caminhada.

À FUNCEME, pelos dados que me foram fornecidos indispensáveis para a conclusão desta dissertação.

À CAPES pelo apoio financeiro na realização deste Curso de Mestrado bolsa de estudo concedida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para realização do trabalho.

À FUNCAP pelo apoio aos laboratórios de pesquisa utilizados na realização deste trabalho.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho.

RESUMO

Durante o período de março de 2003 a abril de 2004, cento e cinquenta e três amostras de água subterrânea foram coletadas em 16 poços no cristalino. A análise hidroquímica de 23 parâmetros realizada neste conjunto de amostras foi a base de dados para entender a dinâmica da qualidade da água armazenada no cristalino. Os resultados do trabalho mostram que: (i) em cada poço, a concentração de sais diminui no início do período chuvoso e aumenta no início do período seco, atingindo o valor característico de cada poço; (ii) em geral, as mudanças de salinidade não produzem mudanças significativas no tipo hidroquímico das amostras; (iii) a dissolução de alumino-silicatos não é um processo dominante para salinidade das águas; (iv) o monitoramento do poço P2 durante cinco anos mostrou que as variações na salinidade são cíclicas; (v) no poço P8 foi verificada a contribuição de uma lagoa para o aquífero; (vi) em alguns poços a concentração de nitrato teve um valor acima de 45mg/L, que indica contaminação; (vii) a variação espacial da salinidade reflete a heterogeneidade do sistema de fraturas que armazenam a água.

ABSTRACT

During the period from March of 2003 to April of 2004, one hundred and fifty three samples of ground-water were taken from sixteen wells in the crystalline basement. Hydrochemical analysis of 23 parameters in this sample set was the database to understand the water quality dynamics in the crystalline basement. Results show that: (i) in each well, the salts concentrations decrease at the beginning of the rainy season and increase during the dry period until a characteristic value for every well is achieved; (ii) in general, the changes in salinity do not produce significant changes in the hydrochemical type of the water; (iii) the aluminum-silicate dissolution is not a dominant process for water salinity; (iv) the monitoring of well P2 during five years showed that the salinity variations are cyclic; (v) in well P8 a contribution from a lake to the aquifer is verified; (vi) in some wells the nitrate concentration reached values above 45mg/L, indicating contamination; (vii) the strong spatial variation of salinity can be explained through of the system of fractures that store the water.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Localização da área de trabalho e pontos de amostragem.....	20
FIGURA 2.2	Perfil esquemático de poços no cristalino.....	28
FIGURA 4.1	Série convergente de Goldich.....	37
FIGURA 5.1	Histograma de valores de condutividade elétrica.....	62
FIGURA 5.2	Histograma de valores de pH.....	63
FIGURA 5.3	Diferença entre valores máximos e mínimos da condutividade elétrica em todo período de estudo	65
FIGURA 5.4	Variação da condutividade elétrica em amostras do poço P2 no período de maio de 1999 a setembro de 2004.....	67
FIGURA 5.5	Diagrama de Piper com águas dos poços P01 a P08.....	69
FIGURA 5.6	Diagrama de Piper com águas dos poços P09 a P16.....	70
FIGURA 5.7	Pluviosidade mensal na área e variação da condutividade elétrica com o tempo.....	73
FIGURA 5.8	Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de cloro com o tempo.....	75
FIGURA 5.9	Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de sódio com o tempo.....	76
FIGURA 5.10	Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de cálcio com o tempo.....	77
FIGURA 5.11	Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de bicarbonato com o tempo.....	78
FIGURA 5.12	Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de magnésio com o tempo.....	79
FIGURA 5.13	Concentrações dos íons maiores em 7 poços. P02a: coleta de setembro de 2003 e P02b: coleta de setembro de 2004.....	81
FIGURA 5.14	Concentração de amônia de todas as amostras.....	82
FIGURA 5.15	Concentração de nitrito de todas as amostras.....	83
FIGURA 5.16	Concentração de nitrato de todas as amostras.....	84
FIGURA 5.17	Concentração de alumínio de todas as amostras.....	86

FIGURA 5.18	Concentração de sódio versus concentração de alumínio.....	87
FIGURA 5.19	Concentração de cálcio versus concentração de alumínio.....	87
FIGURA 5.20	Concentração de magnésio versus concentração de alumínio.....	88
FIGURA 5.21	Concentração de ferro de todas as amostras.....	89
FIGURA 5.22a	Concentração de sódio versus concentração de cloretos nas amostras dos poços P01 a P08.....	90
FIGURA 5.22b	Concentração de sódio versus concentração de cloretos nas amostras dos poços P09 a P16.....	91
FIGURA 5.23a	Concentração de cálcio versus concentração de bicarbonatos nas amostras dos poços P01 a P08.....	91
FIGURA 5.23b	Concentração de cálcio versus concentração de bicarbonatos nas amostras dos poços P09 a P16.....	92
FIGURA 5.24a	Concentração de sódio versus concentração de cálcio nas amostras dos poços P03, P05 e P08.....	93
FIGURA 5.24b	Concentração de sódio versus concentração de cloretos nas amostras dos poços P09 a P16.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Parâmetros climáticos medidos na estação meteorológica de Fortaleza durante o ano de 2004	23
TABELA 5.1	Localização e condições de uso dos pontos coletados no município Caucaia	49
TABELA 5.2	Hidroquímica das amostras coletadas, em 02/04/2003, nos poços P01, 03, 05, 06, 07 e 08 e em 23/04/2003 nos poços P09, 10, 11, 12 e 13....	50
TABELA 5.3	Hidroquímica das amostras coletadas, em 14/05/2003, nos poços P01, 02, 03, 04, 05, 07 e 08 e em 28/05/2003 nos poços P06, 09, 10, 11, 12, 15 e 16.....	51
TABELA 5.4	Hidroquímica das amostras coletadas, em 17/06/2003, nos poços P01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 03/07/2003 nos poços P09, 10, 11, 12, 15 e 16.....	52
TABELA 5.5	Hidroquímica das amostras coletadas, em 30/07/2003, nos poços P01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 26/08/2003 nos poços P09, 10, 11, 12 e 15.....	53
TABELA 5.6	Hidroquímica das amostras coletadas, em 17/09/2003, nos poços P01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 30/09/2003 nos poços P09, 10, 11, 12, 15 e 16.....	54
TABELA 5.7	Hidroquímica das amostras coletadas, em 15/10/2003, nos poços P01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07 e em 28/10/2003 nos poços P09, 10, 11, 12, 15 e 16.....	55
TABELA 5.8	Hidroquímica das amostras coletadas, em 19/11/2003, nos poços P01, 02, 03, 05, 06, 07 e 08 e em 10/12/2003 nos poços P09, 10, 11, 13, 15 e 16.....	56
TABELA 5.9	Hidroquímica das amostras coletadas, em 22/12/2003, nos poços P01, 02, 03, 05, 06, 07 e 08 e em 13/01/2004 nos poços P09, 10, 11, 13, 14, 15 e 16.....	57

TABELA 5.10	Hidroquímica das amostras coletadas, em 03/02/2004, nos poços P01, 03, 05, 06, 07 e 08 e em 18/02/2004 nos poços P09, 10, 11, 13, 14, 15 e 16.....	58
TABELA 5.11	Hidroquímica das amostras coletadas, em 03/03/2004, nos poços P03, 05, 06, 07 e 08 e em 17/03/2004 nos poços P09, 11, 13, 14, 15 e 16....	59
TABELA 5.12	Hidroquímica das amostras coletadas, em 30/03/2004, nos poços P01, 02*, 03, 05, 06, 07 e 08 e em 13/04/2004 nos poços P02**, 09, 11, 13, 14, 15 e 16.....	60
TABELA 5.13	Hidroquímica das amostras coletadas, em 17/08/2004, nos poços P02*, 03, 07 e 08 e em 14/09/2004 nos poços P02**, 09, 13, 14, 15 e 16.....	61
TABELA 5.14	Limites de valores de condutividade elétrica e de pH nos 16 poços....	64
TABELA 5.15	Variação das concentrações dos íons maiores no período seco e no período chuvoso nos poços P09 e P13	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Revisão Bibliográfica.....	16
1.2	Objetivos.....	18
2	ÁREA	19
2.1	Localização.....	19
2.2	Clima.....	19
2.3	Geologia.....	24
2.3.1	Morfologia.....	24
2.3.2	Hidrogeologia.....	25
2.3.3	Hidrologia do cristalino.....	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	Trabalho de Campo.....	29
3.2	Trabalho de Laboratório.....	33
3.3	Tratamento de dados.....	34
3.3.1	Diagrama de Piper.....	34
4	OS ÍONS MAIS ABUNDANTES NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	35
4.1	Cálcio.....	38
4.2	Magnésio.....	39
4.3	Sódio.....	41
4.4	Potássio.....	42
4.5	Cloreto.....	44
4.6	Sulfato.....	46
4.7	Bicarbonatos e carbonatos.....	46
4.8	Concentração salina das águas subterrâneas.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Resultados das análises hidroquímicas.....	49
5.2	A salinidade das águas.....	62
5.3	Classificação das águas.....	68

5.4	Variação temporal das concentrações dos íons mais abundantes.....	71
5.5	A origem dos sais.....	85
6	CONCLUSÕES.....	94
7	BIBLIOGRAFIA.....	96

1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil sofre com o fenômeno recorrente das secas que se caracteriza pela falta de chuva; o problema se agrava pela má qualidade de parte de suas águas. Sob ação da radiação solar, a água sofre intenso processo de evaporação, o que produz uma grande concentração dos sais, deixando-a, muitas vezes, imprópria para o consumo, tanto doméstico como na pecuária e na agricultura.

A primeira maneira para amenizar o problema das secas foi a construção de açudes, que têm a vantagem de armazenar a água das chuvas para uso no período de estiagem, diminuindo a migração das famílias que moram na região.

Todavia, as águas nos açudes podem atingir altas concentrações de sais devido ao fato dela estar submetido à ação da radiação solar; contudo, se chove no período de chuva a água deste reservatório é renovada. No entanto, se constata que normalmente não chove o suficiente para encher o açude e raramente ele sangra.

A segunda maneira é a implantação de poços para exploração das águas subterrâneas; no entanto, em áreas cristalinas do Nordeste, em geral, as águas apresentam elevadas concentrações salinas que chegam a inviabilizar o seu uso. Apesar disso, como 75% do Estado do Ceará se localiza em área do cristalino, o armazenamento de água neste tipo de aquífero é muito importante para a região. O armazenamento ocorre em fraturas com pouca ou sem conectividade, por isso, poços próximos um do outro, mas explorando fraturas diferentes podem apresentar grandes diferenças de salinidade.

Dada a importância das águas subterrâneas como reserva hídrica para o abastecimento da população, há necessidade de conhecer os processos através dos quais as águas do cristalino adquirem concentrações tão elevadas de sal.

Identificados estes processos naturais, pode-se pensar num planejamento para a exploração das águas que induza uma melhoria das águas salinizadas.

1.1 Revisão Bibliográfica

A partir da década de 60 vários trabalhos foram desenvolvidos no Nordeste do Brasil para caracterizar a Hidroquímica de suas águas. Enfatizamos os de Anjos & Bastos (1968), referentes a estudos desenvolvidos em Feira de Santana, de Cruz e Melo (1969), que realizaram um zoneamento da salinização das águas do Nordeste e de Santiago (1984), que estudou, mecanismos de salinização dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré, em Pentecostes no Estado do Ceará.

Nesta mesma década, o estudo da influência da alteração das rochas e minerais sobre a química das águas tornou-se expressivo com os trabalhos de Schoeller (1962), Feth et al. (1964), Bricker & Garrels (1967), Helgeson (1968), Tardy (1969; 1971), e somente a partir da década de 70 o estudo passou a se direcionar para a influência dos ácidos orgânicos, com os trabalhos de Huang & Keller (1970) e Tan (1980; 1986).

Ainda na década de 60 foram iniciados estudos sobre a qualidade das águas do Nordeste do Brasil, associada à influência da alteração de rochas e minerais. Costa (1963; 1965) considerou o ataque químico de minerais como sendo responsável pela salinização das águas subterrâneas de áreas cristalinas no Nordeste, destacando a alteração de feldspatos alcalinos, e Teixeira & Oliveira (1962) fizeram a mesma consideração, porém destacaram o ataque à biotita. Leal (1966) considerou o clima árido e Schoff (1972) as águas marinhas residuais como responsáveis pelas altas concentrações salinas.

Moreira-Nordemann & Rebouças (1986) demonstraram que o enriquecimento das águas subterrâneas em K^+ provém da alteração do K-feldspato e que o Cl^- provém principalmente da água da chuva. Szikszay & Toledo-Groke (1989) e Szikszay et al. (1990) estudaram, na bacia de São Paulo, a influência das rochas sobre a química das águas da zona não saturada, atribuindo os elevados teores de K^+ à caulinição da moscovita e do microclínio. Parisot & Rebouças (1983), ao estudar a geoquímica de aquíferos do município de São Paulo, também associaram o tipo e grau de intemperismo na alteração dos minerais às concentrações salinas.

Leprun et al. (1989) ressaltou a influência do tipo de solo na composição das águas de infiltração e de escoamento superficial, em Rondônia, observando que os solos Brunissem e Podzólicos Vermelhos Escuros, decorrentes da modificação das rochas gnáissicas e migmatíticas, liberam mais significativamente cátions e sílica para as águas, e que podzólicos Vermelhos Amarelos e Latossolos, desenvolvidos sobre granitos e sedimentos quartzosos, contêm os menores teores de cátions e sílica. Estes resultados discordam dos obtidos por Gibbs (1965; 1972), Stallard (1980) e Stallard & Edmund (1983). Vale acrescentar que Cavalcante et al. (1993) destacaram o favorecimento à salinização das águas nos solos Planossolos e nos Solonetz na região dos Inhamuns no Estado do Ceará.

Cavalcante et al. (1993) mostraram que o excedente hídrico nos mantos de intemperismo e fraturado em Atibaia (SP) é responsável pelo intemperismo químico dos feldspatos que cedem íons para o enriquecimento das águas subterrâneas. Devido ao aumento crescente da concentração iônica das águas dos poços escavados no manto do intemperismo, em relação às dos tubulares no meio fraturado, os autores constataram que o manto do intemperismo funciona como recarga de sais para o aquífero fraturado.

O carreamento de aerossóis marinhos, segundo Lima (1996), é responsável pela presença dos cloretos nas águas, visto que as rochas na área não apresentam concentração elevada de cloro. A presença de magnésio pode ser explicada através da presença de minerais ferro-magnesianos. Santiago et al. (1998) mostraram que a salinização das águas subterrâneas tem a mesma tendência que a das águas superficiais; porém, constatou desvios sistemáticos que indicam uma fonte interna de Cl⁻. O mesmo comportamento é observado para o magnésio. Neste último caso, minerais ferromagnesianos (hornblenda, hiperstênio e clorita) nos gabros e dioritos constituem fontes de magnésio, enquanto para o cloreto a apatita é o fornecedor principal. Os autores consideraram também que as amostras localizadas no campo da Ca-montmorilonita indicam contribuição do intemperismo da anortita para a concentração Ca⁺⁺ dissolvido na água e as localizadas no campo da albita e da Na-montmorilonita indicam uma possível contribuição do intemperismo da albita para a presença de íons de Na⁺ dissolvidos na água.

Silva et al. (1999) estudando a interação entre as águas de um açude e as águas subterrâneas em área cristalina constataram uma forte conexão hidráulica entre um poço e o

açude, mas nenhuma com outro poço, apesar dos poços estarem separados somente por 12 metros.

1.1 Localização

Aguiar et al. (2000) constataram que a maioria das águas nos aquíferos costeiros no município de Caucaia era do tipo cloretada sódica e, utilizando as medidas dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério, mostraram que não ocorreu contaminação dos aquíferos costeiros pela intrusão da cunha salina; concluíram assim, que os íons Na^+ e Cl^- são provenientes do processo natural de deposição de aerossóis ou de maresia.

A principal fonte de sais em poços e açudes de Tauá é o intemperismo segundo Queiroz (2000), que considera a troca de íons o mecanismo responsável pela modificação da composição química e a evaporação o mecanismo concentrador de sais.

Santiago et al. (2002) mostraram que diferentes processos contribuem para aumentar a concentração de sais nas águas subterrâneas na região cristalina no semi-árido no município de Tauá; (i) os sais são concentrados por processos físicos acelerados pelo clima local; (ii) a alta taxa de evaporação condiciona o armazenamento de sais em depressões da área, e o carreamento destes sais induz uma recarga dos reservatórios superficiais e subterrâneos com elevada concentração salina.

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação é o estudo da qualidade da água subterrânea armazenada no cristalino explorada por um conjunto de 16 poços no distrito de Coité, no município de Caucaia, comparando os valores obtidos de amostras das mesmas coletas para identificação da variabilidade espacial e medidas feitas no decorrer do ciclo hidrológico para identificação da variabilidade temporal; a identificação da origem dos sais nas águas e dos processos endógenos e exógenos responsáveis pela salinidade, tais como a dissolução de minerais durante o armazenamento da água e a entrada de sais através da água de recarga.

2 ÁREA

2.1 Localização

A área de trabalho (Figura 2.1) localiza-se no município de Caucaia, situado na porção norte/nordeste do Estado do Ceará e situa-se a uma distância de aproximadamente de 30Km de Fortaleza. Limita-se com os municípios de Fortaleza, S. Gonçalo do Amarante, Maracanaú, Maranguape, Pentecostes, além do oceano Atlântico. O acesso ao município, a partir de Fortaleza, pode ser feito através da rodovia BR-222 Fortaleza/Caucaia.

O município de Caucaia, com uma área de 1.293 km², é o maior dos municípios que formam a Região Metropolitana de Fortaleza e o terceiro em população, com 250.479 habitantes, recenseados em 2000 (IBGE, 2000).

2.2 Clima

As condições de circulação atmosférica que controlam o clima da porção setentrional do Nordeste são variadas. Destaca-se como sistema sinótico de maior importância, regulador das condições climáticas, aquele gerado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que basicamente controla a marcha sazonal das chuvas.

Esta zona é um verdadeiro cinturão de baixa pressão formado sobre os oceanos equatoriais e é assim denominado, por se tratar da faixa para onde os ventos alísios dos dois hemisférios convergem, constituindo uma banda de grande convecção, altos índices de precipitação e movimento ascendente do ar. Ela se aproxima em forma quase linear sobre o Oceano Atlântico, onde se apresenta, geralmente, como uma faixa latitudinal bem definida de nebulosidade (STUDART, 1991).



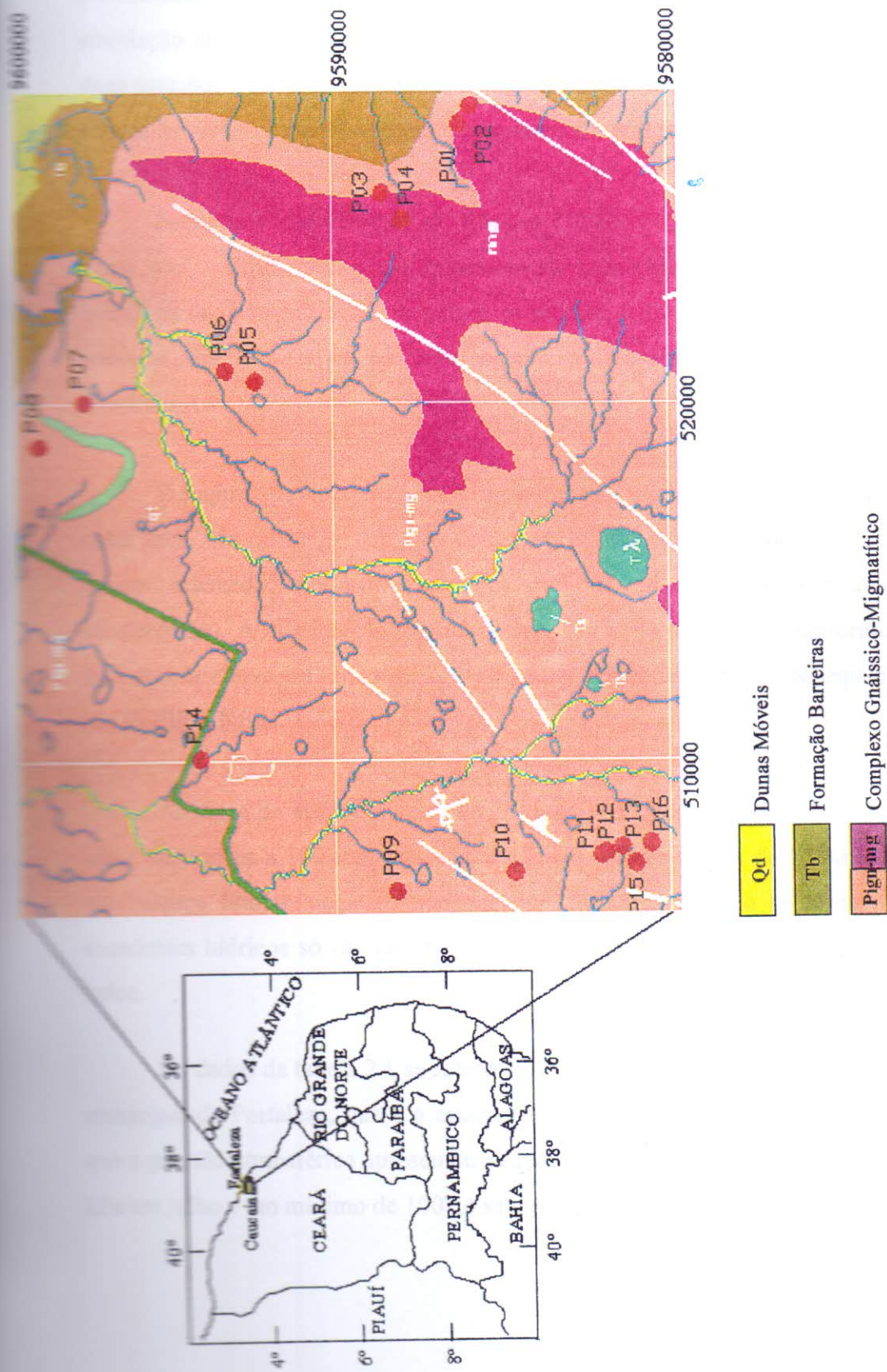


FIGURA 2.1 – Localização da área de trabalho e pontos de amostragem. (Fonte: Consórcio Golder Pivot)

Outros sistemas como a Massa Equatorial Atlântica (MEA), a Frente Polar Atlântica (FPA) e a Tépidia Kallaariana (TK) atuam sobre o Nordeste Brasileiro. O Ceará, pela proximidade do Equador, tem sua situação climática influenciada por esses mecanismos de circulação atmosférica, prevalecendo condições de clima tropical quente e semi-árido, com duas estações bem diferenciadas: precipitações concentradas em um pequeno período, com chuvas de verão-outono e o restante com estiagem prolongada.

Segundo a classificação de Köppen (1948), o Ceará tem dois tipos de clima: (1) o clima Aw' – Tropical chuvoso quente-úmido com chuvas de verão-outono que domina no litoral, na faixa setentrional, no leste e no sudeste; e (2) o clima Bsh – semi-árido quente, no sudoeste. Por localizar-se na faixa costeira, a área em estudo fica sob influência do tipo climático Aw'.

O regime pluviométrico na área do trabalho caracteriza-se por uma estação chuvosa e outra seca. No primeiro semestre do ano, precipitam-se cerca de 90% do total anual com maiores intensidades no trimestre março-abril-maio. A estação seca inicia-se em julho, indo até dezembro. A distribuição mensal das chuvas se dá de maneira uniforme com uma média de 9 dias de chuva em cada mês, todas de curta duração e distribuição espacial muito irregular (OLIVEIRA NERI, 1993).

As taxas de evapotranspiração no estado do Ceará são elevadas ao longo do ano; em geral, superiores a 130 mm mensais, atingindo valores anuais de 1.600 mm. Isso configura, um balanço hídrico negativo que somente de março a maio se torna positivo. Portanto, excedentes hídricos só são constatados neste trimestre quando a estação chuvosa atinge seu ápice.

Os dados da tabela 2.1 se referem a 2004 e foram obtidos na estação meteorológica do município de Fortaleza, que é a estação mais próxima da área de trabalho. A tabela mostra que a pressão atmosférica apresentou pequenas variações, tendo um valor máximo de 1010,6 kPa em julho e um mínimo de 1007,4 kPa em janeiro e uma média anual de 1008,7 kPa.

As variações de temperatura são pequenas; a temperatura média anual é a média aritmética das temperaturas médias mensais com medidas feitas diariamente. As temperaturas médias mensais apresentaram valor máximo de 27,3°C, em janeiro e dezembro, valor mínimo de 25,7°C, em julho, e média anual de 26,6°C. As temperaturas máximas mensais variaram de 30,7°C, em novembro, a um mínimo de 29,1°C, em maio e agosto, com uma média durante o ano de 29,9°C. As temperaturas mínimas mensais variavam de 24,7°C, em janeiro, a um mínimo de 21,8°C, em julho, com média anual de 23,5°C. Essas médias das temperaturas foram medidas com termômetros de máxima e mínima.

A precipitação total mensal teve um valor máximo de 348,1mm, em abril, e um mínimo de 13,4mm, em novembro, com um total anual de 1642,3mm; As chuvas ocorrem na área mais intensamente nos meses de fevereiro a abril. A evaporação total mensal variou de valor máximo de 173,5mm, em outubro, a um mínimo de 68,1mm, em abril, com um total anual de 1469,2mm.

A umidade relativa mensal variou do valor máximo de 85,0%, em abril, a um mínimo de 73,0%, em outubro, com uma média anual de 78,3%. A insolação mensal teve máxima de 296,1h, em outubro, e mínima de 148,9h, em março, com um total durante o ano de 2694,3h, e a nebulosidade variou de um máximo de 7,0, em março, abril e maio, a um mínimo de 4,0, em agosto, setembro e outubro, com uma média anual 5,3.

Estes parâmetros climáticos mostram a estabilidade do clima local que apresenta relativamente pequenas variações em todos os parâmetros.

TABELA 2.1 Parâmetros climáticos medidos na estação meteorológica do IMET localizada no Castelo, em Fortaleza, durante o ano de 2004.
(FONTE: FUNCEME)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA (TOTAL)
Pressão Atmosférica (hPa)	1007,4	1007,5	1007,6	1007,8	1008,5	1009,9	1010,6	1010,0	1009,9	1008,7	1008,2	1007,8	1008,7
Temperatura Média (°C)	27,3	26,7	26,3	26,5	26,3	26,9	25,7	26,1	26,6	27,0	27,2	27,3	26,6
Temperatura Máxima (°C)	30,5	30,1	29,7	29,7	29,1	29,6	29,5	29,1	29,2	30,5	30,7	30,7	29,9
Temperatura Mínima (°C)	24,7	23,2	23,8	23,4	23,4	22,1	21,8	22,6	23,4	24,5	24,4	24,6	23,5
Precipitação Total (mm)	129,6	215,6	338,6	348,1	226,1	160,1	91,4	31,2	22,8	15,6	13,4	49,8	(1642,3)
Evaporação Total (mm)	120,1	95,5	72,4	68,1	84,6	94,7	118,3	151,8	167,8	173,5	168,1	154,3	(1469,2)
Umidade Relativa (%)	78,0	79,0	84,0	85,0	82,0	80,0	80,0	75,0	74,0	73,0	74,0	76,0	78,3
Insolação Total (horas e décimos)	216,2	175,8	148,9	152,8	209,1	239,6	263,4	168,9	282,9	296,1	283,2	257,4	(2694,3)
Nebulosidade (0-10)	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	6,0	5,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,3

2.3 Geologia

2.3.1 Morfologia

O contexto geológico da área estudada é caracterizado pela ocorrência de coberturas sedimentares cenozóicas sobrepostas a terrenos cristalinos pré-cambrianos denominados Complexo Gnáissico-Migmatítico. As coberturas sedimentares são representadas pela Formação Barreiras, coberturas coluviais-eluviais, depósitos eólicos que são as paleodunas e as dunas móveis, depósitos flúvios-aluvionares e depósitos flúvio-marinhos, os mangues. (HOLANDA et al. 2003)

O Complexo Gnáissico-Migmatítico forma o embasamento cristalino, corresponde, no contexto da geologia pré-cambriana da região norte do Ceará, a um conjunto de rochas estudado por vários autores com as seguintes denominações: “Complexo Fundamental” de Crandall (1910); “Complexo Cristalino” de Brasil Sobrinho (1941); e “Pré-Cambriano Indiviso” de Silva & Silva (1970).

Braga et al. (1977), baseando-se em critérios estritamente litoestratigráficos, adotam o termo “Complexo de Caicó” para designar uma seqüência constituída de gnaisses variados, incluindo lentes de metarcósios, anfibolitos, quartzitos e calcários cristalinos subordinados, além de migmatitos com estruturas diversas, desde as mais foliadas, próprias dos gnaisses, até as mais homogêneas, como a dos anatexitos. Definem, também, como “Grupo Ceará”, uma seqüência parametamórficas constituída de um quartzito basal, seguido de gnaisses, xistos e filitos com níveis de rochas carbonáticas, preferencialmente situadas no topo da seqüência.

Nascimento et al. (1981), na tentativa de uniformizar e homogeneizar a nomenclatura de conjunto de rochas de idade pré-cambriana inferior a média que ocorrem na Folha S.A.24, propõem a designação formal de “Complexo Nordeste”, para caracterizar uma associação de rochas parcialmente ou totalmente migmatizadas que apresentam litotipos e estilo estrutural especial e complicado guardando, entretanto, características físicas próprias.

2.3.2 Hidrogeologia

No município de Caucaia pode-se distinguir três domínios hidrogeológicos distintos: rochas cristalinas, coberturas sedimentares e depósitos aluvionares.

As rochas cristalinas predominam na área e representam o que é denominado comumente de “aquífero fraturado”. Como basicamente não existe uma porosidade primária nesse tipo de rocha, a ocorrência da água subterrânea é condicionada a uma porosidade secundária representada por fraturas, o que se traduz por reservatórios aleatórios, considerados pela maioria dos geólogos como descontínuos e de pequena extensão. Dentro deste contexto, em geral, as vazões produzidas por poços são pequenas e a água, em função da falta de circulação e dos efeitos do clima semi-árido é, na maior parte das vezes, salinizada. Essas condições atribuem um potencial hidrogeológico baixo para as rochas cristalinas sem, no entanto, diminuir sua importância como alternativa de abastecimento em casos de pequenas comunidades ou como reserva estratégica em períodos prolongados de estiagem.

O domínio representado pelos sedimentos da Formação Barreiras caracteriza-se por uma expressiva variação faciológica, com intercalações de níveis mais e menos permeáveis, o que lhe confere parâmetros hidrogeológicos variáveis de acordo com o contexto local. Essas variações induzem a potencialidades diferenciadas quanto à produtividade de água subterrânea. Essa situação confere localmente ao domínio da Formação Barreiras características de um aquitarde, ou seja, uma formação geológica que possui baixa permeabilidade e transmite água lentamente, não tendo muita expressividade como aquífero. Apesar disso, em determinadas áreas, sua exploração é bastante desenvolvida. Ainda no contexto do domínio hidrogeológico sedimentar, as dunas destacam-se como unidade geológica de alta potencialidade aquífera, produzindo vazões da ordem de 5 a 10 m³/h.

Os depósitos aluvionares são representados por sedimentos areno-argilosos recentes, que ocorrem margeando as calhas dos principais rios e riachos que drenam a região e apresentam, em geral, uma boa alternativa como manancial, tendo importância relativa alta do ponto de vista hidrogeológico, principalmente em regiões semi-áridas com predomínio de rochas cristalinas. Normalmente, a alta permeabilidade dos termos arenosos compensa as pequenas espessuras, produzindo vazões significativas.

2.3.3 Hidrologia do cristalino

Para obter êxito na exploração de poços perfurados em aquíferos fissurados é necessário levar em conta problemas diretamente ligados à estrutura do poço como, por exemplo, a existência de fraturas na rocha, o grau de abertura das fraturas, a frequência do fraturamento no maciço rochoso, a interconexão entre elas e a conexão do sistema de fraturas com zonas de recarga na superfície como, por exemplo, rios, lagoas, etc.

Com relação às condições acima mencionadas, segundo Legrand (1959) e Campbell (1977), os poços perfurados em rochas no cristalino podem encontrar uma das varias situações descritas a seguir. A figura 2.2 mostra um perfil esquemático de um poço no cristalino com um manto de intemperismo de 15m com revestimento do poço.

1. Quando o poço perfurado não penetra fraturas abaixo do revestimento o poço é seco.
2. Quando o poço perfurado penetra uma zona fraturada que está situada a poucos metros abaixo do revestimento, a parte do poço abaixo desta zona fraturada não contribui com água e atua somente como reservatório. Esse tipo de poço tem uma vazão que varia de 2 a 4 m³/h, valor que diminui subitamente para uma fração do seu valor inicial, dependendo da permeabilidade do manto de cobertura.
3. O poço perfurado penetra somente uma fratura bastante extensa e a uma profundidade de aproximadamente de 65m. A vazão deste poço dependerá da permeabilidade do manto de cobertura e da capacidade do material de preenchimento transmitir água. Temos dois casos possíveis de acontecer.
 - a) Se a água é transmitida do manto de cobertura para a fatura na mesma velocidade quanto é transmitida através da fratura para o poço, a vazão aumentará com aumento do rebaixamento, até o nível da água alcançar a fratura contribuinte. Porem, abaixo do nível da fratura não haverá aumento da vazão.
 - b) Se a água é transmitida do manto para fratura com velocidade menor do que é transmitida através da fratura para o poço, o nível dinâmico ideal será numa posição intermediária entre a fratura e o manto de cobertura.

4. O poço perfurado penetra somente uma fratura, bastante extensa e a uma profundidade de aproximadamente de 65m semelhante ao caso 3, porem devido a uma elevada quantidade de água na fratura, apresenta uma pseudo-estabilização do rebaixamento durante o bombeamento, à medida que a água está sendo esgotada e a recarga da fratura se faz com dificuldade, recaindo para o caso 3b.
 5. O poço perfurado penetra varias pequenas fraturas e uma grande fratura a uma profundidade de aproximadamente de 50m; a vazão aumenta com o aumento do rebaixamento até atingir o nível da grande fratura.
 6. O poço perfurado penetra varias fraturas pequenas e médias, próximas umas das outras, na parte superior da rocha fraturada. Para uma vazão estabilizada, a bomba pode ficar entre 10 a 20m abaixo do topo da rocha inalterada.
 7. O poço perfurado penetra duas ou três fraturas de boa abertura e alimentadas por fraturas pequenas que se comunicam com o manto de cobertura. Nesse caso, o poço durante o bombeamento, apresenta o fenômeno que ocorreu no caso 4, porém com consecutivas quedas de rebaixamento, à medida que cada fratura, com boa abertura, vai se esgotando com o bombeamento.
 8. O poço perfurado penetra várias fraturas de boa abertura, ligadas ao manto de cobertura, porém preenchidas por material detrítico. A característica mais importante deste tipo de poço é o contínuo desenvolvimento, à medida que se faz o bombeamento, devido à desobstrução gradativa das fraturas.
 9. O poço perfurado penetra várias fraturas, mas é influenciado por uma falha nas proximidades, que quebra abruptamente a continuidade das fraturas que alimentam o poço, apresentando um comportamento semelhante com que ocorreu em 7.
- FIGURA 12
- III. O poço perfurado penetra várias fraturas sendo também influenciado por uma fonte externa de recarga superficial. O nível dinâmico é estabilizado com rapidez e, devido interconexão do sistema de fraturas, o nível de bombeamento pode descer até a fratura principal, que recebe contribuição da água superficial.

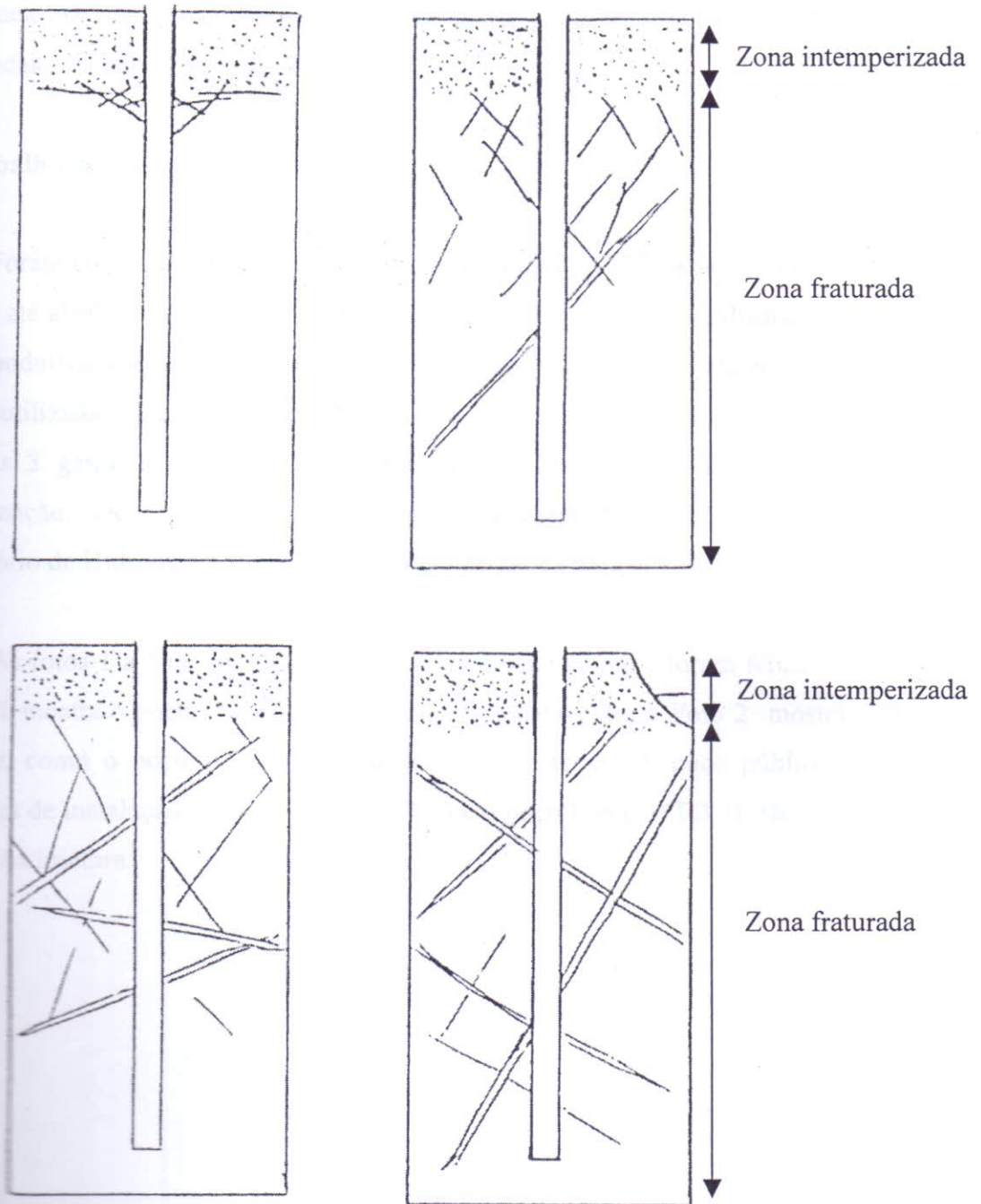


FIGURA 2.2 – Perfil esquemático de poços no cristalino

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas coletas de água subterrânea explotada por poços profundos e análises hidroquímicas. As metodologias empregadas estão descritas a seguir.

3.1 Trabalho de Campo

Foram coletadas mensalmente águas de 16 poços profundos no período de março de 2003 até abril de 2004, identificados pela latitude e a longitude utilizando o GPS. O pH e condutividade elétrica foram medidas no local de coleta. Pela metodologia de análise utilizada necessita-se de 1500mL de água de cada poço; por isso, foram coletadas 3 garrafas de 500mL as quais estavam devidamente lavadas para evitar contaminação. Depois de coletada a água, as garrafas foram encaminhadas ao Laboratório de Hidroquímica do Departamento de Física para análise.

As fotos 1 a 5 mostram as condições dos poços de onde foram feitas as coletas. A Foto 1 mostra o poço P01 bombeado através de catavento; a Foto 2 mostra o poço P02 que, como o poço P01, está localizado em Coité, é um poço público em más condições de instalação. O poço P03 (FOTO3) e o poço P06 (FOTO 4) são bombeados por bomba injetora.



FOTO 1 Poço P1 localizado em Coité, nas Pedreiras.

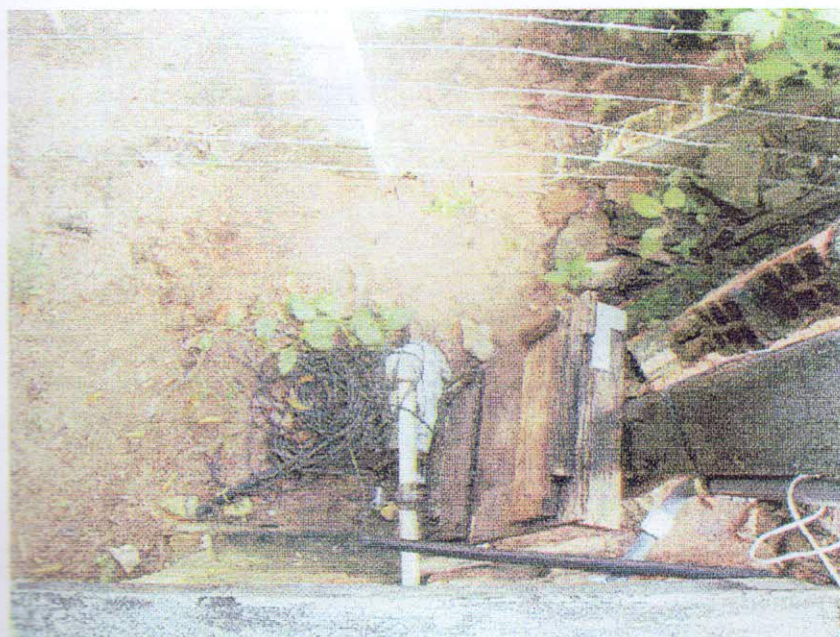


FOTO 2 Poço P02 localizado em Coité, nas Pedreiras.



FOTO 3 Poço P03 localizado em Boqueirãozinho.



FOTO 4 Poço P06 localizado no Sítio São Pedro.

FOTO 5 Lagoa próxima ao poço P04



FOTO 5 Poço P07 localizado em Matões.



FOTO 6 Lagoa próxima ao poço P08.



FOTO 7 Poço P08 localizado em Itararé.

3.2 Trabalho de Laboratório

No Laboratório de Hidroquímica da UFC foram determinadas as concentrações dos íons maiores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NH_3 , NO_2^- e NO_3^- utilizando os seguintes métodos:

- | | |
|--------------------|---|
| Ca^{2+} | - Titulometria por Complexometria com EDTA |
| Mg^{2+} | - Análise Titulometria por Complexometria com EDTA |
| Na^+ | - Espectroscopia de emissão de chama, CORNING-400. |
| K^+ | - Espectroscopia de emissão de chama, CORNING-400. |
| Cl^- | - Método de Mohr, usando nitrato de prata (AgNO_3) como solução titulante. |
| SO_4^{2-} | - Turbidimetria |
| HCO_3^- | - Titulometria com HCl |

NO_3^-	- Espectrofotometria
NH_3	- Espectrofotometria
NO_2^-	- Espectrofotometria

3.3 Tratamento de dados

3.3.1 Diagrama de Piper

Este é o diagrama mais utilizado para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes, classificando as amostras segundo este critério. A representação gráfica evidencia relações entre íons de uma mesma amostra, e pode ressaltar variações temporais ou espaciais existentes. Ele permite comparar um grande número de amostras representadas no mesmo gráfico.

4 OS ÍONS MAIS ABUNDANTES NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O intemperismo é, basicamente, a desintegração e a decomposição de rochas. Ele pode atuar por ação de processos físicos, químicos e/ou biológicos.

Os processos físicos envolvem transformações que conduzem à desagregação da rocha, sem que haja uma alteração química dos minerais constituintes. As desintegrações podem ocorrer devido a dois fatores: (i) diminuição da intensidade da pressão durante a erosão, o que expande as rochas; (ii) dilatação térmica em locais onde são grandes as variações de temperatura desenvolvendo pressões internas que desagregam os minerais e desenvolvem microfraturas, por onde penetrarão a água, sais e raízes vegetais.

Os processos químicos são transformações químicas dos minerais que compõem a rocha. A decomposição pode ocorrer devido a quatro fatores:

(i) Hidrólise e hidratação são dois processos intimamente relacionados. Pela hidratação a água é incorporada ao mineral, fazendo parte da estrutura cristalina, e pela hidrólise dá-se a sua decomposição pela água.

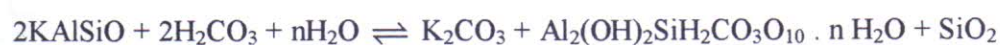
(ii) A dissolução é um processo através do qual os ácidos agem diretamente na dissolução de certos minerais. Os carbonatos são dos minerais mais facilmente solubilizados.

(iii) A oxidação é um dos primeiros fenômenos que ocorrem na decomposição subterrânea; pode ser promovida tanto por agentes orgânicos como inorgânicos. É uma reação química através da qual o ferro encontrado nas rochas altera-se de bivalente para trivalente, provocando mudanças na estrutura cristalina dos minerais ricos em ferro. Com a oxidação, aparece normalmente uma mudança de cor para vermelho ou amarelo. A oxidação ocorre também em manganês e outros metais.

(iv) Fenômenos de redução verificam-se em certas jazidas metalíferas, graças à ação do gás sulfídrico, substância fortemente redutora. O ambiente de putrefação é favorável à formação de H_2S e também de hidrogênio. Outro agente de grande poder redutor que pode atuar é o sulfato de cálcio dos sedimentos formando água e CaS , que se transforma

posteriormente em hidróxido e depois em carbonato de cálcio. Tudo isso ocorre devido à remoção de íons de ferro e de alumínio em determinadas condições ambientais.

Há um tipo de hidrólise através do qual a água combina-se com o CO_2 da atmosfera dando origem ao ácido carbônico ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$); este ácido mais um mineral qualquer dá origem a outro mineral. Como exemplo, consideramos:



Ortoclásio ácido carbônico mineral argiloso

A atividade orgânica, principalmente a de bactérias presentes no solo, toma parte na decomposição das rochas. Os primeiros a atacar uma rocha exposta às intempéries são bactérias e fungos microscópicos, seguidos dos líquens, depois das algas e musgos, formando e preparando o solo para as plantas superiores. Todas elas segregam gás carbônico, nitratos, ácidos orgânicos etc., como produto do seu metabolismo. Estes são incorporados pelas soluções que atravessam o solo, atingindo a rocha abaixo, em vias de ataque químico, aumentando, assim, a intensidade sobre os minerais formadores das rochas.

Os tecidos mortos das plantas servem de alimentos a numerosos microrganismos. Na presença de oxigênio, o material vegetal pode decompor-se por completo em água e gás carbônico, principalmente; caso contrário, pode formar humo. Sua composição química é heterogênea, completa e variável, de natureza coloidal, atuando geralmente como ácido orgânico.

Os processos biológicos ajudam na atuação dos processos físicos e químicos que consistem na ação da cunha das raízes, da escavação de animais e dos ácidos vegetais.

Estes processos de intemperismo são responsáveis pela presença dos elementos maiores na água que são Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e HCO_3^- .

Um dos importantes processos que dão origem aos íons dissolvidos nas águas é o intemperismo dos alumino-silicatos (FAURE, 1992; FREEZE & CHERRY, 1979 e TARDY, 1971); os cátions mais abundantes nas águas podem ter origem neste processo. A série

convergente de Goldich (GOLDICH, 1938; BERNER, 1971), ordena os minerais pela sua resistência à ação do intemperismo.

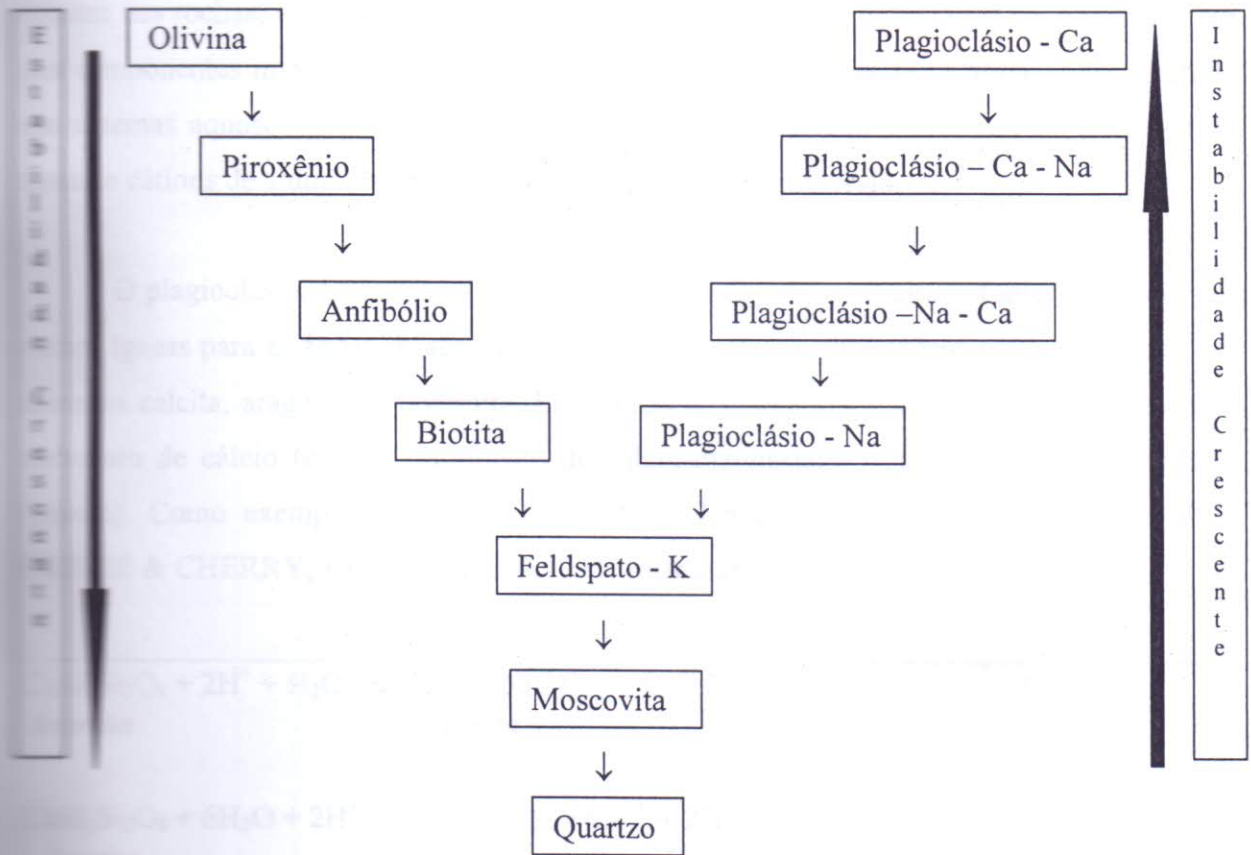


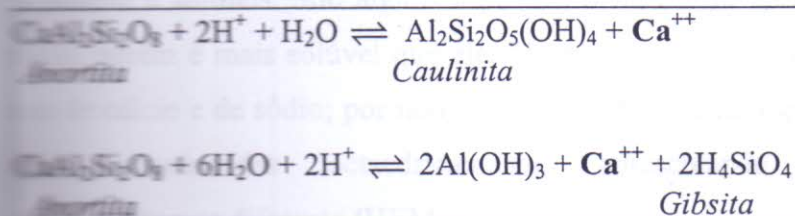
FIGURA 4.1 Série convergente de Goldich.

Olhando esta série observa-se que a moscovita e o quartzo são os minerais mais resistentes à ação do intemperismo; por isso, a ação do intemperismo no quartzo que é o mineral mais resistente, resultará apenas na diminuição do seu tamanho.

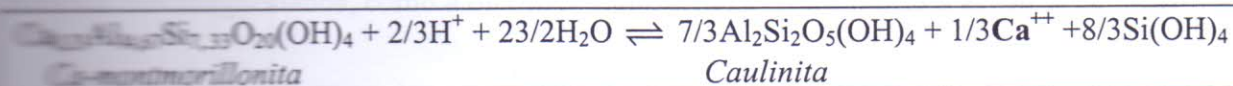
4.1 Cálcio

Cálcio é o elemento químico mais abundante nas rochas e águas do mundo; a solubilidade de seus sais varia de moderada à elevada e na natureza este cátion aparece sob a forma de bicarbonatos e, raramente, como carbonatos. Ele está presente nos minerais e é mais comum nas rochas; é essencial para todas as formas de vida animal e vegetal e é também um dos componentes mais abundantes nas águas naturais em regiões semi-áridas. É encontrado em sistemas aquosos naturais por ser um dos sólidos mais solúveis e também participa da troca de cátions de aluminossilicatos em outras superfícies minerais.

O plagioclásio, feldspato calcossódico, e a apatita são as maiores fontes de cálcio das rochas ígneas para as águas subterrâneas; nas rochas calcárias ele ocorre, principalmente, nos minerais calcita, aragonita e dolomita. Em rochas sedimentares o cálcio está presente como carbonato de cálcio (calcita), carbonato de cálcio-magnésiano (dolomita) e sulfato cálcico (gipsita). Como exemplo de intemperismo de feldspatos liberando Ca^{2+} (FAURE, 1992; FREEZE & CHERRY, 1979 e TARDY, 1971) formulamos:



Como exemplo de alumínio-silicatos liberando Ca^{2+} tem-se:



Rochas calcárias consistem, geralmente, da calcita com mistura de carbonato de magnésio e outras impurezas. Se em uma rocha carbonatada o magnésio e o cálcio estão presentes na razão de 1:1, ela é chamada de dolomita. Outros minerais de cálcio comuns em sedimentos são gipsita, fluorita e anortita.

Cátions Ca^{2+} são obtidos também através do intemperismo de outros minerais, como por exemplo:

<i>Calcita</i>	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+}$
<i>Dolomita</i>	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+}$
<i>Gipsita</i>	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+}$
<i>Fluorita</i>	$\text{CaF}_2 \rightleftharpoons 2\text{F}^- + \text{Ca}^{2+}$
<i>Anortita</i>	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{18} + 8\text{H}^+ \rightleftharpoons 2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$

O processo de troca de cátions nos aquíferos tem sido observado extensivamente desde 1925 por Renick (1925). O autor chamou a atenção para o abrandamento natural das águas salinas no solo através da troca de cátions. Em geral, as águas trocam cálcio por sódio mas o processo inverso também pode ocorrer.

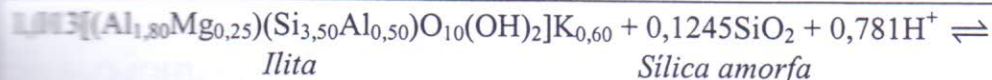
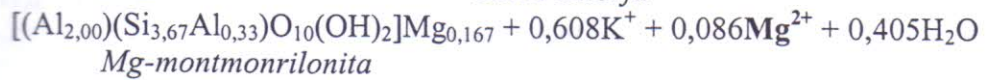
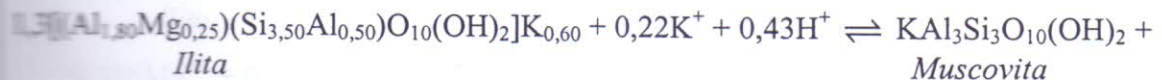
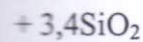
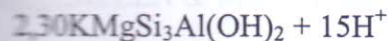
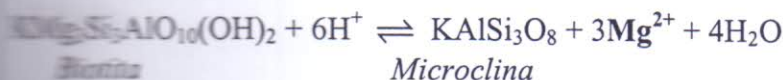
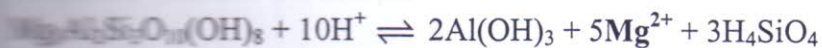
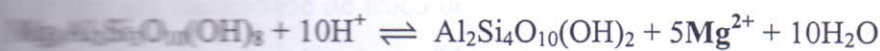
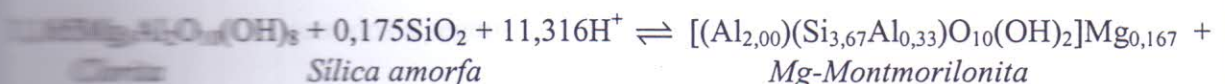
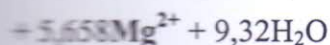
4.2 Magnésio

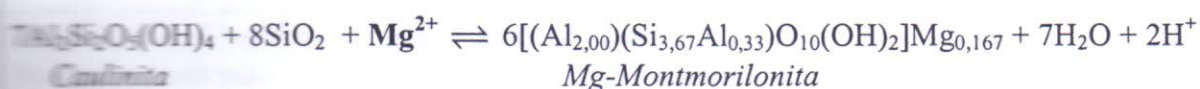
O magnésio tem grande importância na química das águas, pois é essencial à nutrição de plantas e animais. Sob alguns aspectos, o magnésio apresenta propriedades similares ao cálcio, porém é mais solúvel que ele. No entanto, os íons do magnésio são menores que os íons de cálcio e de sódio; por isso, eles acomodam-se no espaço central de seis moléculas de água, coordenadas octaetricamente, apresentando comportamento geoquímico substancialmente diferente (HEM, 1985).

Em águas subterrâneas, ele se origina de rochas ígneas primariamente derivadas de minerais ferromagnesianos, como a olivina, os piroxênios, os anfibólios e as micas escuras.

O magnésio e o cálcio aparecem em iguais proporções na dolomita, o que faz com que as concentrações de magnésio, que geralmente são pequenas nas águas subterrâneas, se elevem quando a água fica em contato com a dolomita.

Os minerais-fontes de magnésio mais freqüentes são: magnesita, biotita, granada, vermiculita, clorita, alanita e olivina; o magnésio ocorre, principalmente, em rochas metamórficas. Exemplos de processos de intemperismo com liberação de íons Mg^{2+} (FAURE, 1988; GREENE & CHERRY, 1979 e TARDY, 1971) são mostrados a seguir:

*Ilita**Silica amorfa**Mg-montmorilonita**Ilita**Muscovita**Silica amorfa**Ilita**Microclina**Silica amorfa**Ilita**Silica amorfa**Biotita**Biotita**Microclina**Biotita**Clorita**Silica amorfa**Clorita**Gibbsita**Clorita**Pirofilita**Clorita**Caulinita**Clorita**Silica amorfa**Mg-Montmorilonita*



Embora o íon de magnésio, Mg^{2+} , seja a forma predominante encontrada em solução na água natural, outras formas complexas podem ser encontradas, tais como: MgOH^+ e MgSi_2O_6 (SILLEN & MARTELL, 1964).

É um dos principais cátions presentes nas águas subterrâneas. Encontra-se em todas as águas, devido a sua distribuição ampla nos minerais-fontes, baixa estabilidade química dos minerais que o contém, elevada solubilidade e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução.

O sódio é retido por absorção na superfície dos minerais, especialmente por aqueles que têm alta capacidade de troca de cátions, como as argilas. Ele é facilmente encontrado no solo, onde existe abundância de feldspatos plagioclásio (variando desde o termo albita até a anortita), filossilicatos (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios, e em águas superficiais e subterrâneas em contato direto com este tipo de rocha. Exemplos de processos de intemperismo com liberação de íons Na^+ (FAURE, 1992; FREEZE & CHERRY, 1979 e THAYER, 1971) são mostrados a seguir:

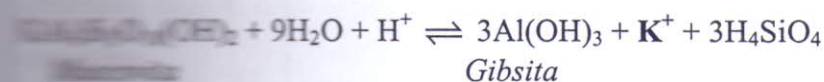
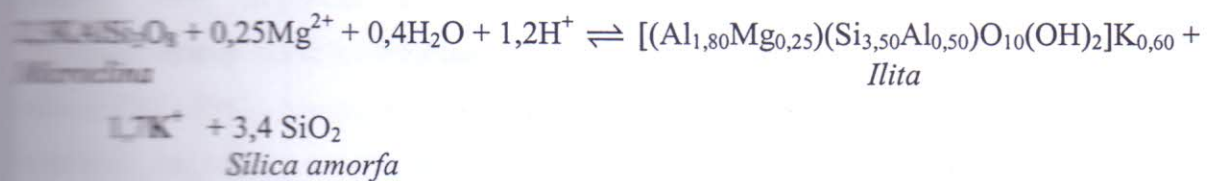
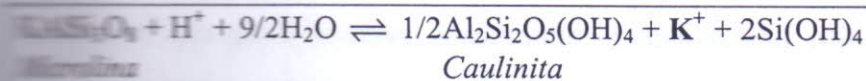
concentrações de potássio podem ser encontradas nos minerais de carnalita e silvinita, em evaporitos.

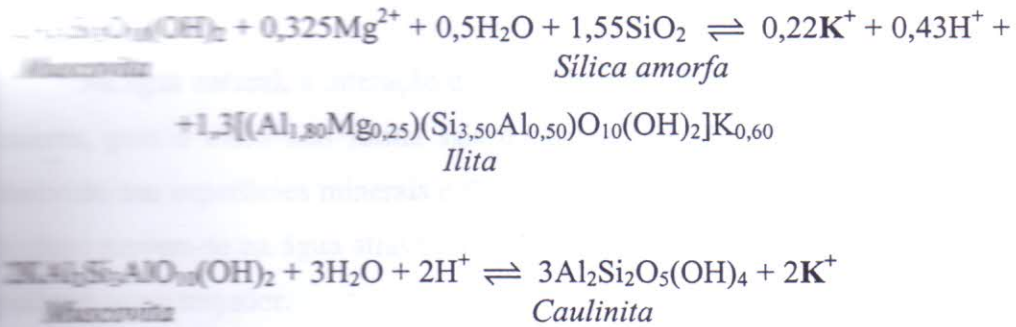
Os feldspatos potássicos são mais resistentes ao ataque pelas águas mas podem ser alterados para sílica, argilas e íons de potássio, pelos mesmos processos que outros feldspatos, no entanto, mais lentamente.

Íons de potássio assimilados por plantas tornam-se disponíveis quando as plantas morrem, perdem suas folhas ou outras partes. É o que ocorre na reciclagem natural nas florestas, sendo este potássio incorporado ao solo pelas chuvas (HEM, 1985).

A média de potássio contida em plantas vivas, segundo dados de Mason (1952), é próxima de 0,3%. Concentrações em plantas secas e em cinzas são substancialmente maiores; por isso, cinzas de madeira têm sido usadas pelo homem como fonte natural de potássio.

Exemplos de processos de intemperismo com liberação de íons de K^+ (FAURE, 1992; FREEZE & CHERRY, 1979 e TARDY, 1971) são mostrados a seguir.





4.5 Cloreto

Do grupo dos halogênios, o cloro é o elemento mais abundante. Mais de três quartos da quantidade total presente na crosta terrestre, atmosfera e hidrosfera estão em solução no oceano. O comportamento geoquímico do cloro é governado principalmente pelo fato de serem muito comuns componentes de cloro com elementos metálicos, metais alcalinos e alcalinos terrosos. Embora ocorra em vários graus de oxidação, a forma mais significativa é o íon Cl^- .

O cloro está presente em vários tipos de rochas, porém em concentrações muito menores do que qualquer outro constituinte na água natural. Minerais nos quais o cloro é um dos componentes principais não são muito comuns, sendo mais provável que ele esteja presente como impureza. Ele também pode estar presente em rochas compostas principalmente de minerais residuais não alterados quimicamente por intemperismo da rocha mãe (FEM, 1985), como resultado da inclusão de águas salgadas conadas cimentando materiais. Em todos os tipos de rochas, o cloro geralmente está presente como cloreto de sódio ou com uma solução de íons de cloro e sódio.

Johns & Huang (1967) investigaram os dados disponíveis do cloro contido em rochas, e concluíram que minerais contendo cloro são extremamente raros. Billings e Williams (1967) analisaram rochas a grandes profundidades e constataram que a média calculada de cloro contido nas rochas é de 1,466 ppm. Ele está também presente nas chuvas e neves devido a processos físicos, que fazem com que ele entre, na superfície do mar, como aerossol na atmosfera.

Na água natural, a interação química do cloro é fraca comparada com a de outros íons maiores, pois o cloro não forma sais de baixa solubilidade. Ele não é significativamente absorvido nas superfícies minerais e desempenha pequeno papel vital na bioquímica. Os íons de cloro movem-se na água através da maioria dos solos com menos atraso ou perdas de que qualquer outro traçador.

Águas das chuvas próximas ao oceano podem conter várias dezenas de miligramas de cloro por litro, mas a concentração diminui drasticamente à medida que ocorre a interiorização no continente. Massas de ar com cloretos de sódio podem mover-se para o interior do continente, eliminando sais por outros mecanismos que diferem dos da chuva; Eriksson (1960) mencionou a interceptação aérea do cloreto com a vegetação. A presença de alta concentração de cloro no interior dos continentes é justificada por Fisher (1968), em parte, por atividade humana.

Santiago (1984), analisando águas de chuva de quatro postos meteorológicos, um em Fortaleza, na costa, e os demais adentrando o continente até 90Km, encontrou uma relação entre a concentração de cloretos nas chuvas e a distância (x) à costa:

$$\text{Cl}^-(\text{mg/L}) = 5,29 \exp(-0,019x/\text{Km})$$

A permeabilidade das camadas de argila pode ser o fator predominante no comportamento e na composição da água salina do subsolo associado ao sedimento de granulação fina. O cloro sendo retido pelas camadas de argila pode acumular-se até alcançar altas concentrações, influenciando na concentração de cátions, onde cálcio é comumente o íon preferencialmente retido. Esse é um mecanismo sugerido para a origem do cloreto de cálcio em águas salinas.

4.6 Sulfato

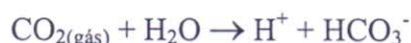
A concentração de sulfato nas chuvas continentais de regiões industrializadas, geralmente, excede 1mg/L, sendo consideravelmente maior do que a de cloro em algumas áreas. Este comportamento se deve ao efeito da poluição do ar, especialmente à contribuição da queima de combustíveis que é o responsável por 30% do sulfato contido nas chuvas (JUNGE, 1960).

Os sais de sulfato têm solubilidade variada; eles são desde sais moderadamente solúveis a sais muito solúveis, com exceção dos sulfatos de estrôncio e os de bário, que são insolúveis.

A oxidação do enxofre nas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares e a lixiviação de compostos sulfatados (gipsita, anidrita e sulfato sódico) se constituem importantes fontes para a produção de sulfato.

4.7 Bicarbonatos e carbonatos

O bicarbonato é o ânion mais abundante nas águas superficiais. A concentração do íon HCO_3^- na água do mar é da ordem de 100mg/L. Em águas subterrâneas, ele se origina da reação entre a água e o gás carbônico presentes no solo, proveniente da respiração das plantas e da decomposição de matéria orgânica. Dissolução do gás carbônico na água é formulada por:



Outra fonte importante de bicarbonato é o metamorfismo das rochas carbonatadas, como a calcita



Nas águas naturais a alcalinidade é atribuída às bases HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$ e OH^- , e também a silicatos, boratos, amônia, fosfato e bases orgânicas presentes em pequenas concentrações.

A alcalinidade e a acidez da água avaliam o potencial da solução para neutralizar ácidos e bases fortes e, com isso, averiguar os processos nas interações água-rocha ou água com materiais orgânicos.

Em águas naturais, este íon não sofre oxidação nem redução; no entanto, ele pode se precipitar facilmente formando bicarbonato de cálcio.

4.3 Concentração salina das águas subterrâneas

A geologia é um dos principais fatores responsáveis pela salinização das águas em áreas cristalinas. Processos que intervêm na concentração salina da água de recarga dos reservatórios é a dissolução, a troca iônica e entrada de aerossóis.

As condições ambientais como clima, temperatura e pluviosidade são responsáveis pela dissolução das rochas, causando uma variação na concentração salina nas águas subterrâneas.

A relação entre a qualidade da água e a litologia ambiente depende do tipo de aquífero, sendo, no embasamento cristalino, a dissolução ativada por quatro fatores: temperatura das águas mais elevada, aberturas das fraturas, velocidade de circulação lenta e tempo de contato longo.

A adsorção química é fundamental para o processo de troca iônica, onde um íon na rocha troca sua posição com um outro íon dissolvido na água, tornando, portanto, a modificação da razão entre os íons a principal característica do processo.

Nos minerais argilosos a adsorção de cátions pode ocorrer por ação das forças de Van der Waals (caulinita e clorita), por equilíbrio de cargas, como é o caso da montmorilonita, e por substituição do íon H^+ dos hidróxidos encontrados ao longo das fissuras de praticamente todos os minerais.

Os aerossóis são formados de poeiras continentais, exalações industriais e vulcânicas, poluição em geral e sais oceânicos (EISENREIZH, 1981), constituídos principalmente pelos íons Cl^- e Na^+ . São transportados pelos ventos a altas regiões atmosféricas. A composição química dos aerossóis varia rapidamente das áreas costeiras para o interior dos continentes, onde os elementos de origem marinha são substituídos por elementos de origem continental. A composição das chuvas depende de vários fatores, entre eles a interceptação pela vegetação, intensidade e direção dos ventos.

ANO	LOCAL	VEGETAÇÃO	VEGETAÇÃO
P01	...	...	...
P02	...	...	...
P03	Dois...	...	...
P04	Dois...	...	...
P05	São João	...	...
P06	Sítio...	...	...
P07	Mato...	...	...
P08	Itambé	...	...
P09	Sítio N...	...	...
P10	Mocó	...	...
P11	Lavras 1	...	...
P12	Lavras 2	...	...
P13	Flores 1	...	...
P14	...	...	...
P15	...	...	...
P16	...	...	...

3.3. Resultados e

As tabelas

contêm as

resultados

obtidos

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 5.1 apresenta dados referentes aos poços amostrados de março de 2003 até abril de 2004 no município de Caucaia. Nela apresentamos a localização, longitude e latitude e condições de uso dos poços amostrados que estão indicados na Figura 2.1.

TABELA 5.1 Localização, instalação e uso dos poços no município de Caucaia amostrados.

Poço	Localidade	Coordenadas (UTM)		Equip. de Bombeamento	Uso
P01	Coité – Pedreiras 1	9586145	527849	Catavento	Privado
P02	Coité – Pedreiras 2	9585814	528307	Bomba Injetora	Público
P03	Boqueirãozinho	9588489	525903	Bomba Injetora	Público
P04	Boqueirão	9587842	525158	Bomba Injetora	Público
P05	São Pedro	9592320	520630	Bomba Injetora	Público
P06	Sítio São Pedro	9593220	520920	Bomba Injetora	Privado
P07	Matões	9597512	520048	Catavento	Privado
P08	Itarará	9598891	518806	Catavento	Público
P09	Sítios Novos	9588179	506310	Bomba Injetora	Privado
P10	Mocó	9582044	507318	Catavento	Privado
P11	Lavras 1	9581926	507393	Bomba Injetora	Privado
P12	Lavras 2	9581420	507556	Bomba Injetora	Privado
P13	Flores 1	9594063	510044	Bomba Injetora	Privado
P14	Agrovila	9584901	506802	Bomba Injetora	Público
P15	Flores 2	9581026	507061	Bomba Injetora	Privado
P16	Flores 3	9580581	507642	Bomba Injetora	Privado

5.1 Resultados das análises hidroquímicas

As tabelas 5.2 a 5.13 apresentam as medidas da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e concentrações (mg/L) de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NH_3 , NO_2^- e NO_3^- . Elas mostram as variações destes parâmetros durante o período de 14 meses em cada um dos dezesseis poços amostrados e dados de uma coleta realizada em setembro de 2004.

TABELA 5.2 Hidroquímica das amostras coletadas em 02/04/2003 nos poços 01, 03, 04, 06, 07 e 08 e em 23/04/2003 nos poços 09, 10, 11, 12 e 13.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	7,4	2040	20,8	29,6	354,0	5,2	504,6	39,9	225,2	0,3	0,0	3,1	0,00	1,01	
03	7,5	2120	47,9	56,8	290,5	5,2	568,5	26,1	175,1	0,3	0,0	5,6	0,00	0,14	
04	7,9	838	78,2	14,6	82,3	5,2	84,5	116,4	187,6	0,1	0,0	7,5	0,00	0,08	
06	7,8	3340	42,3	50,0	598,9	38,1	858,5	49,1	250,2	0,3	0,1	55,3	0,00	1,63	
07	6,4	204	3,2	2,9	30,6	6,5	34,4	2,2	42,5	0,2	0,1	9,2	0,00	3,32	
08	7,6	684	71,1	24,3	32,2	5,2	86,5	3,7	272,7	0,2	0,1	6,1	0,00	0,13	
09	8,0	3030	168,4	141,4	270,0	10,4	839,0	32,7	370,3	0,8	0,1	47,8	0,00	0,36	
10	8,1	769	46,9	31,9	82,3	5,2	54,0	8,7	414,0	0,5	0,1	5,1	0,00	0,13	
11	7,5	2650	170,0	110,7	191,0	13,0	659,9	34,1	425,3	2,2	0,1	10,2	0,00	0,26	
12	6,9	2440	82,6	108,6	210,2	50,2	578,9	48,7	70,1	1,1	0,5	288,2	0,01	2,52	
13	6,3	106	7,2	2,9	9,9	3,9	6,9	1,9	37,5	1,5	0,1	7,7	0,07	2,90	

TABELA 5.3 Hidroquímica das amostras coletadas em 14/05/2003 nos poços 01,02, 03, 04, 05, 07 e 08 e em 28/05/2003 nos poços 06, 09, 10, 11, 12, 13 e 14.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)											
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺
01	7,8	2190	27,8	28,5	354,0	6,5	550,5	57,9	230,2	0,6	0,0	6,3	0,00	3,09
02	7,2	989	17,5	22,2	126,0	5,2	187,4	33,5	197,6	0,0	0,1	30,2	0,01	1,67
03	7,1	2010	46,1	54,3	229,8	7,8	533,8	24,2	180,1	0,4	0,0	5,4	0,00	0,10
04	7,7	855	83,4	13,5	76,8	5,2	89,3	70,4	200,1	0,4	0,0	6,8	0,00	0,17
05	6,6	3840	78,7	105,9	489,6	28,2	1175,1	25,9	120,1	0,5	0,0	18,5	0,00	0,04
06	7,6	3070	44,5	45,4	466,2	65,4	659,9	51,9	290,2	0,7	0,7	41,8	0,00	1,51
07	6,9	291	8,7	5,3	37,6	5,2	42,2	0,3	40,0	0,4	0,0	36,7	0,01	0,15
08	7,5	688	71,1	25,8	32,7	3,9	86,4	3,5	280,2	0,2	0,0	1,1	0,00	0,08
09	7,8	4370	199,4	187,7	431,7	13,0	1143,2	41,4	457,8	0,0	0,0	125,1	0,00	1,59
10	7,6	720	32,6	32,8	84,4	5,2	34,3	1,7	415,3	0,0	0,0	14,5	0,00	0,26
11	7,2	2570	167,6	106,9	185,2	14,3	628,0	40,8	437,8	0,0	0,1	10,1	0,00	0,06
12	6,4	2150	61,2	95,6	182,4	45,7	446,5	48,4	72,6	0,3	2,0	249,6	0,00	1,16
13	7,0	2740	162,5	123,3	259,7	14,3	851,2	9,0	332,7	0,4	0,5	3,5	0,00	0,51
14	8,2	862	62,0	45,4	61,8	2,6	97,1	6,0	402,8	0,0	0,0	3,9	0,00	0,01

TABELA 5.4 Hidroquímica das amostras coletadas em 17/06/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 03/07/2003 nos poços 09, 10, 11, 12, 13 e 14.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	7,9	2820	23,4	35,2	550,1	5,2	753,1	69,5	292,7	0,3	0,1	68,2	0,05	2,47	
02	7,3	1033	17,1	22,9	155,7	3,9	203,6	39,0	212,6	0,2	0,1	59,5	0,02	2,77	
03	7,2	2210	49,3	65,4	305,7	5,2	584,4	21,4	117,6	2,0	0,0	5,9	0,00	0,30	
04	7,8	853	81,0	14,0	83,7	3,9	89,3	94,9	216,7	0,4	0,0	8,4	0,00	0,08	
05	6,5	4150	73,9	104,7	573,3	28,2	1090,4	20,3	167,6	1,1	0,0	25,2	0,04	0,08	
06	7,3	2180	51,6	42,2	305,7	84,2	411,8	50,4	341,4	0,8	1,7	99,0	0,00	0,77	
07	5,2	232	0,0	6,3	33,3	3,9	36,3	2,8	17,5	0,5	0,1	72,7	0,02	1,19	
08	7,4	699	77,1	22,7	32,2	3,9	87,8	3,4	315,2	1,5	0,4	2,7	0,00	0,36	
09	7,6	5660	261,5	247,4	586,4	18,1	1486,5	32,6	503,9	0,6	0,1	235,5	0,02	2,14	
10	7,4	707	35,1	28,1	80,9	6,5	27,0	6,8	406,4	0,4	0,0	10,9	0,01	0,25	
11	7,1	2590	154,9	96,3	187,9	18,1	539,3	34,9	449,7	0,5	0,1	17,2	0,00	0,08	
12	6,5	2970	95,8	118,8	196,2	46,6	651,1	42,1	108,4	0,4	0,6	241,7	0,03	0,74	
13	7,0	5960	291,4	252,2	636,7	16,9	1733,6	10,8	501,2	1,4	0,6	19,5	0,00	0,17	
14	7,4	1068	77,4	46,1	63,0	5,2	118,7	6,7	447,0	0,5	0,2	11,4	0,01	0,01	

TABELA 5.5 Hidroquímica das amostras coletadas em 30/07/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 26/08/2003 nos poços 09, 10, 11, 12 e 14.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	6,8	2230	32,7	48,0	428,8	6,5	623,6	16,5	243,8	1,0	0,0	18,6	0,08	3,35	
02	6,8	1920	38,3	62,8	312,0	7,8	496,2	42,5	252,0	0,4	0,0	28,2	0,00	0,13	
03	6,8	2640	72,7	97,1	411,4	7,8	843,3	22,0	243,8	1,6	0,0	7,1	0,00	0,01	
04	7,6	823	81,0	17,7	80,9	5,2	98,7	86,8	211,3	1,4	0,0	10,1	0,00	0,13	
05	6,2	3970	90,2	131,9	636,7	30,7	1353,2	17,5	157,1	0,2	0,0	34,4	0,00	0,04	
06	7,2	2040	36,7	55,3	299,4	97,0	406,0	40,0	368,5	2,2	2,9	99,7	0,00	0,69	
07	5,1	208	0,0	5,3	27,0	5,2	19,6	0,5	16,3	1,2	0,0	65,7	0,02	0,33	
08	7,1	650	61,5	33,5	34,9	4,7	87,3	3,5	292,6	1,7	0,0	10,5	0,00	0,22	
09	7,5	7100	268,3	417,9	697,2	20,7	2078,8	27,0	501,2	1,0	0,1	206,9	0,00	0,33	
10	8,6	698	33,5	26,0	95,8	6,5	55,0	8,5	373,9	1,1	0,0	14,0	0,00	0,05	
11	7,0	2340	116,2	93,5	201,8	14,3	541,3	36,9	444,3	0,2	0,1	7,9	0,00	0,07	
12	6,5	2940	112,6	128,1	274,8	33,2	776,6	39,6	146,3	1,0	0,6	123,1	0,00	0,64	
14	7,7	1175	47,1	56,8	86,4	5,2	174,7	7,2	438,9	1,0	0,0	0,0	0,00	0,00	

TABELA 5.6 Hidroquímica das amostras coletadas em 17/09/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e em 30/09/2003 nos poços 09, 10, 11, 12, 13 e 14.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)													
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺		
01	6,5	2250	42,3	53,7	367,2	6,5	572,6	53,0	233,0	2,1	0,0	6,9	0,00	1,71		
02	7,0	2250	49,0	67,5	340,9	9,1	560,9	55,0	247,9	2,3	0,0	30,4	0,00	0,02		
03	6,9	3410	85,9	113,4	475,3	9,1	984,5	25,3	265,5	2,1	0,0	0,0	0,00	0,00		
04	7,5	926	97,2	15,0	98,7	5,2	97,5	134,1	216,7	2,3	0,5	1,4	0,00	0,00		
05	6,5	4430	101,9	145,3	668,8	32,0	1325,7	27,1	154,4	2,8	0,0	19,7	0,00	0,03		
06	6,9	2420	51,0	43,7	354,0	117,2	472,6	67,1	354,9	1,4	1,8	88,4	0,00	7,53		
07	4,9	167	0,0	7,1	23,0	3,9	16,2	0,3	10,8	2,8	0,0	57,8	0,03	0,59		
08	7,3	692	46,3	44,3	37,6	5,2	88,4	3,3	307,5	1,1	0,1	0,0	0,00	0,16		
09	7,3	6430	313,6	362,6	649,5	18,1	1941,5	38,0	516,1	1,8	0,0	177,8	0,00	0,03		
10	8,1	718	30,6	25,7	85,1	6,5	36,9	7,6	377,9	1,0	0,0	0,0	0,00	0,09		
11	6,7	2520	151,3	105,7	182,4	14,3	537,3	34,5	452,4	1,6	0,1	4,6	0,00	0,00		
12	6,2	3080	116,0	139,7	262,7	30,7	808,0	36,6	157,1	2,3	1,9	117,6	0,00	0,56		
13	6,6	5550	215,6	211,4	561,8	15,6	1415,9	10,8	428,1	1,4	0,4	15,9	0,00	0,01		
14	7,0	1497	101,1	65,7	90,9	3,9	247,5	7,8	452,4	1,1	0,0	0,0	0,00	0,00		

TABELA 5.7 Hidroquímica das amostras coletadas em 15/10/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 08 e em 28/10/2003 nos poços 09, 10, 11, 12, 13 e 14.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	6,7	2350	33,7	57,3	357,3	5,2	564,8	56,3	235,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,00	0,16
02	6,7	2440	49,9	71,1	324,7	9,1	598,1	65,2	238,3	2,8	0,0	27,0	0,00	0,00	0,02
03	6,7	3470	91,5	118,2	482,6	8,6	1039,4	26,0	279,3	0,9	0,0	0,0	0,00	0,00	0,04
04	7,4	932	91,1	19,3	92,2	3,9	98,1	145,2	212,7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,00	0,04
05	6,2	5700	123,2	158,5	809,0	33,2	1672,8	24,1	182,0	1,5	0,8	26,5	0,00	0,00	0,00
06	7,2	2540	51,5	45,3	312,0	116,0	460,9	74,5	387,0	0,0	8,3	90,0	0,00	0,00	0,75
08	7,0	703	69,7	30,1	38,7	5,2	84,3	3,5	289,6	0,0	0,1	0,0	0,00	0,00	0,21
09	7,4	7270	334,2	360,7	662,3	18,1	2098,4	40,6	548,4	0,5	0,0	151,6	0,00	0,00	0,02
10	8,8	597	20,6	23,6	90,0	5,2	34,4	8,2	301,1	1,2	0,0	0,9	0,00	0,00	0,18
11	6,8	2330	153,7	90,5	185,2	13,0	534,5	31,0	445,9	0,9	0,1	6,9	0,00	0,00	0,01
12	6,3	3060	118,0	130,0	283,9	27,0	796,2	33,4	144,8	0,5	0,7	115,5	0,00	0,00	0,46
13	6,6	4940	204,3	199,8	537,4	13,0	1417,9	11,6	444,6	1,3	0,4	15,9	0,00	0,00	0,08
14	7,3	1605	112,5	78,4	107,5	3,9	319,3	7,8	448,5	0,9	0,0	1,8	0,00	0,00	0,03

TABELA 5.8 Hidroquímica das amostras coletadas em 19/11/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 06, 07 e 08 e em 10/12/2003 nos poços 09, 11, 12, 13, 14 e 15.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	6,6	2180	42,0	50,8	351,9	6,5	562,8	40,2	235,8	1,6	0,0	1,8	0,00	0,14	
02	6,6	2280	46,7	64,2	337,6	9,1	578,5	37,9	246,0	1,4	0,0	28,9	0,00	0,03	
03	7,0	3670	96,6	125,9	493,7	9,1	1066,8	20,5	272,9	0,7	0,0	0,0	0,00	0,00	
04	7,5	912	91,9	15,9	87,9	5,2	96,1	162,4	214,0	1,1	0,0	2,3	0,00	0,05	
06	7,1	2450	50,3	45,2	337,6	116,0	494,2	34,1	356,2	1,5	3,8	130,2	0,00	0,72	
07	4,6	154	0,0	5,3	22,0	2,6	13,1	1,0	10,3	1,3	0,0	59,3	0,01	0,08	
08	7,1	693	74,5	25,0	34,9	5,2	86,3	4,0	290,9	1,8	0,0	2,3	0,00	0,04	
09	7,7	7290	319,9	353,4	741,1	20,7	2147,4	31,5	499,7	0,7	0,0	85,1	0,00	0,04	
11	7,0	2670	179,5	111,2	215,7	14,3	655,0	27,1	448,5	1,2	0,0	0,0	0,00	0,07	
12	6,4	3280	127,8	143,8	322,4	28,2	925,6	24,1	164,0	2,6	0,1	50,5	0,00	0,06	
13	6,8	5080	213,3	206,2	586,4	13,0	1494,4	10,9	463,9	1,2	0,4	6,0	0,00	0,04	
14	7,5	1934	132,5	92,9	129,9	4,5	429,5	7,7	443,4	1,0	0,0	0,0	0,00	0,00	
15	6,0	3310	64,3	127,6	293,8	28,2	1019,8	12,0	87,1	1,6	0,0	6,0	0,01	1,36	

TABELA 5.9 Hidroquímica das amostras coletadas em 22/12/2003 nos poços 01, 02, 03, 04, 06, 07 e 08 e em 13/01/2004 nos poços 09, 11, 12, 13, 14 e 15.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	6,7	2170	38,4	54,7	348,1	5,2	560,9	31,2	235,8	3,5	0,0	0,0	0,00	0,17	
02	6,9	2330	49,0	69,7	351,9	7,8	586,4	29,8	251,2	1,9	0,0	7,4	0,00	0,01	
03	6,9	3840	101,1	130,9	518,8	9,1	1117,8	14,7	287,0	3,0	0,0	0,0	0,00	0,00	
04	7,7	938	97,2	14,1	93,6	3,9	99,5	101,3	220,4	1,5	0,0	0,9	0,00	0,02	
06	7,0	2670	47,8	45,4	469,0	62,6	600,1	35,5	310,1	1,9	2,8	49,5	0,00	0,24	
07	4,7	150	0,0	5,2	23,0	2,6	22,2	1,0	12,8	1,2	0,0	16,8	0,01	0,09	
08	7,2	692	72,9	25,2	35,4	3,9	86,9	1,0	297,3	1,9	0,0	0,0	0,00	0,23	
09	7,7	7500	326,1	400,8	662,3	20,7	2233,7	101,3	463,9	3,1	0,0	100,1	0,00	0,01	
11	7,1	2570	174,8	105,7	198,9	14,3	615,8	25,5	448,5	3,7	0,3	6,5	0,00	0,98	
12	6,4	3650	145,0	167,9	322,4	29,5	1023,7	23,7	143,5	4,2	0,3	59,3	0,00	0,20	
13	6,9	5160	227,4	197,7	574,1	13,0	1494,4	9,5	475,4	3,6	0,4	6,0	0,00	0,05	
14	7,4	2240	153,7	110,3	139,0	5,2	533,4	8,2	444,6	3,4	0,0	0,0	0,00	0,01	
15	6,0	2970	65,1	127,2	265,9	28,2	994,3	13,1	89,7	4,3	0,0	5,1	0,01	0,55	
16	6,5	3330	196,0	128,6	265,9	28,2	1004,1	13,4	126,9	3,8	0,1	10,7	0,01	1,31	

TABELA 5.10 Hidroquímica das amostras coletadas em 03/02/2004 nos poços 01, 03, 04, 06, 07 e 08 e em 18/02/2004 nos poços 09, 11, 12, 13, 14, e 16.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	7,4	2090	32,1	42,4	355,6	5,2	546,6	23,0	228,1	2,7	0,0	0,0	0,01	0,18	
03	6,8	3610	94,5	124,2	489,5	7,8	1059,0	16,7	252,4	1,9	0,0	0,0	0,00	0,02	
04	7,6	897	89,0	15,5	87,9	3,9	97,0	94,3	220,4	1,0	0,0	0,0	0,00	0,05	
06	7,1	2710	46,7	49,7	420,8	62,6	611,9	31,6	319,1	3,4	3,9	55,7	0,00	0,74	
07	4,9	149	0,0	4,8	24,0	2,6	20,2	0,7	17,9	1,4	0,0	15,9	0,02	0,23	
08	7,2	689	73,7	24,8	33,3	4,5	87,9	2,0	294,7	2,0	0,1	0,0	0,00	0,07	
09	7,4	3980	163,2	205,2	357,3	11,7	1110,0	17,9	319,1	2,9	0,1	9,7	0,00	1,47	
11	7,0	2480	165,5	108,7	220,0	14,3	588,3	25,5	452,3	2,6	0,2	0,9	0,00	0,28	
12	6,2	2220	66,5	109,9	235,6	38,1	572,6	36,3	85,9	2,1	1,4	91,1	0,02	0,57	
13	5,7	190	7,1	5,3	25,0	7,8	70,6	12,6	43,6	2,5	0,1	11,1	0,05	0,69	
14	7,2	1006	83,2	48,1	62,4	2,6	139,9	6,6	394,7	2,1	0,0	0,0	0,00	0,02	
16	6,4	2880	139,4	100,6	293,2	23,2	847,2	10,1	115,3	2,2	0,1	14,4	0,11	0,11	

TABELA 5.11 Hidroquímica das amostras coletadas em 03/03/2004 nos poços 03, 04, 06, 07 e 08 e em 17/03/2004 nos poços 09, 11, 13, 14, e 16.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
03	7,0	2870	72,9	91,1	390,8	7,8	815,8	14,0	220,4	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	
04	7,6	886	92,7	13,5	87,9	5,2	92,9	97,3	207,6	0,1	0,0	0,0	0,00	0,03	
06	7,1	2540	46,7	46,8	405,2	62,6	560,9	30,8	301,1	0,2	3,5	42,9	0,00	0,40	
07	6,5	173	8,7	3,4	23,0	2,6	16,8	0,7	34,6	0,9	0,0	11,1	0,02	0,01	
08	7,2	689	62,6	31,8	33,3	3,9	87,0	0,6	281,9	0,3	0,1	0,0	0,00	0,13	
09	7,2	399	29,3	15,9	40,9	6,5	39,0	39,4	155,0	0,9	0,1	17,3	0,22	9,53	
11	7,1	2480	167,9	101,3	200,6	13,0	584,4	25,2	430,5	0,7	0,1	0,9	0,00	0,02	
13	6,3	537	19,8	13,2	75,5	6,5	109,2	8,5	108,9	1,0	0,1	5,1	0,02	0,48	
14	7,3	1161	86,3	54,4	82,3	2,6	186,3	5,5	399,8	0,1	0,3	0,0	0,00	0,00	
16	6,3	2630	107,7	81,9	299,4	20,7	760,9	8,8	107,6	0,7	0,0	13,5	0,14	0,12	

TABELA 5.12 Hidroquímica das amostras coletadas em 30/03/2004 nos poços 01, 02*, 03, 04, 06, 07 e 08 e em 13/04/2004 nos poços 02**, 09, 11, 13, 14, 15 e 16.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
01	7,5	1900	21,0	29,1	347,4	5,2	506,0	10,6	244,9	0,0	0,0	0,0	0,01	0,08	
02*	7,0	1472	26,1	33,7	233,1	5,2	317,7	19,9	233,7	0,0	0,1	21,6	0,00	0,68	
02**	7,0	1215	22,2	29,1	194,9	3,9	251,0	24,2	228,2	0,9	0,0	8,3	0,03	2,30	
03	7,0	2450	59,4	75,8	347,4	6,5	682,5	15,4	214,2	0,0	0,0	0,0	0,01	0,00	
04	7,6	870	90,3	12,3	89,3	3,9	90,2	127,6	212,9	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	
06	7,1	1470	30,1	24,5	227,3	61,2	313,8	30,3	214,2	0,0	0,2	45,9	0,01	0,59	
07	6,2	146	4,8	3,9	23,0	2,6	15,8	0,8	26,4	0,1	0,0	18,7	0,02	0,04	
08	7,2	686	74,5	23,6	36,5	3,9	87,2	1,1	303,3	0,0	0,1	0,0	0,00	0,10	
09	7,7	6410	176,6	155,5	464,9	14,3	998,2	21,3	498,1	1,0	0,1	26,0	0,00	0,28	
11	7,1	2250	148,9	90,6	195,9	13,0	502,0	16,0	473,0	0,3	0,2	0,0	0,00	0,22	
13	6,8	2200	78,4	72,7	244,6	10,4	513,8	3,3	294,3	0,3	0,3	0,5	0,00	0,04	
14	7,4	1407	100,6	39,2	99,5	2,6	254,9	4,0	459,1	0,4	0,1	0,0	0,00	0,00	
15	6,0	2410	51,5	116,7	249,6	24,5	811,9	6,3	97,4	1,5	0,0	0,0	0,01	0,55	
16	6,3	2720	123,6	89,1	296,5	21,9	802,1	8,2	114,1	0,4	0,1	13,5	0,02	2,03	

(*) representa a amostra do P02 em 30/03/2004

(**) representa a amostra do P02 em 13/04/2004

TABELA 5.13 Hidroquímica das amostras coletadas em 17/08/2004 nos poços 02*, 03, 07 e 08 e em 14/09/2004 nos poços 02**, 09, 13, 14, 15 e 16.

Poço	pH	CE	Concentrações (mg/L)												
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₃	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Al ³⁺	Fe ³⁺	
02*	7,2	1469	26,9	39,0	238,6	5,2	337,3	30,4	229,6	3,4	0,1	23,6	0,02	1,21	
02**	7,2	2270	152,9	77,7	164,3	13,0	507,9	12,0	382,6	1,1	0,1	5,1	0,00	0,00	
03	7,1	3320	82,4	111,7	460,8	9,1	949,2	15,3	272,7	9,3	0,0	0,0	0,00	0,00	
07	6,2	164	6,3	3,9	21,0	3,9	18,7	0,3	27,8	0,2	0,0	26,0	0,02	0,55	
08	7,2	693	72,9	25,7	34,3	5,2	94,1	0,1	297,7	0,0	0,0	0,0	0,00	0,03	
09	7,6	6220	278,8	350,7	555,6	18,1	1725,8	21,9	446,6	0,2	0,0	138,7	0,00	0,01	
13	7,0	5010	209,9	246,7	513,4	14,3	1451,2	8,2	436,8	0,9	0,1	8,3	0,00	0,00	
14	7,6	2290	154,4	97,5	115,4	5,2	545,2	4,2	392,3	1,4	0,0	0,0	0,00	0,00	
15	6,3	3250	79,2	153,1	302,2	32,0	1208,0	2,3	69,6	0,2	0,0	10,2	0,01	0,21	
16	6,4	2680	126,7	94,3	236,5	20,7	776,6	7,4	107,1	0,1	0,1	24,0	0,02	1,89	

(*) representa a amostra do P02 em 17/08/2004

(**) representa a amostra do P02 em 14/09/2004

5.2 A salinidade das águas

As condutividades elétricas apresentadas na tabela 5.1 estão numa larga faixa de valores, de 106 a 3340 ($\mu\text{S}/\text{cm}$); variações ainda maiores podem ser observadas em valores das outras coletas. Na figura 5.1 está apresentado um histograma dos valores de condutividade elétrica de todos os poços amostrados.

A maioria dos 153 valores de condutividade elétrica está abaixo de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em todas as coletas; 30,7% abaixo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 45,1% entre 1000 e 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 24,2% tiveram valores acima, atingindo 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

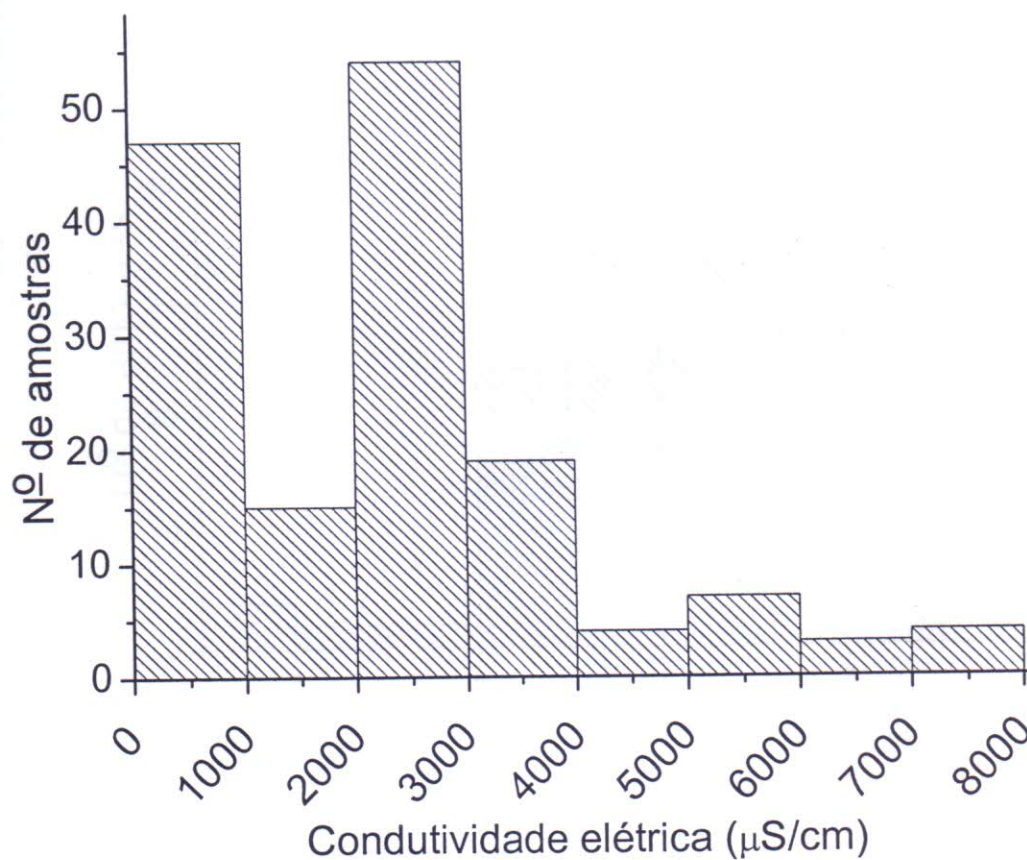


FIGURA 5.1 Histograma de valores de condutividade elétrica.

Somente os poços P03, P05, P06, P12, P13, P15 e P16 tiveram, em alguma coleta, valores acima de $3000\mu\text{S}/\text{cm}$. Alguns poços apresentaram pequena variação da condutividade com o tempo; apresentaram grandes variações somente os poços P09 e P13. Estes resultados podem ser observados no histograma da figura 5.1 e na tabela 5.14.

O histograma com valores de pH, apresentado na figura 5.2, mostra que a maioria dos valores de pH está entre 7,0 e 7,5 e dos 153 valores 94% estão entre 6,0 e 8,0. Estão fora destes valores algumas amostras dos poços P07, P09, P10 e P14.

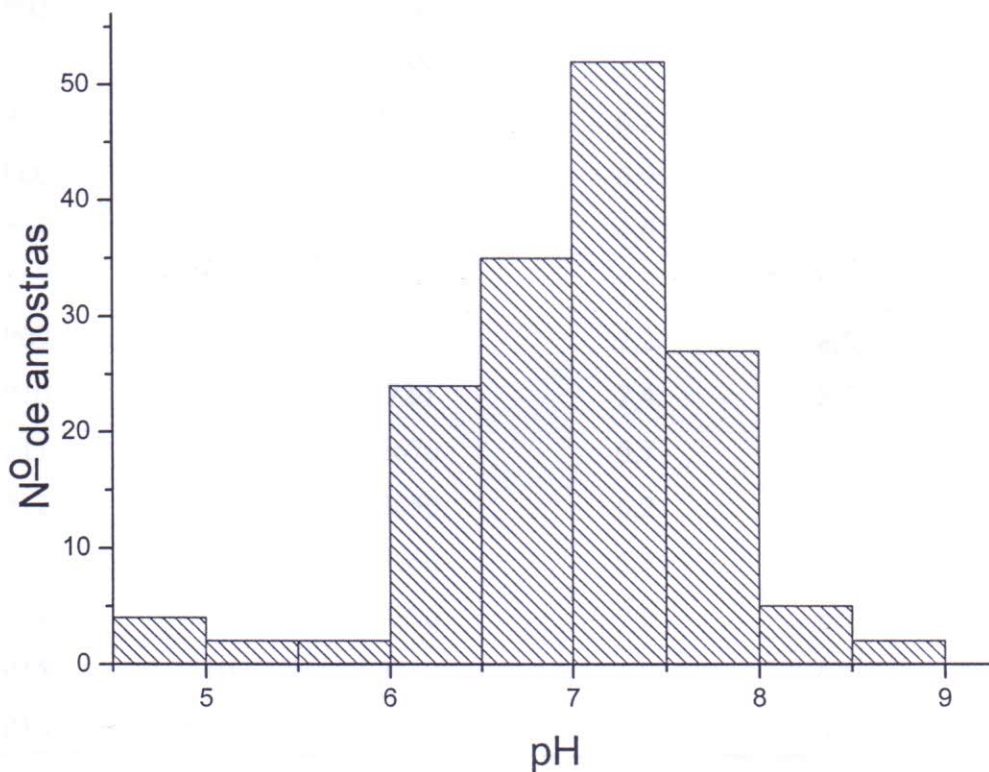


FIGURA 5.2 Histograma de valores de pH.

A tabela 5.14 apresenta os valores máximo e mínimo da condutividade elétrica de cada poço e a figura 5.3 mostram as variações na condutividade de todas as amostras dos poços em todo o período estudado. Os resultados mostram a heterogeneidade do sistema de armazenamento de água no cristalino.

TABELA 5.14 Limites de valores de condutividade elétrica e de pH nos 16 poços.

Poço	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)		pH	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
P01	1900	2820	6,5	7,9
P02	989	2440	6,6	7,3
P03	2010	3840	6,7	7,5
P04	823	938	7,4	7,8
P05	3840	5700	6,2	6,6
P06	1470	3340	6,9	7,8
P07	146	291	4,6	6,9
P08	650	703	7,0	7,5
P09	399	7500	7,2	8,0
P10	597	720	7,4	8,8
P11	2250	2670	6,7	7,5
P12	2150	3650	6,2	6,9
P13	106	5960	5,7	7,0
P14	862	2290	7,0	8,2
P15	2410	3310	6,0	6,3
P16	2630	3330	6,3	6,5

A variação percentual da condutividade elétrica em cada poço no período estudado foi calculada através da expressão a seguir e está mostrada na figura 5.3.

$$\Delta CE\% = \frac{CE_{\max} - CE_{\min}}{(CE_{\max} + CE_{\min})/2} \times 100$$

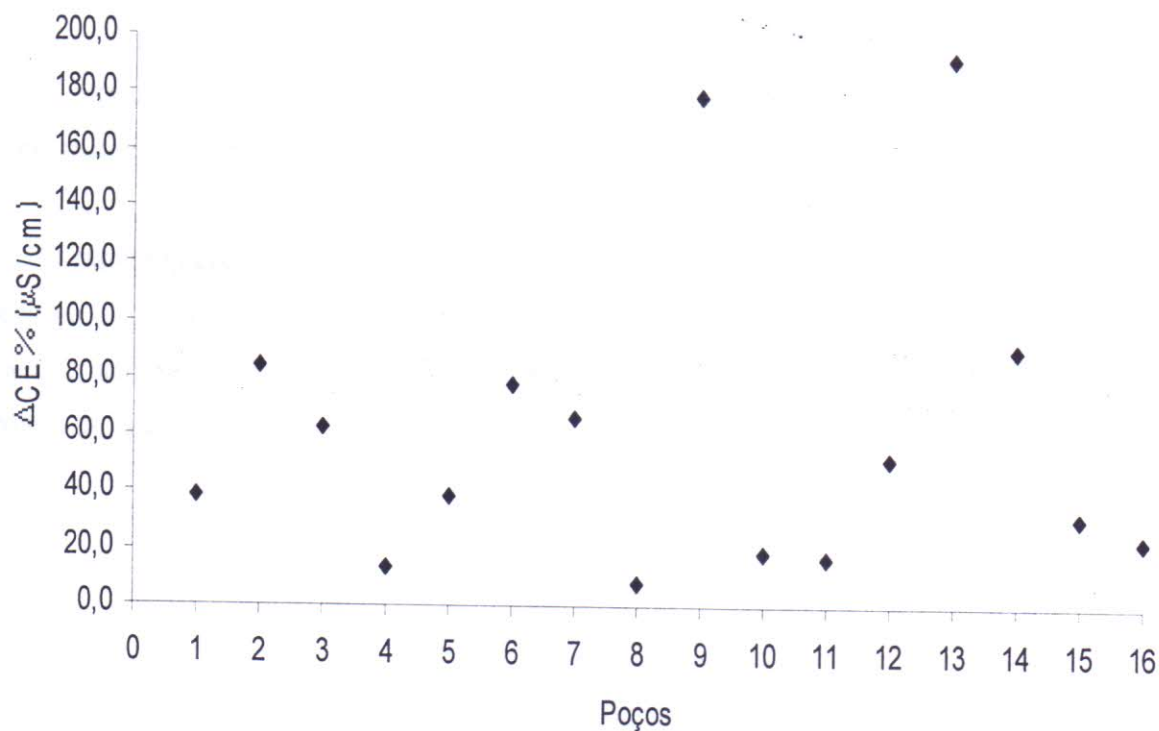


FIGURA 5.3 Diferença entre valores máximos e mínimos da condutividade elétrica em todo período de estudo.

A figura 5.4 apresenta valores de condutividade elétrica no poço P02 da localidade Coité, monitorado durante cinco anos, e a pluviosidade no município, no mesmo período, com dados da FUNCEME. Os resultados mostram variações cíclicas da condutividade elétrica, na faixa de cerca de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para cerca 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A comparação com a pluviosidade local permite observar que estas variações estão correlacionadas com as chuvas.

Nos meses de baixa pluviosidade e de pluviosidade nula, as concentrações salinas estão mais elevadas; o pico de chuvas de maio de 2001 produziu uma brusca diminuição da concentração salina passando da faixa de mais elevada condutividade elétrica para a de mais baixa, indicando recarga rápida.

Neste gráfico é possível observar claramente o efeito dos eventos mais intensos; chuvas de baixas intensidades pouco contribuem para diluir as águas armazenadas no poço. É o que

acontece nos meses com chuvas de dezembro/99 a fevereiro/00, janeiro/01 a março/01 e janeiro/02 a março/02.

É interessante observar que após os períodos de diluição a condutividade elétrica volta a crescer atingindo sempre a mesma faixa de valores do período seco.

A rápida queda da condutividade elétrica da água produzida pelo poço Coité mostra que a recarga de fraturas pode ser muito rápida, renovando a água em menos de um mês. Porém para isto acontecer, é necessário que a intensidade das chuvas seja suficiente para gerar escoamento superficial.

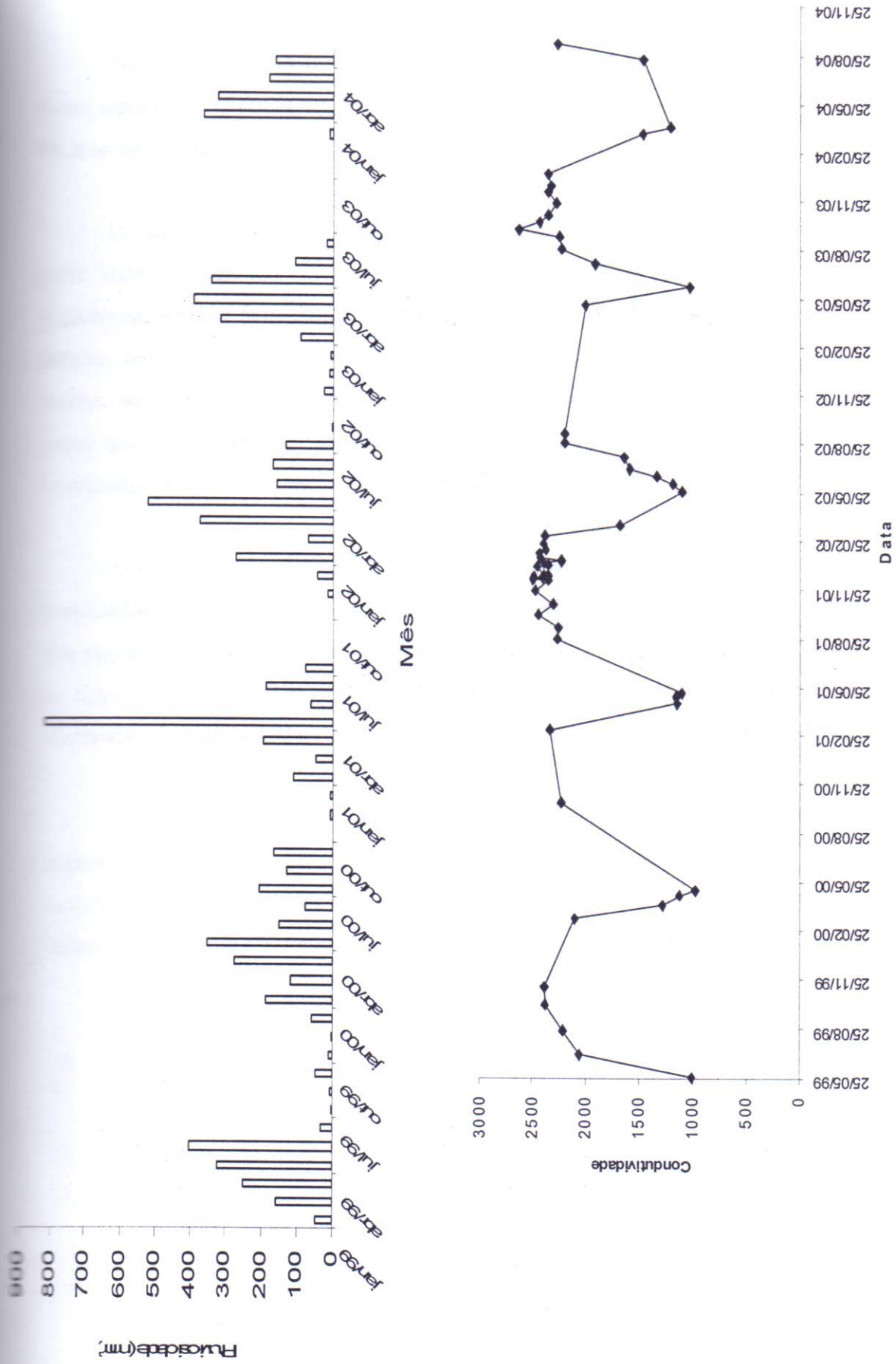


FIGURA 5.4 Pluviosidade mensal (mm) na área e variação da condutividade elétrica em amostras do poço P02 no período de maio de 1999 a setembro de 2004.

5.3 Classificação das águas

Para identificar os tipos hidroquímicos das águas subterrâneas analisadas, os poços foram separados em dois grupos; os que estão localizados na parte leste da área, que são P01 a P08, e os que estão no lado oeste, que são P09 a P16.

O Diagrama de Piper da figura 5.5 mostra que a maioria dos poços localizados na parte leste da área tem mesmo tipo de água. Os poços P01 a P03 e P05 a P07 têm predominantemente água cloretada sódica. Os poços P04 e P08, embora estejam próximos dos demais, tem águas diferentes: têm água mista com relação aos cátions e com relação aos ânions, no poço P04 a água é mista e no poço P08 a água é bicarbonatada. O poço P04 é o único que tem água com quantidade significativa de sulfato. Os poços P04 e P08 estão localizados em área de vegetação densa e o P08 está nas proximidades de uma lagoa.

O Diagrama de Piper da figura 5.6 mostra também, que a maioria dos poços que estão localizados no lado oeste da área tem águas com tendência a cloretada mista. Todas as águas dos poços, com relação aos cátions, são predominantemente mistas, e com relação aos ânions as águas dos poços P10 e P14 apresentam águas bicarbonatadas; as demais águas são cloretadas. Os poços P10 e P14 estão localizados em uma área de vegetação densa.

Pode-se observar que os poços P04, P08 e P10 estão entre estes que apresentaram menores variações na condutividade elétrica, como mostra a figura 5.3, estão claramente isolados dos demais nos diagramas de Piper, ou seja, apresentam também águas hidroquimicamente diferentes.

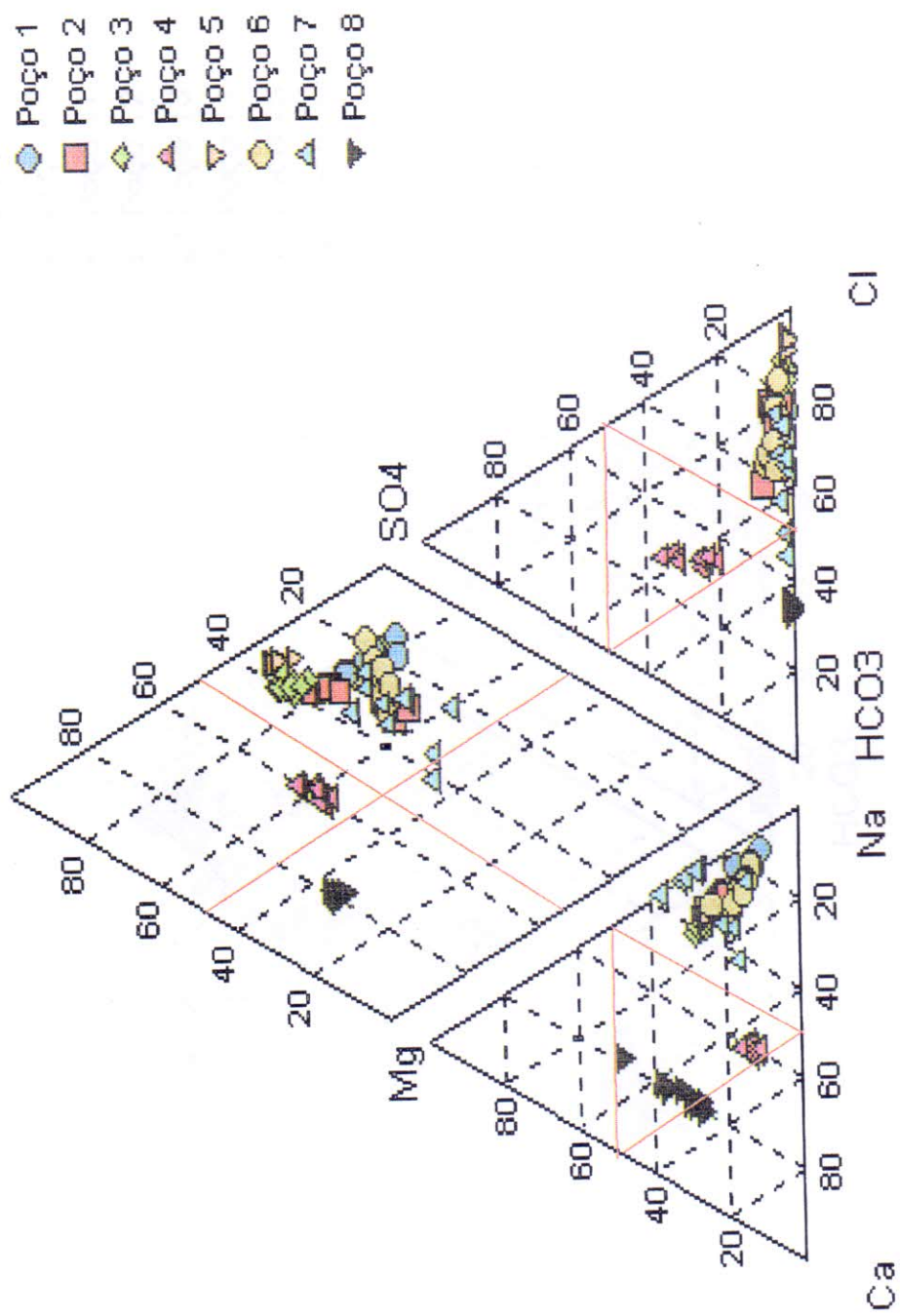


FIGURA 5.5 Diagrama de Piper com águas subterrâneas retiradas dos poços P01 a P08, na parte leste da área.

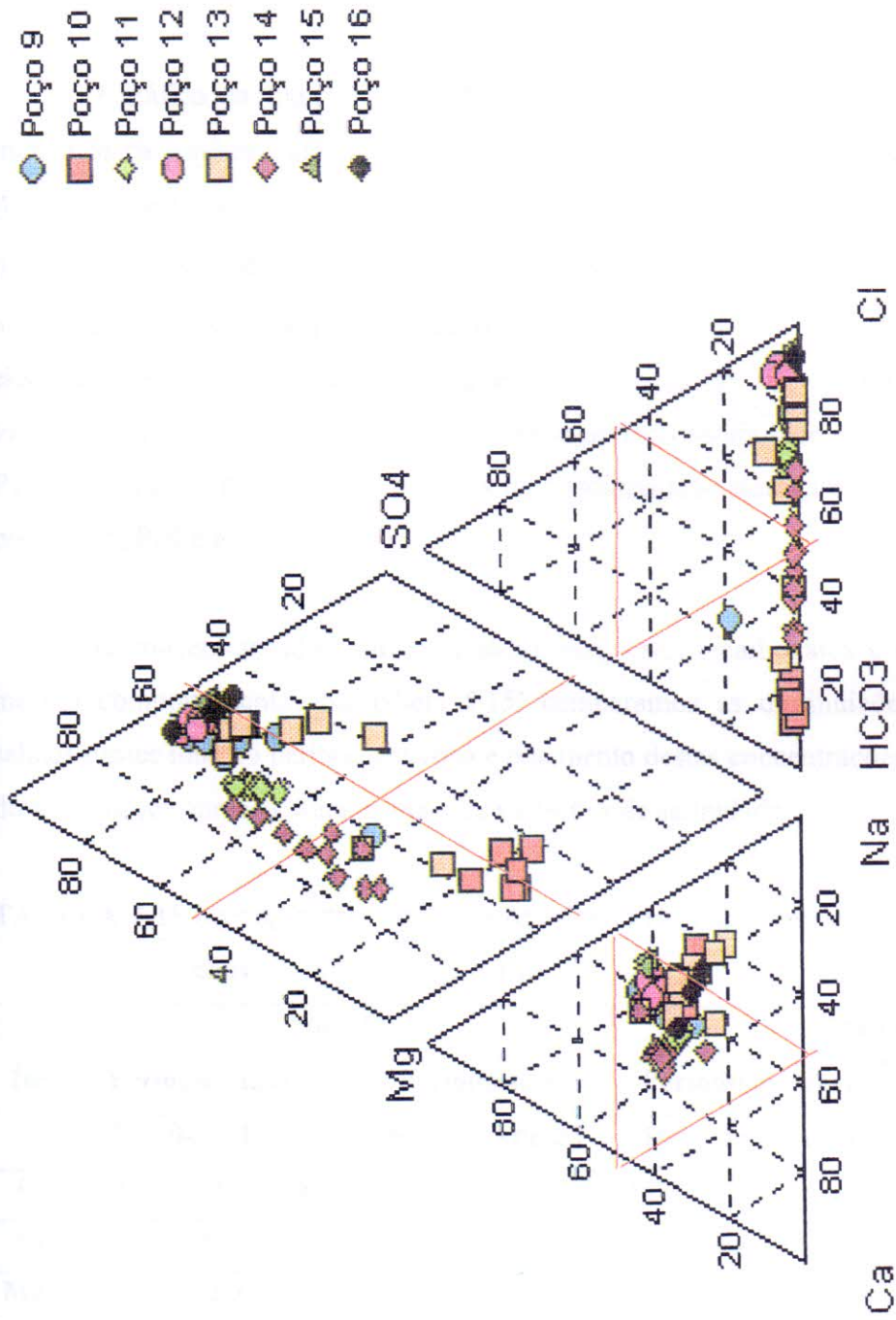


FIGURA 5.6 Diagrama de Piper com águas subterrâneas retiradas dos poços P09 a P16, na parte oeste da área.

5.4 Variação temporal das concentrações dos íons mais abundantes

Os resultados apresentados nas figuras 5.7 a 5.12 se referem ao período de 14 meses mostrando o comportamento da condutividade elétrica e das concentrações dos íons Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- e HCO_3^- em cada um dos 16 poços, em sinopse com a pluviosidade mensal na área.

O gráfico da figura 5.7a mostra que nas águas dos poços 09 e 13 houve grandes mudanças na condutividade elétrica; no poço 09 aumentou de 3030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, no final do período seco de 2003 e diminuiu para 399 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso de 2004. No poço 13 estas variações foram de 106 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante período seco, diminuindo até atingir 537 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período chuvoso. Nos poços 01, 04, 07, 08, 10 e 11 a condutividade elétrica apresentou as menores variações e nos poços 02, 03, 05, 06, 12, 14, 15 e 16 as variações na condutividade elétricas durante o período foram bem menores do que em P09 e P13. A figura 5.7.b mostra as variações na condutividade elétrica com o tempo excluídos os poços P05, P09 e P13.

As concentrações de cloretos, sódio, magnésio, bicarbonatos e sódio apresentaram o mesmo comportamento. Na tabela 5.15, comparamos as diminuições das concentrações salinas destes íons no período chuvoso e o aumento destas concentrações no período seco nos dois poços que apresentaram as maiores variações de salinidade.

TABELA 5.15 Variação das concentrações dos íons maiores no período seco e no período chuvoso nos poços P9 e P13

Íon	Poço P09		Poço P13	
	Período chuvoso	Período seco	Período chuvoso	Período seco
	Fev-04 / Mar-04	Dez-03 / Abr-03	Dez-03 / Mar-04	Nov-03 / Mai-03
Cl^-	1110,0 / 39,0 = 28,5	2233,7 / 839,0 = 2,7	1494,4 / 109,2 = 13,7	1494,4 / 851,2 = 1,8
Na^+	357,3 / 40,9 = 8,7	662,3 / 270,0 = 2,5	574,1 / 75,5 = 7,6	586,4 / 259,7 = 2,3
Mg^{2+}	205,2 / 15,9 = 12,9	400,8 / 141,4 = 2,8	197,7 / 13,2 = 15	206,2 / 123,3 = 1,7
HCO_3^-	319,1 / 155,0 = 2,1	463,9 / 370,3 = 1,3	475,4 / 108,9 = 4,4	463,9 / 332,7 = 1,4
Ca^{2+}	163,2 / 29,3 = 5,6	326,1 / 168,4 = 1,9	227,4 / 19,8 = 11,5	213,3 / 162,5 = 1,3

Para os poços P09 e P13, o quadro mostra que as diminuições das concentrações iônicas no período chuvoso são bem maiores do que os aumentos no período seco. Como 2004 foi um ano de pluviosidade acima da média e com uma distribuição de chuvas também diferente do padrão para a área (Figura 5.7), a recarga dos poços foi elevada e a águas dos poços P09 e P13 amostradas no período chuvoso foram as da recarga razão porque as relações entre as concentrações iônicas antes e depois do período chuvoso são muito elevadas (TABELA 5.15).

As razões entre as concentrações iônicas no final e no início do período seco são relativamente menores porque refletem o processo de misturas das águas já existentes nas fendas com as águas de recarga do último período chuvoso.

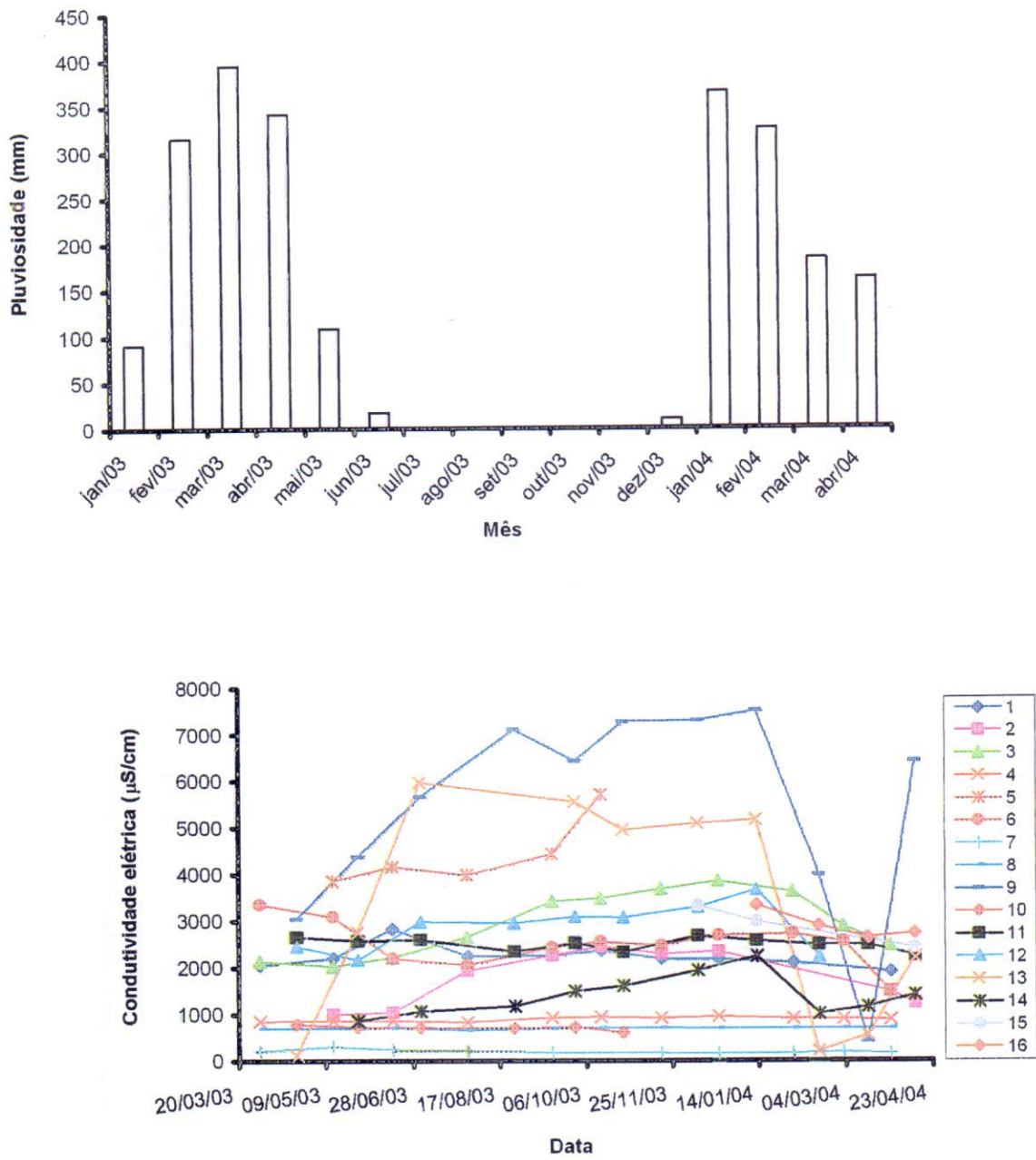


FIGURA 5.7a Pluviosidade mensal na área e variação da condutividade elétrica com o tempo.

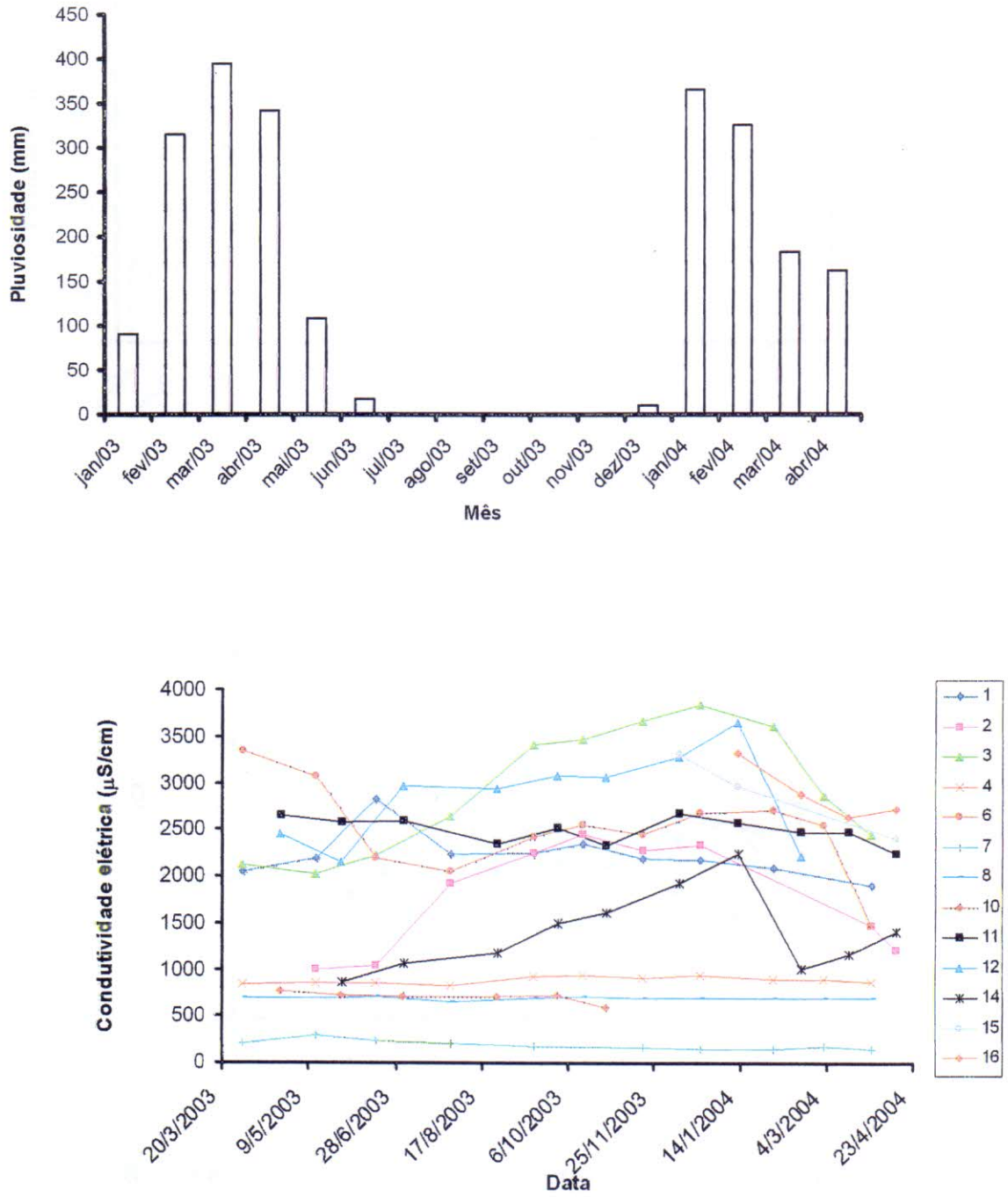


FIGURA 5.7b Pluviosidade mensal na área e variação da condutividade elétrica com o tempo.

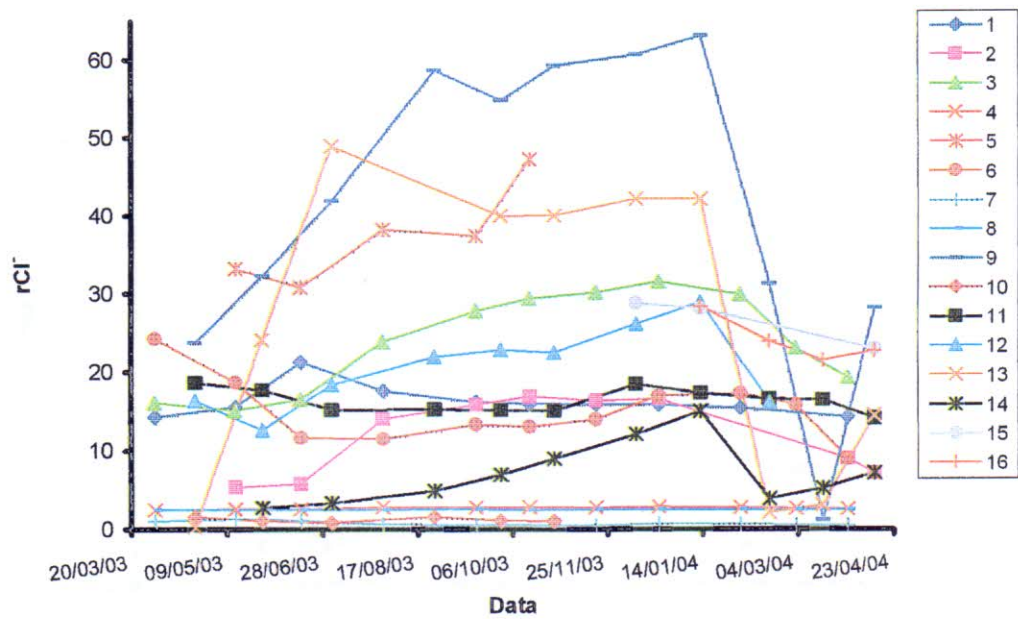
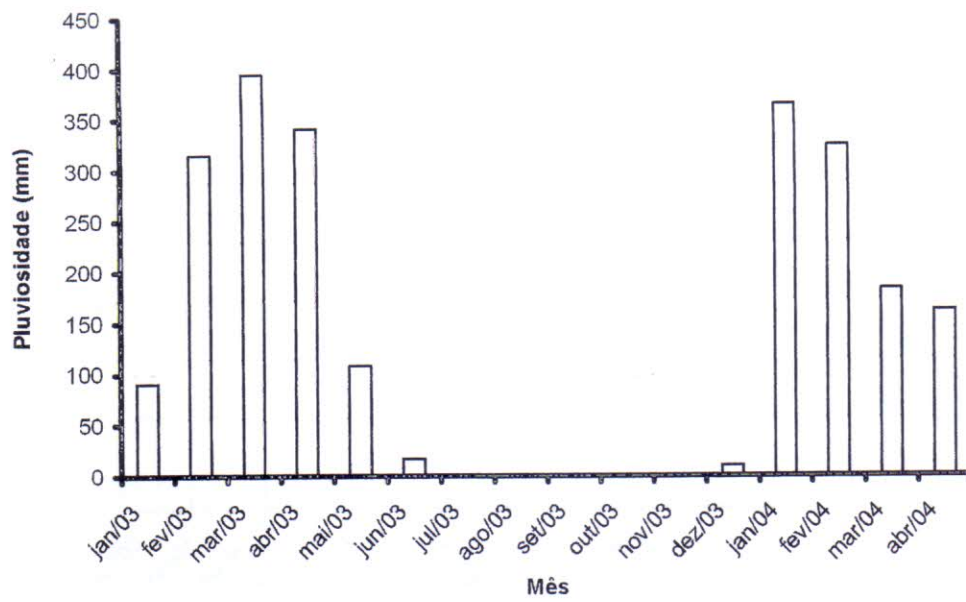


FIGURA 5.8 Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de cloretos (meq/L) com o tempo.

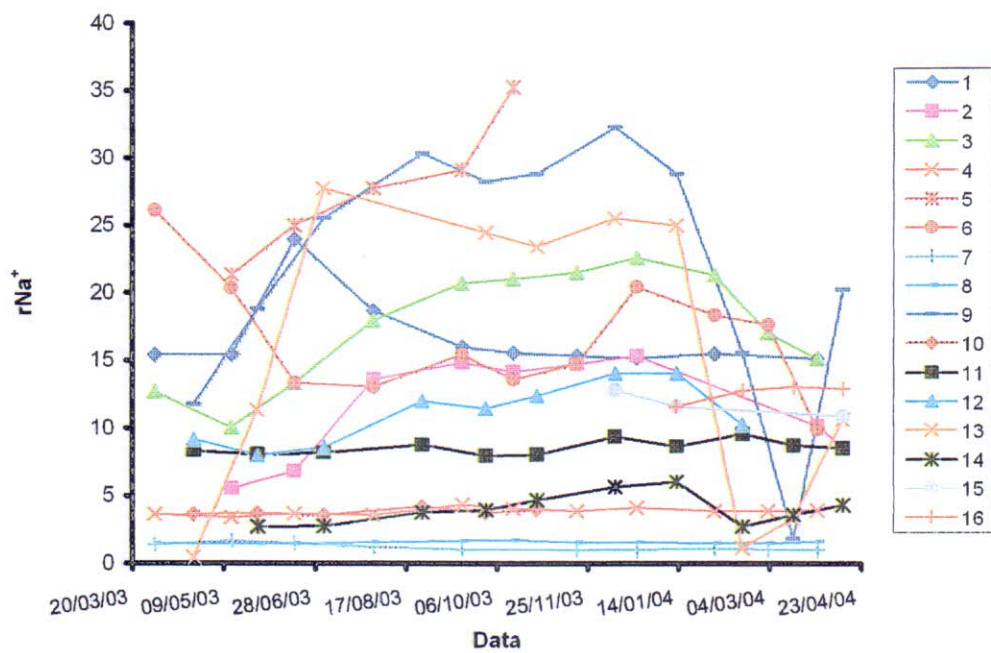
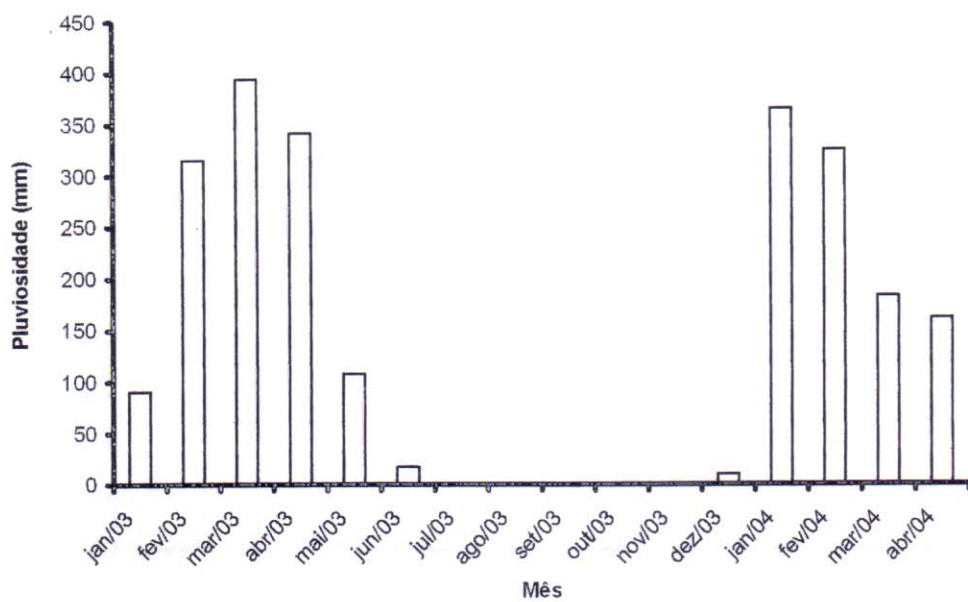


FIGURA 5.9 Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de sódio (meq/L) com o tempo.

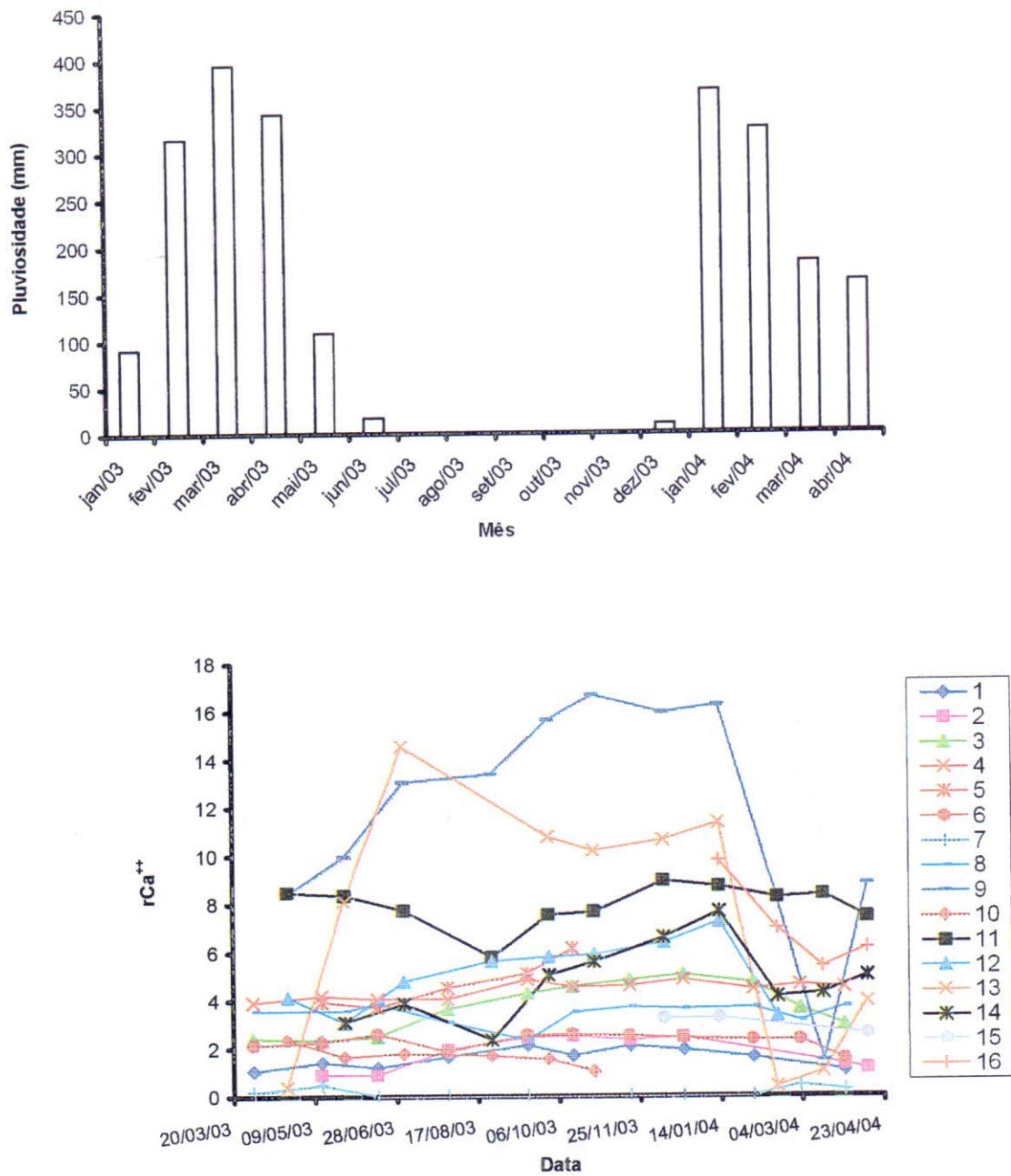


FIGURA 5.10 Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de cálcio (meq/L) com o tempo.

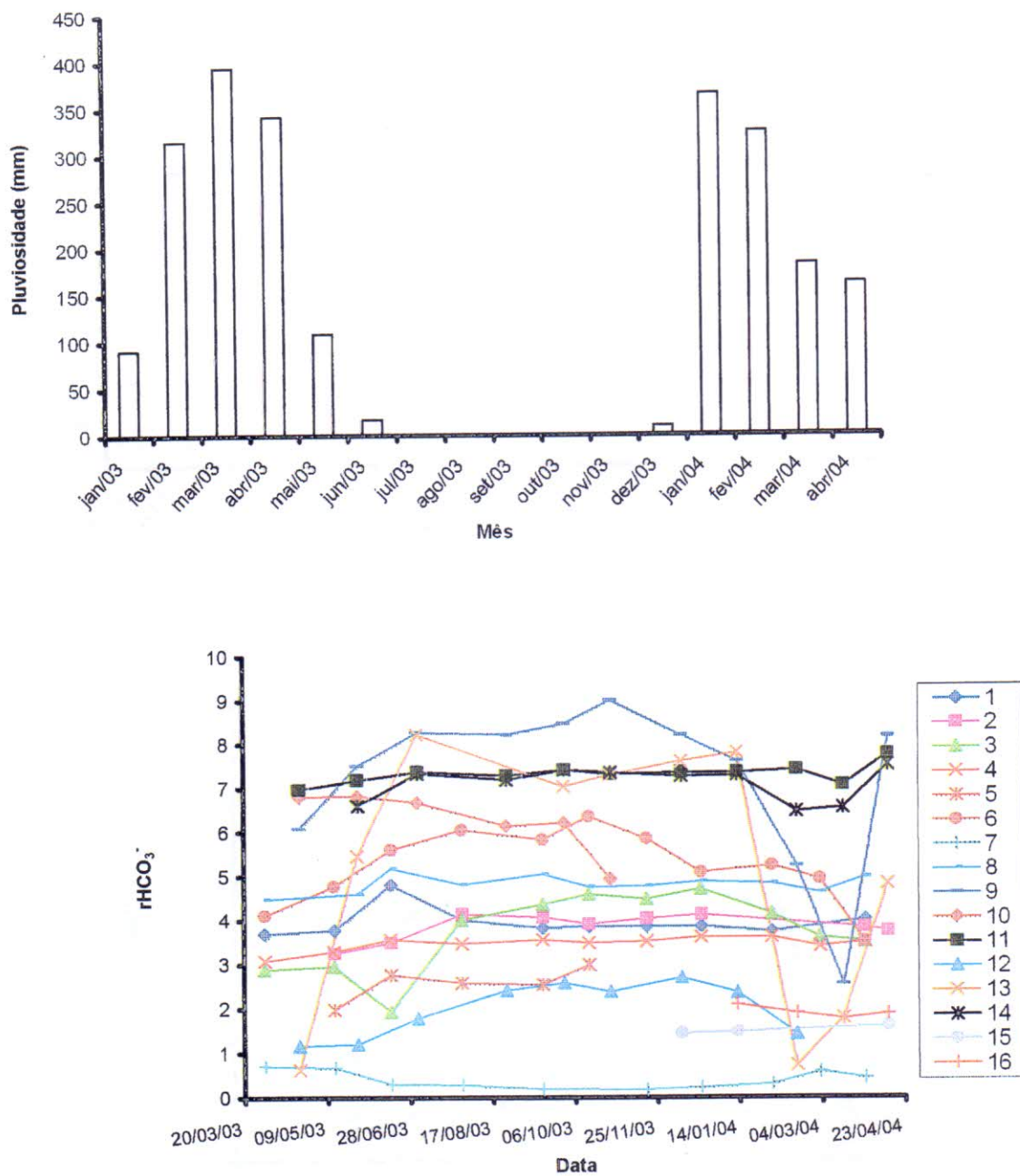


FIGURA 5.11 Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de bicarbonato (meq/L) com o tempo.

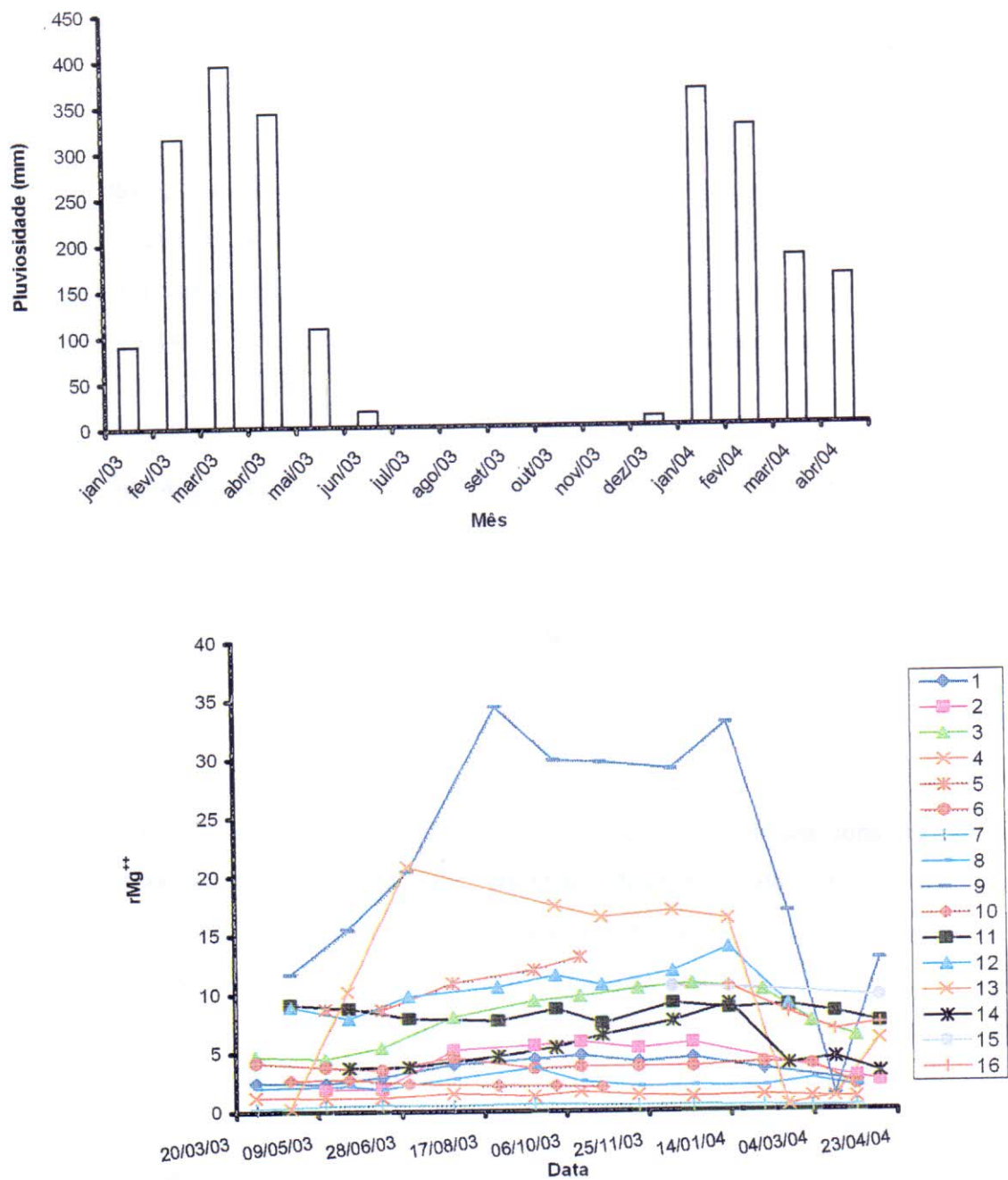


FIGURA 5.12 Pluviosidade mensal na área e variação da concentração de magnésio (meq/L) com o tempo.

O armazenamento da água explorado neste trabalho é o cristalino, um armazenamento de águas em fraturas, que justifica a heterogeneidade espacial dos dados. Os poços P09 e P13, provavelmente, exploram sistema de fendas diferentes dos demais.

Além das coletas durante o período de um ano foi feita uma nova coleta em setembro de 2004 para uma comparação com os dados de um ano antes, ou seja para comparar as concentrações iônicas das amostras coletadas em setembro de 2003 com as concentrações iônicas das amostras coletadas em setembro de 2004. Os resultados estão apresentados na figura 5.13.

Nesta figura aparecem somente os sete poços que foram coletados nos dois períodos. Os resultados mostram que todos os poços apresentam as mesmas características nas duas amostragens com tendência a concentrações mais baixas em 2004 do que em 2003. Nestes casos a recarga no período chuvoso foi elevada o que produziu a diluição da água armazenada. É importante observar que o ano de 2004 foi um ano de chuvas acima da média na área.

As tabelas 5.2 a 5.12 apresentam, além das concentrações dos íons maiores, as concentrações dos elementos nitrogenados, amônia, nitrito e nitrato cujos valores estão apresentados também nas figuras 5.14 a 5.16. Estes íons estão associados à poluição; a amônia, proveniente da degradação da matéria orgânica, sofre processo de nitrificação, passando a nitrito e depois a nitrato. A figura 5.14 mostra que as concentrações de amônia em todos os poços e em todas as coletas estão abaixo de 4mg/L. As concentrações de nitrito (FIGURA 5.15) são elevadas somente nos poços P12 e P06, onde os valores estão acima de 1mg/L; no entanto, as concentrações de nitrato (FIGURA 5.16) estão acima de 45mg/L (máximo permitido pelo CONAMA Resolução 518, 2004) nos poços P01, P02, P06, P07, P09, P12 e, os três últimos com valores acima de 100 mg/L na maioria das coletas.

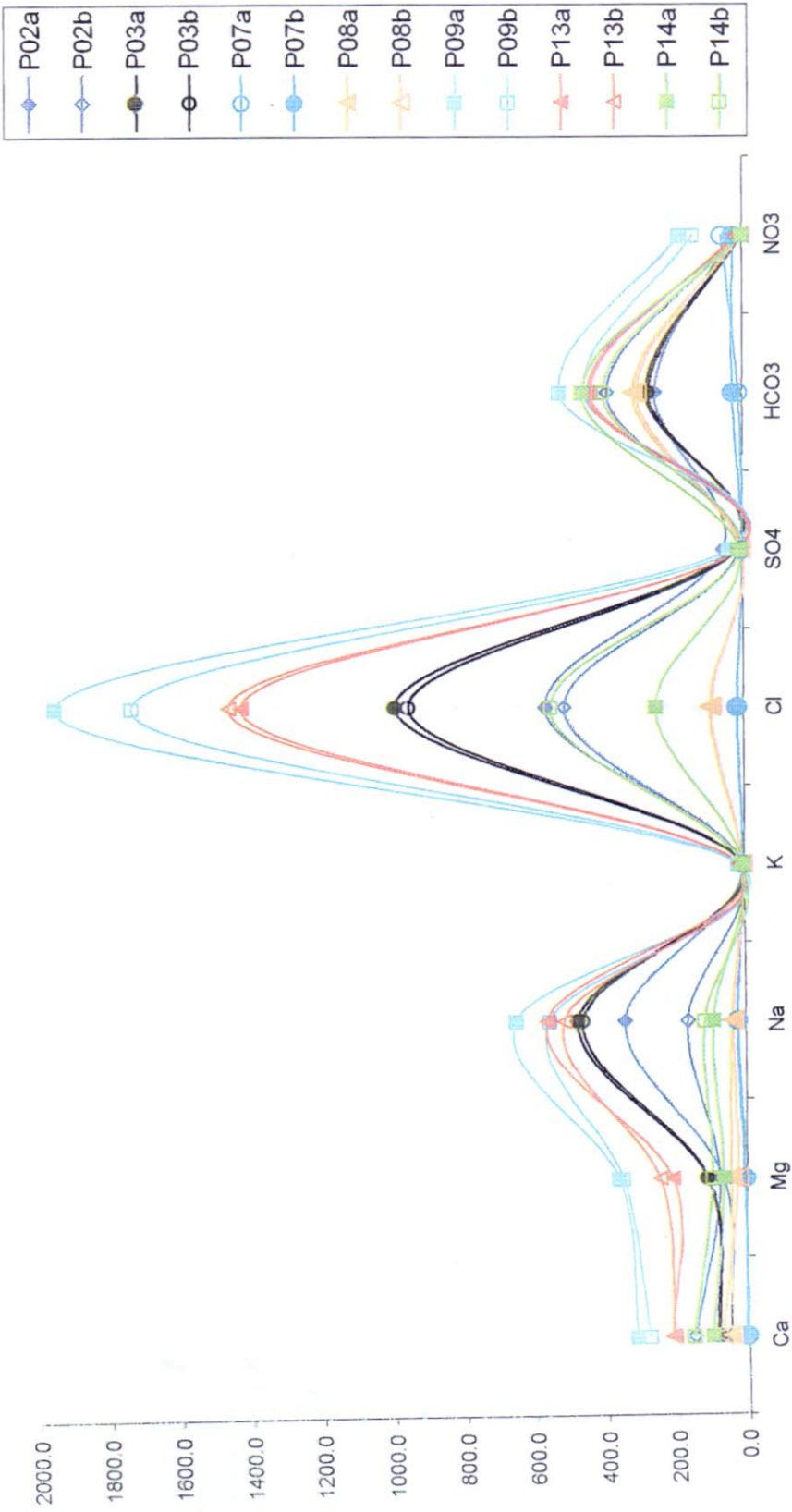


FIGURA 5.13 Concentrações (mg/L) dos íons maiores em 7 poços. (P02a: coleta de setembro de 2003 e P02b: coleta de setembro de 2004 e assim, para os outros poços).



FIGURA 5.14 Concentração de amônia de todas as amostras.

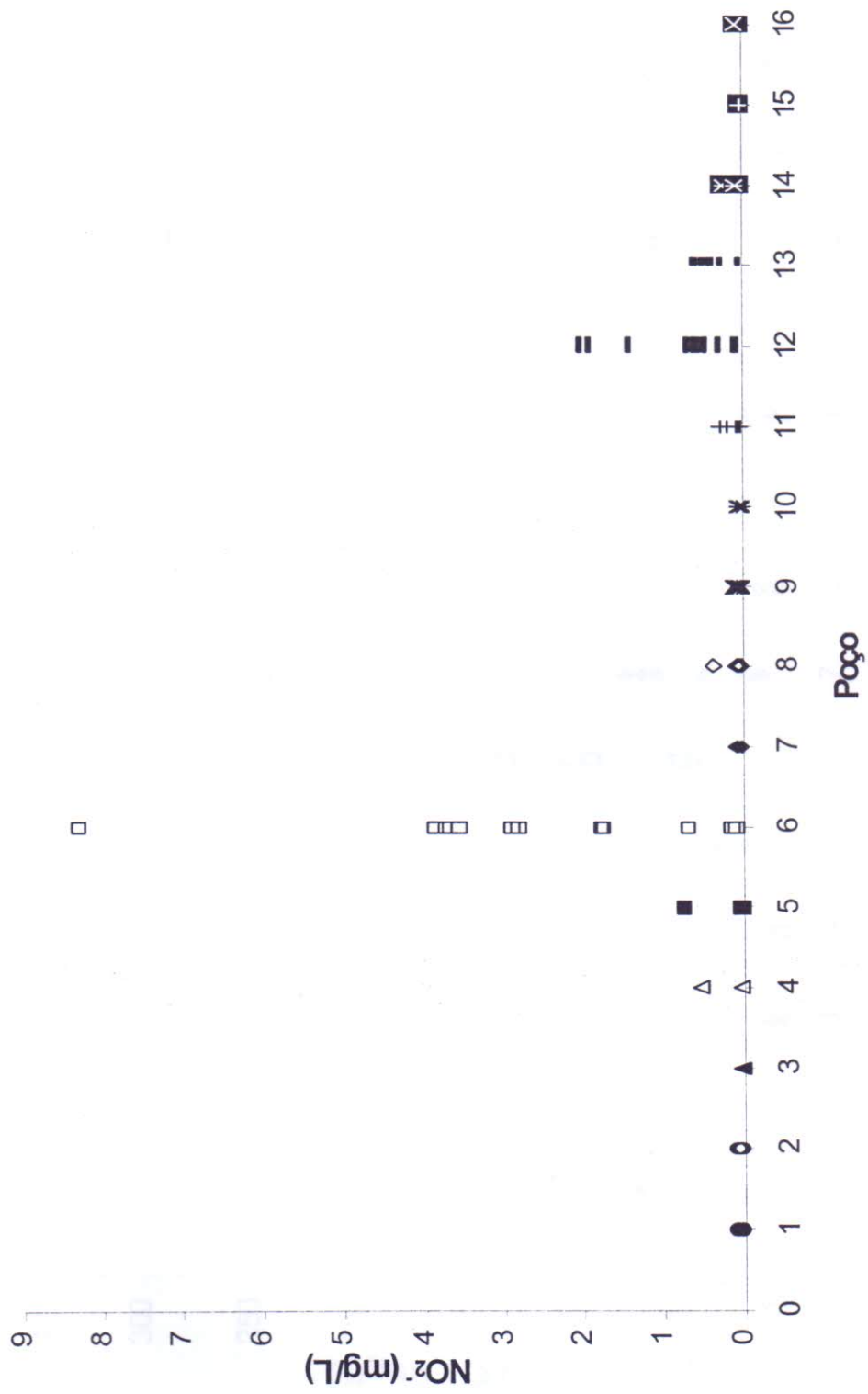


FIGURA 5.15 Concentração de nitrito de todas as amostras.

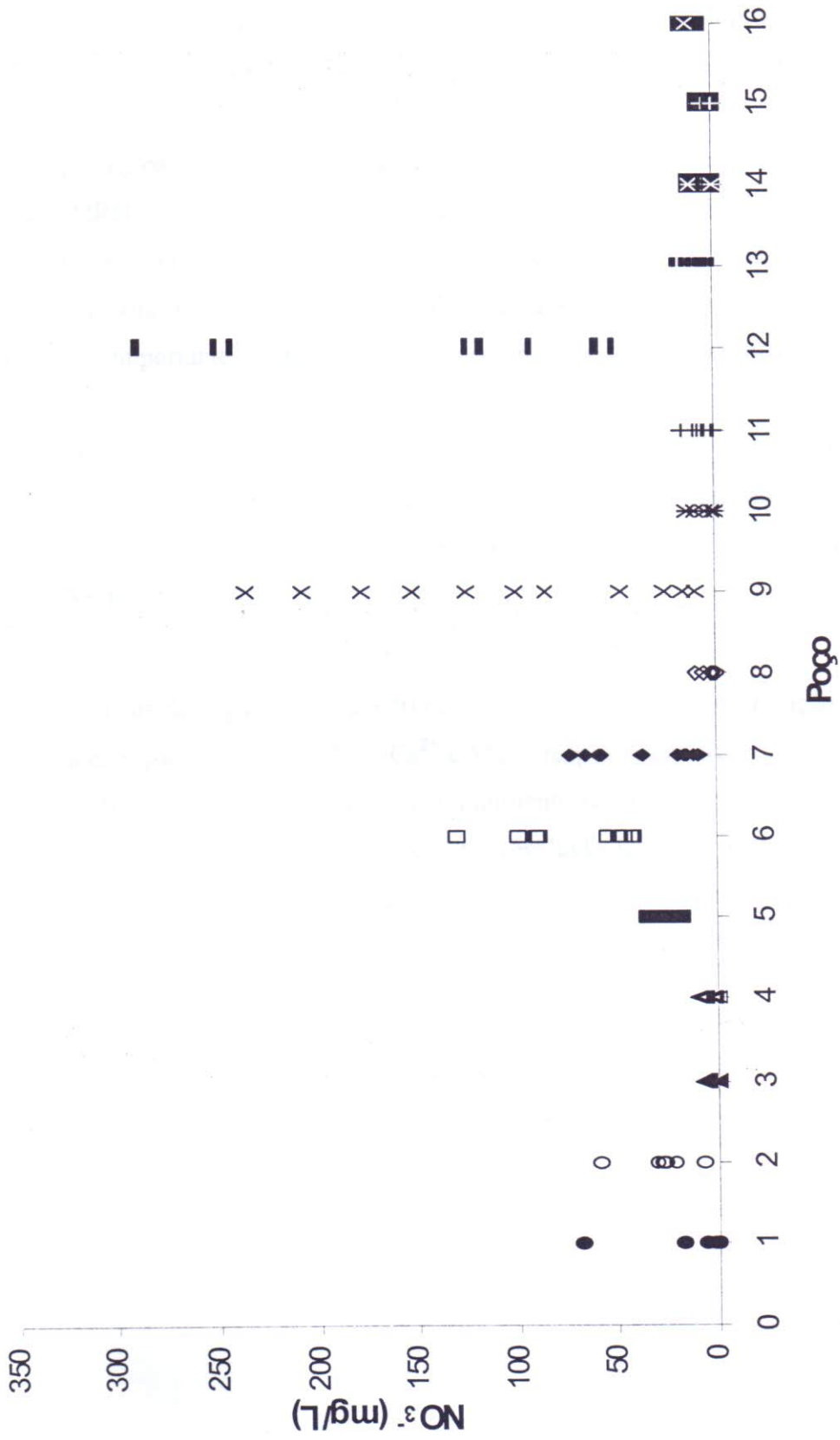


FIGURA 5.16 Concentração de nitrato de todas as amostras.

5.5 A origem dos sais

Nas águas novas de chuvas recentes, o cátion predominante é o cálcio e nas águas salinas predomina o sódio; com relação aos ânions, os bicarbonatos predominam nas águas novas e os cloretos nas águas salinas.

Os primeiros sais dissolvidos nas águas são fornecidos pelas chuvas. Vários autores, entre eles GORHAM (1961), observaram que sais de origem atmosférica não são encontrados somente em reservatórios superficiais próximos à costa. O segundo mecanismo de aquisição de sais é a dissolução das rochas através do qual a água fica em equilíbrio com estas. O terceiro e mais importante dos mecanismos são os processos de evaporação e cristalização.

Portanto, os sais nas águas subterrâneas se originam da água de recarga que ocorre no período chuvoso, da dissolução das rochas do aquífero, e a concentração muda por processo de evaporação e precipitação. A intensidade de cada uma destas etapas depende do clima e das condições geológicas de armazenamento.

Os gráficos das figuras 5.18 a 5.20 mostram a variação da concentração do cátion Al^{3+} com as concentrações dos cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , respectivamente. As amostras dos poços P01, P02 e P16 são as únicas que apresentam aumento na concentração de alumínio quando existe aumento na concentração de sódio; este resultado indicam a possibilidade dos íons dissolvidos nestas águas serem resultantes da ação do intemperismo nos alumino-silicatos (CAPÍTULO 4).

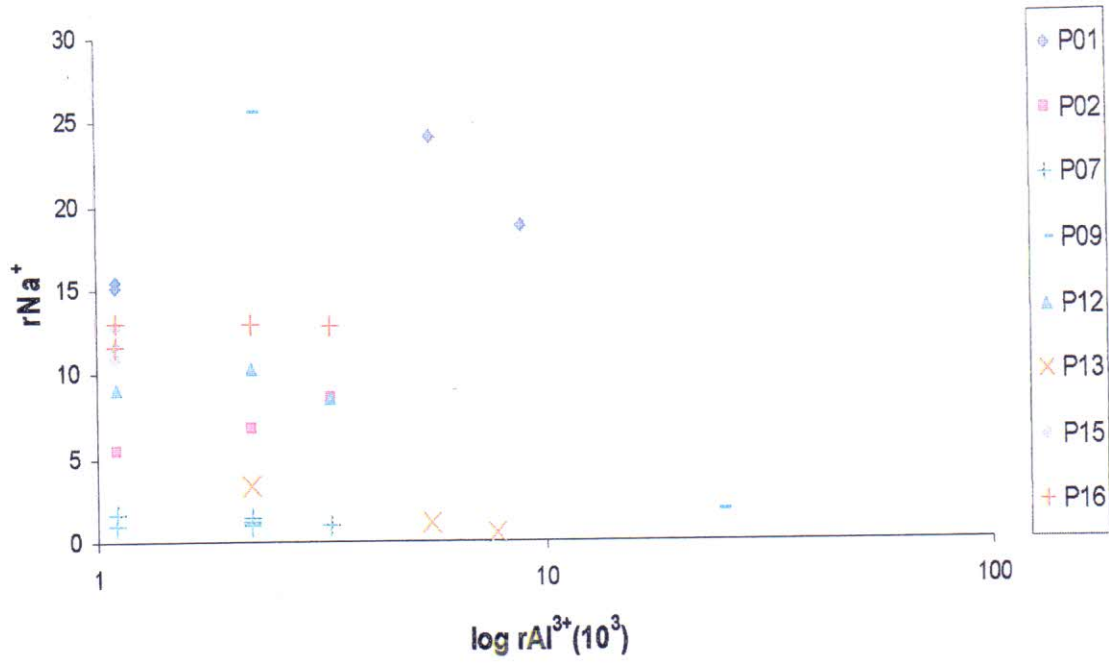


FIGURA 5.18 Concentração de sódio (meq/L) versus concentração de alumínio (meq/L).

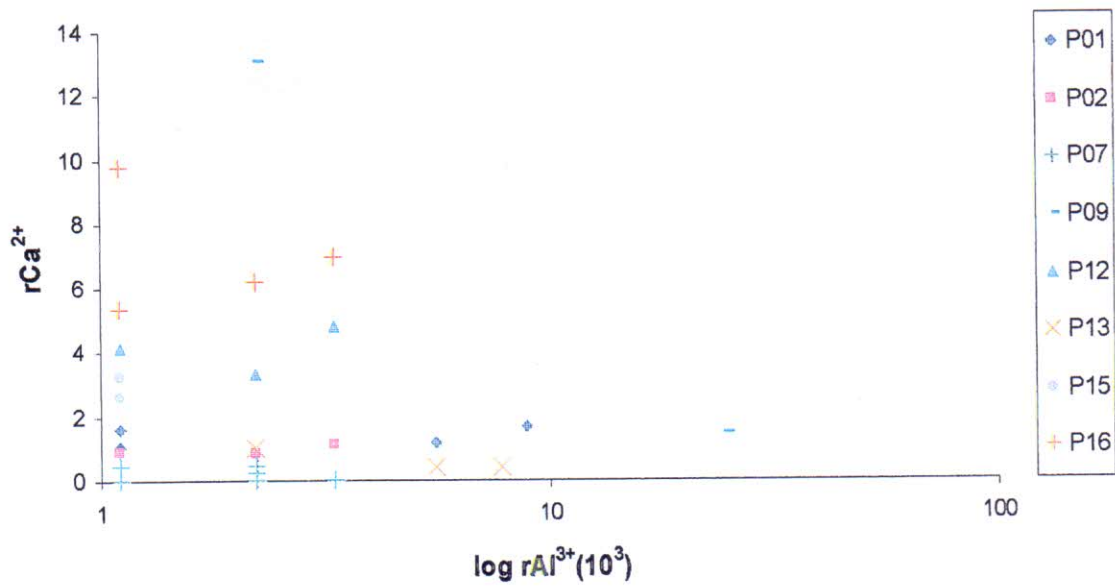


FIGURA 5.19 Concentração de cálcio (meq/L) versus concentração de alumínio (meq/L).

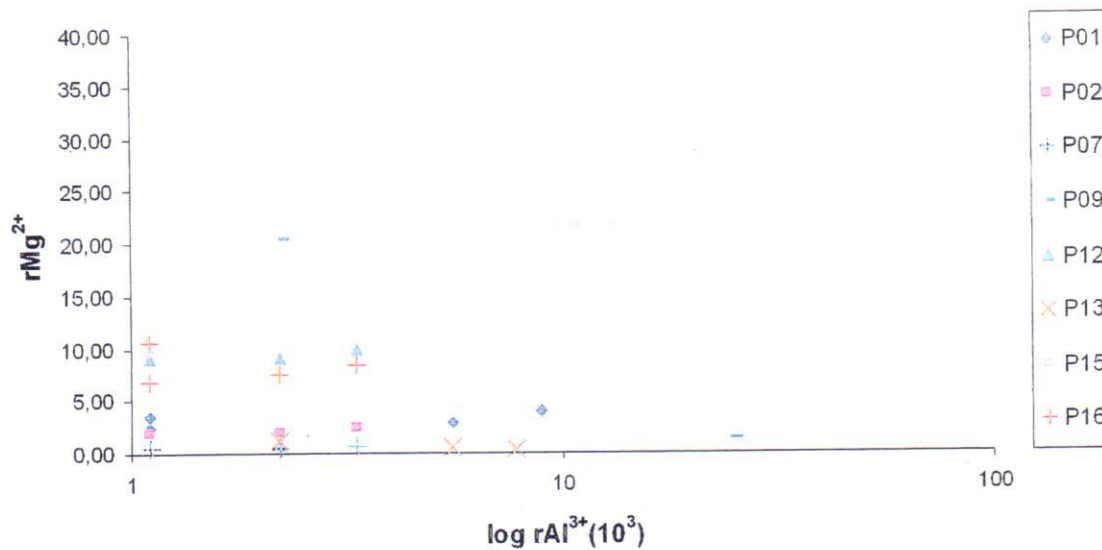


FIGURA 5.20 Concentração de magnésio (meq/L) versus concentração de alumínio(meq/L).

Enquanto o alumínio só esteve detectável em 38 das 153 amostras analisadas, ou seja, em 24,8% delas, e sempre em concentração dentro do limite de potabilidade que é de 0,2mg/L, o ferro esteve presente em 92% das amostras como mostra a figura 5.21 e em 33 das 153 amostras (21,6%), as concentrações estavam acima do limite adotado pelo CONAMA (Res. 518, 2004) que é de 0,3 mg/L.

A figura 22a mostra a concentração do cátion Na^+ com a concentração do ânion Cl^- nas amostras dos poços do P01 ao P08. Neste gráfico, pode-se ver que as amostras apresentam uma boa correlação, indicando que a origem destes íons seja predominantemente dos aerossóis marinhos da região costeira. Parte das amostras estão na reta $r\text{Na}^+ = r\text{Cl}^-$; nos poços P03 e P05 os cloretos estão associados também a outros cátions. Um processo provável é a troca de sódio por cálcio.

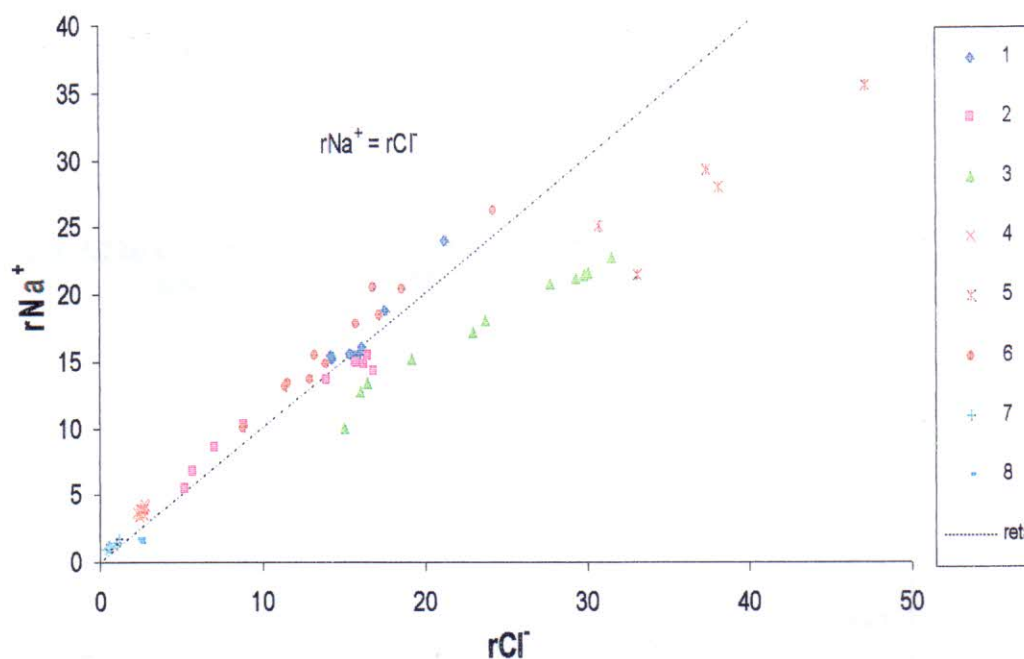


FIGURA 5.22a Concentração de sódio (meq/L) versus concentração de cloretos (meq/L) nas amostras dos poços P01 a P08.

A figura 5.22b mostra a concentração do cátion Na^+ com a concentração do ânion Cl^- nas amostras dos poços do 09 ao P16. Neste gráfico pode-se ver que a concentração de cloretos aumenta com relação à concentração de sódio, este fato mostra que os cloretos estão associados a outros cátions e que pode haver trocas de sódio por outro cátion como, por exemplo, o cálcio.

A figura 5.23a mostra a concentração do cátion Ca^{2+} com a concentração do ânion HCO_3^- para os poços do P01 ao P08. Neste gráfico pode-se ver que o poço P05 apresenta uma boa correlação entre estes íons, o que indica a origem destes íons na amostra como dissolução de calcita. Nas demais amostras os bicarbonatos estão associados também a outros cátions.

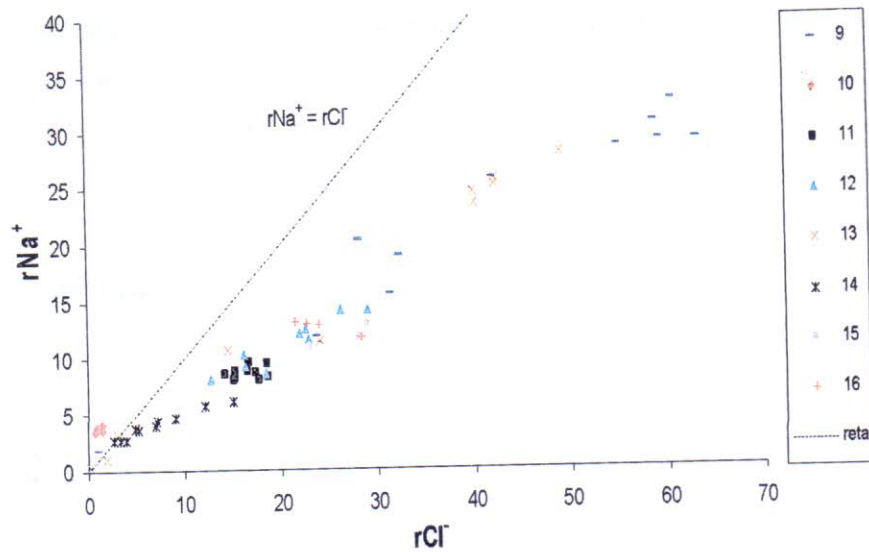


FIGURA 5.22b Concentração de sódio (meq/L) versus concentração de cloretos (meq/L) nas amostras dos poços P09 a P16.

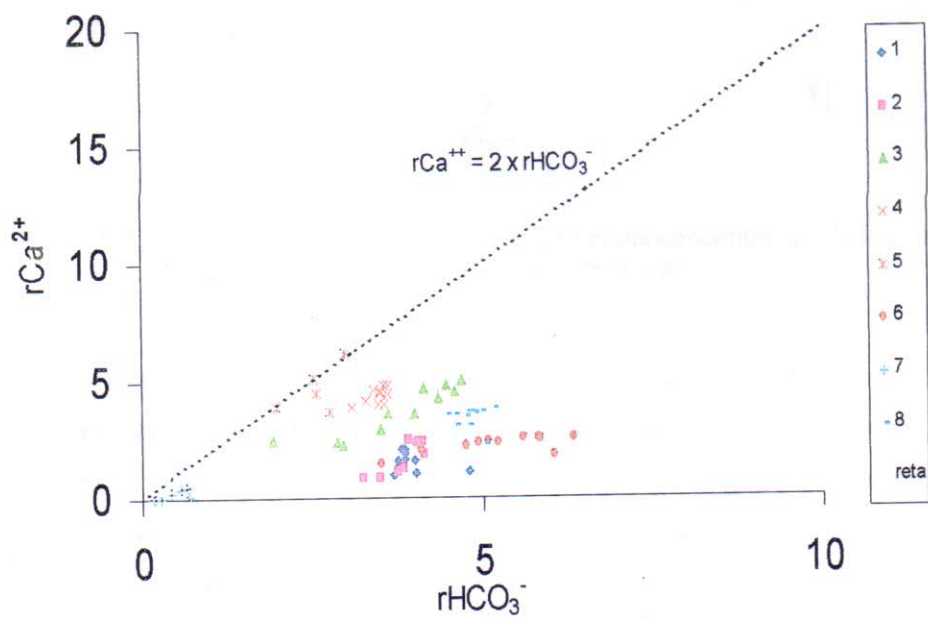


FIGURA 5.23a Concentração de cálcio (meq/L) versus concentração de bicarbonatos (meq/L) nas amostras dos poços P01 a P08.

A da figura 5.23b mostra a concentração do cátion Ca^{2+} com a concentração do ânion HCO_3^- nas amostras dos poços do 09 ao 16. Neste gráfico pode-se ver que nas amostras dos poços P09 e P12 as concentrações estão na tendência $r\text{Ca}^{2+} = 2 r\text{HCO}_3^-$ indicando que a origem destes íons seja a dissolução da calcita. Nas demais amostras a concentração de cálcio cresce sem o correspondente aumento de bicarbonatos indicando que este ânion está associado a outros cátions..

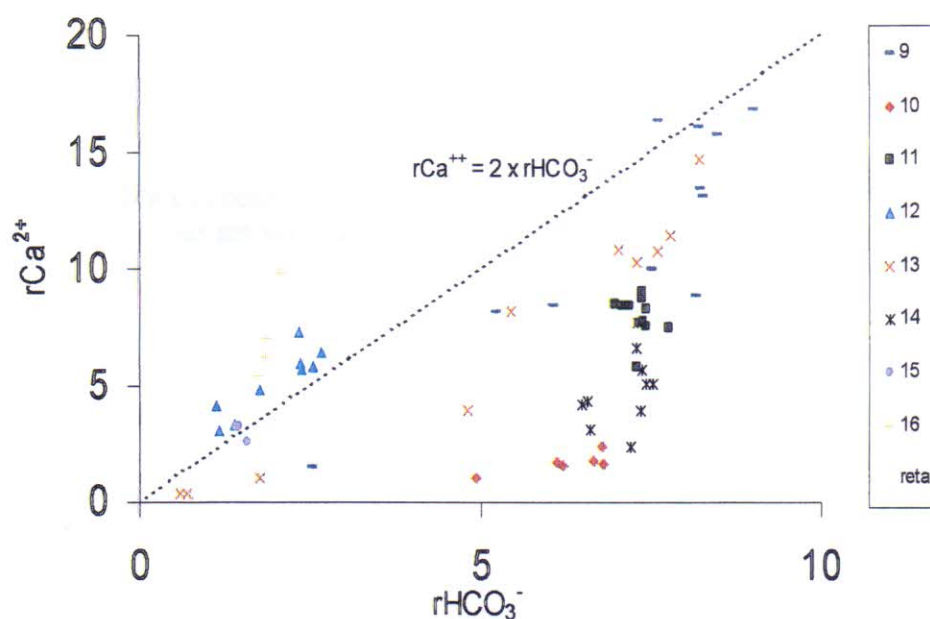


FIGURA 5.23b Concentração de cálcio (meq/L) versus concentração de bicarbonatos (meq/L) nas amostras dos poços P09 a P16.

As figuras 5.24a e 5.24b apresentam as concentrações de Na^+ versus concentração de Ca^{2+} em percentuais de cations; os resultados mostram que, dos 16 poços estudados, em 12 os percentuais de sódio e de cálcio variam inversamente o que significa a ocorrência de processo de troca destes cátions na maioria deles. Nos poços P04, P08, P09 e P12 o percentual de cálcio cresce mantendo constante o percentual de sódio.

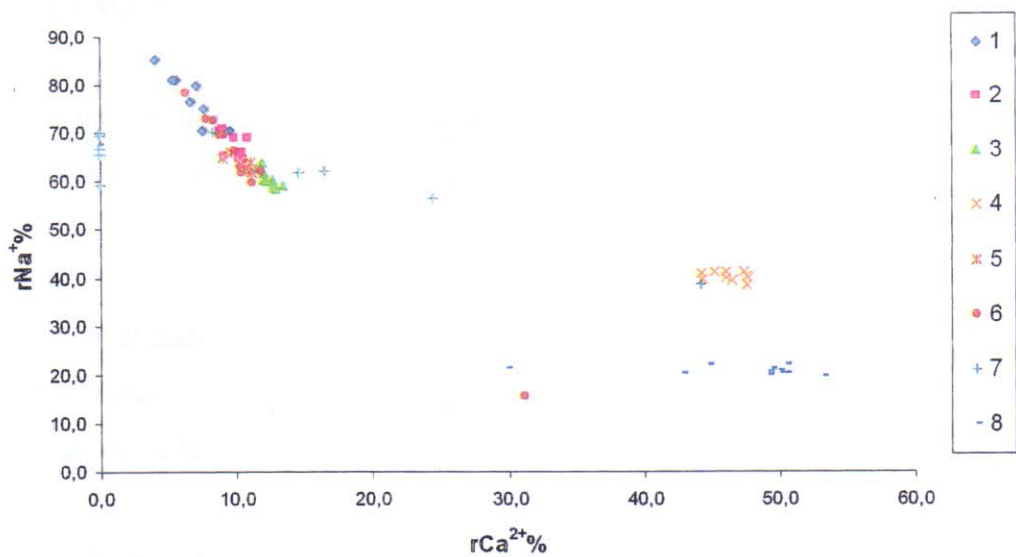


FIGURA 5.24a Concentração percentual de sódio versus concentração percentual de cálcio nas amostras dos poços P01 a P08.

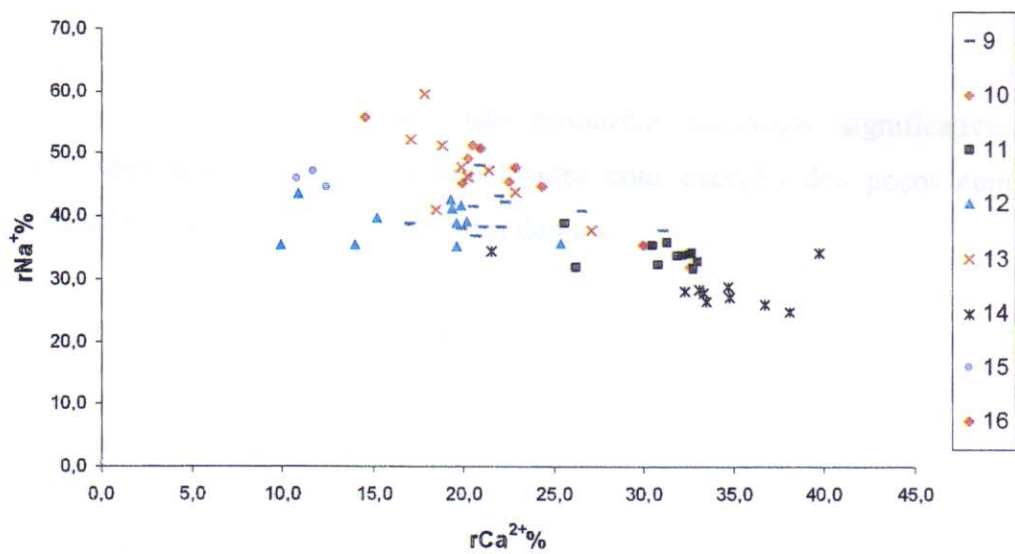


FIGURA 5.24b Concentração percentual de sódio versus concentração percentual de cálcio nas amostras dos poços P09 a P16.

6 CONCLUSÕES

Da análise hidroquímica do conjunto de 153 amostras de água subterrânea, coletadas periodicamente de 16 poços no cristalino no Município de Caucaia/Ceará, podemos concluir que:

- A qualidade da água varia durante o ciclo hidrológico; a concentração de sais diminui no início do período chuvoso e aumenta no início do período seco atingindo valor característico de cada poço.
- A variação da concentração salina, expressa pela condutividade elétrica, foi máxima nos poços P09 e P13, respectivamente de 180% e 193%, seguida em ordem decrescente pelas variações nos poços P06 (77%) e P05 (39%). Os poços que apresentaram menores mudanças foram P04 (13%) e P08 (8%).
- A variação na salinidade ocorre com a contribuição de todos os cátions e ânions maiores.
- As mudanças de salinidade não produzem mudanças significativas no tipo hidroquímico das amostras, que são semelhantes com exceção dos poços com menores variações na salinidade que se distinguem dos demais.
- As amostras dos poços P01 a P08, na parte leste da área, mais próxima da costa, são predominantemente cloretadas sódicas com exceção dos poços P04 e P08, este último próximo de uma lagoa.
- As amostras dos poços P09 a P16, na parte oeste da área são cloretadas mistas e bicarbonatadas mistas, com exceção de parte das amostras do poço P13 que são cloretadas sódicas.
- A dissolução de alumino silicatos não é um processo dominante para a salinidade das águas; o Al^{3+} encontra-se em concentrações baixas e abaixo do limite de detecção (CONAMA Resolução 518, 2004) em 26% das amostras.

- O monitoramento do poço P02 durante cinco anos mostrou que as variações na salinidade são cíclicas.

- A variação espacial da salinidade pode ser explicada através da heterogeneidade do sistema de fraturas que armazenam as águas. Fraturas logo abaixo do manto de intemperismo contribuem no período chuvoso para a diminuição da salinidade durante este período. Fraturas mais profundas com águas mais salinas são os armazenamentos da água explotada quando cessa a contribuição do manto de intemperismo e das fraturas mais superficiais.

- A contribuição de uma lagoa para o aquífero é evidenciada pela salinidade baixa e menor variação do poço P08.

- A concentração de nitrato acima de 45mg/L, que indica contaminação, foi encontrada nos poços P01, P02, P07, P06 P12 e P09, os três últimos com valores acima de 100 mg/L na maioria das coletas.

7 BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, R. B., SANTIAGO, M. M. F., MENDES FILHO, J. e FRISCHKORN, H., A origem dos sais nas águas subterrâneas dos aquíferos costeiros no município de Caucaia – Ceará. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1º, **Anais...** Fortaleza, 31/07 a 4/08/2000.
- ANJOS, N.F.R. & BASTOS, C. A. M., Estudo das possibilidades hidrogeológicas de Feira de Santana – Bahia. SUDENE, Recife, PE, **Série Hidrogeológica** nº 20, 216p.,1968.
- BERNER, R. A., Principles of chemical sedimentology. McGraw-Hill, New York, 240pp. 1971.
- BILLINGS, G. K. & WILLIAMS, H. H., Distribution of Chlorine in Terrestrial Rocks – A discussion: **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 31, p. 449-469, 1967.
- BRAGA, A. de P. G.; PASSOS, C. A. B.; SOUZA, E. M. de, **Projeto Fortaleza**. Relatório Final. Recife: DNPM/CPRM. v. 1, 339p., 1967.
- BRANDÃO, R. L., Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Texto Explicativo. Escala 1:100.000. Projeto SINFOR. CPRM. Fortaleza, CE. 32p., 1995
- BRASIL SOBRINHO, T. P. de S., Estrutura geológica do Ceará; noções estratigráficas e geogenia. **Rev. Inst. Ceará**, Fortaleza. v. 55: p.159-175, 1941.
- BRICKER, O.P. & GARRELS, R.M., Mineralogic fators in natural water equilibria. In: **Principles and Application of water chemistry**. p.449-469.,1967
- CAMPBEL, M. D. “Walter Well Technology for Ground-Walter Development and Production in Igneous and Metamorphic Rocks” – International Seminar – Stockholm, Sweden.1977.

- CAVALCANTE, I. N.; REBOUÇAS, A. C. e SANTIAGO, M. M. F. Hidroquímica dos mantos de intemperismo e faturado. **Águas Subterrâneas** Ed. ABAS. São Paulo, v. 16, 18 p., 1993.
- COSTA, W.D., Hidrogeologia no cristalino, região de Monteiro-Sumé, PB. *In* CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 17, field trip itinerary: SUDENE, 23p., 1963. - Resumo hidrogeológico da região centro-sul da Paraíba: **Águas Subterrâneas**, p. 18-24, 1965.
- CRANDALL, R., Geographia, Geologia, suprimento d'água, transporte e açudagem nos Estados Orientais do Norte do Brasil, Parayba, Rio Grande do Norte e Ceará. Rio de Janeiro 1910.*
- CRUZ, W.B. & MELO, A.C.F., Zoneamento e salinização de águas subterrâneas no Nordeste do Brasil. Recife: SUDENE, PE. **Bol. Rec. Nat.**, v. 7, p.7-40, 1969
- EISENREIZH, S. J., Atmospheric pollutants in natural water. Chicago, Ann Arbour, (Sci. Pub.).1981.
- ERIKSSON, E., The Yearly Circulation of Chlorine and Sulfur in Nature: Meteorological, Geochemical and Pedological Implications-pts. 1 and 2: **Tellus**, v. 11, p. 375-403, and **Tellus**, v. 12, p. 63-109, 1960.
- FAURE, G. Principles and applications of inorganic geochemistry. Ed. Macmillan Publishing Company, New York, 628pp. 1992.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. Groundwater. Ed. Prentice – Hall. New Jersey. 604pp., 1979.
- FETH, J.H.; ROBERSON, C.E.; POLZER, W.L., Sources of constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada. **U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper 1535-I**, 70pp.,1964.

FISHER, D. W., Annual Variations in Chemical Composition of Atmospheric Precipitation, eastern North Carolina and southeastern Virginia: **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper** 1535-M, 21 p., 1968.

FRISCHKORN, H., SANTIAGO, M. F. e TORQUATO, J. R. Dados isotópicos e hidroquímica da porção oriental da Bacia Potiguar. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5º, **Anais ...** São Paulo, 09/88 p. 144-153, 1988.

FRISCHKORN, H.; TORQUATO, J. R. e SANTIAGO, M. F. Medidas isotópicas em aquífero profundos na região centro – leste do Piauí. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3º, **Anais ...** Fortaleza, p.42 – 51, 1984.

GIBBS, R.J., **The geochemistry of the amazon river basin.** (Thesis Ph.D San Diego), Univ. California, 96p., 1965.

GIBBS, R.J., Water Chemistry of the Amazon River. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v.36, p.1061-1066, 1972.

GOLDICH, S. S., A study in rock-weathering. *J. Geol.* 46, 17-58. 1938.

HELGESON, H.C., Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions, I-Thermodynamical relations. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v.32: p. 851-876, 1968.

HEM, J. D., Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of natural Water: **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper** 2254, Third edition. p. 89-120, 1985.

HOLANDA, J. L. R.; VASCONCELOS, S. M. S.; MAIA, L. P., Aspectos Hidrogeológicos da Região Costeira do Município de Caucaia – Ceará: *Revista de Geologia*, Vol. 16, nº 1, 7-18, 2003

HUANG, W.H. & KELLER, W.D., Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: simulated first-stage weathering of mineral surfaces. **Amer. Mineral.** v. 55: p. 2076 – 2094, 1970.

IPLANCE, Fundação Instituto de Planejamento do Ceará, 2000

JOHNS, W. D. & HUANG, W. H., Distribution of Chlorine in Terrestrial Rocks: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 31, p. 35-49, 1967.

JUNGE, C. E., Sulfur in the atmosphere. **J. Geophys. Res.** v. 65: p. 227-237, 1960.

KOPPEN, W., **Climatologia com um estudo de los climas de la Tierra.** Version de Hendrichs, P. R. México. Fondo de Cultura Econômica. 478 p., 1948.

LEAL, J. de M., Estudo geológico e hidrogeológico da bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Recife: SUDENE, Dept. Recursos Naturais, 23p. 1966.

LEGRAND, H. "Yield of Wells" – Div. Mineral Resources Bull, nº 75 – Paris. 1959.

LEPRUN, J.C.; SANTOS, R.D.; CERRI, C.C., Composição das águas de percolação de solos do Estado de Rondônia. **Geochim. Brasil**, v. 3, p. 23-31, 1989.

LIMA, C. H., **Dinâmica de salinização das águas subterrâneas na região Inhamuns** – Fortaleza: 83pp. Tese (Mestrado, UFC – CE), 1996.

MASON, B., **Principles of Geochemistry.** New York, Jonh Wiley & Sons, 276 p., 1952.

MOREIRA-NORDEMANN, L.M. & REBOUÇAS, A.C., Comportamento geoquímico de íons em águas de chuva. In: CONGRESSO BRASILEIRO ÁGUAS SUBTERRÂNEA, 4, Brasília, **Anais...** DF, p.221-236, 1986.

NASCIMENTO, D. A. do; GAVA, A.; PIRES, J. de L. e TEIXEIRA, W., Geologia. Mapeamento Regional. In: Projeto RADAMBRASIL. Folha S. A. 24 – Fortaleza. Rio de Janeiro. v. 21, p. 23-133, 1981.

OLIVEIRA NERI, T. F. de, **Correlações Morfo-Pedológicas no Município de Caucaia – Ceará**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Ceará, 1993.

PARISOT, E.H. & REBOUÇAS, A.C., Geoquímica de aquíferos do município de São Paulo. **Bol. Instituto de Geociências, USP**, v. 14, p. 55-66, 1983.

QUEIROZ, G. H. de, **Salinização em açudes no município de Tauá – CE. Fortaleza – CE**: 118pp. Tese (Mestrado, UFC – CE), 2000.

RENICK, B. C., Base Exchange in Ground Water by Silicates as Illustrated in Montana: U.S. **Geological Survey Water-Supply Paper 520-D**.p 53-72, 1925.

RIBEIRO, J. A.; FEITOSA, F. A. C.; OLIVEIRA, J. F.; SOUZA FILHO, O. A.; FEITOSA, E. C., Zonas (eixos) Condutivas em Rochas Cristalinas na Região de Irauçuba, Norte do Estado do Ceará, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas** n° 17 p.113, 2003.

SANTIAGO, M. M. F., **Mecanismo de salinização em região semi-árida. Estudo de açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará**. Tese (Doutoramento). Instituto de Geociência – USP. São Paulo, 176p., 1984.

SANTIAGO, M. M. F.; TEIXEIRA, Z. A.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J., As águas subterrâneas no cristalino co semi-árido no Ceará: o município de Tauá. CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 6° **Anais...**Mar Del Plata – Argentina, out., CD, p. 294, 2002.

SANTIAGO, M.F.; MENDES FILHO, J.; FRISCHKORN, H. e LIMA, C. H., Processos de salinização de água subterrânea no cristalino dos Inhamuns no Nordeste do Brasil. 4° Congresso

Latinoamericano de Hidrologia Subterrânea, Montevideo – Uruguai, ALHSUD, Anais...16 a 20 nov., Vol. 2, 1068 – 1078, 1998.

SANTIAGO, M.M.F. & RÄDE, H., Laboratório de carbono-14. preparação e análise de amostras. Fortaleza. **Texto Didático** (UFC), 2ª ed., 2000.

SCHOFF, S.L., Origin of Mineralised Water in Precambrian Rocks of the Upper Paraíba Basin, Paraíba, Brasil. **US. Geological Survey Water-Supply Paper** 1663-H, 36p., 1972.

SCHOELLER, H., **Les eaux souterraines**. Paris, Mason et Cie., 642p., 1962.

SILLEN, L. G. & MARTELL, A. E., Stability Constants of Metal – Ion Complexes: **Chemical Society Special Publication** 17, 754 p., 1964.

SILVA, A. B. da & SILVA, F. A. C., Inventário Hidrogeológico do Nordeste, Folha Nº 5 – Fortaleza – SO. Recife, SUCENE. 165p., Brasil. SUDENE. **Hidrogeologia**.27, 1970

SILVA, C. M. S. V.; SANTIAGO, M. F. L.; FEITOSA, F. A.C.; MEDEIROS, C. R. C. e VASCONCELOS, M. B., Mecanismo de recarga de poços no cristalino – Juá – Ceará. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIII **Anais ...**Belo Horizonte/MG, 20/11 – 02/12/1999.

STALLARD, R.F., **Major Element Geochemistry of the Amazon River System**. Tese (Ph.D) M.I.T.; Woods Hole, 366p., 1980.

STALLARD, R.F. & EDMUND, J. M., Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. **Jour. Geophys. Res.** v. 8, p. 9671-9688., 1983.

STUDART, T. M. de C., **Variações sazonais das vazões de fontes da Chapada do Araripe**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Ce. 67p., 1991.

SZIKSZAY, M. & TOLEDO-GROKE, M.C., Correlation of the chemical composition of water from the unsaturated zone with the mineralogy of a profile on the São Paulo Basin, Brasil. In: INTERN. SYMP. ON WATER/ROCK INTERACTION, 6, Malvern, U.K., 1989. **Proceedings**. Rotterdam, A.A. alkema. p. 669-672, 1989.

SZIKSZAY, M.; KIMMELMANN, A.A.; HIPOLITO, R.; FIGUEIRA, R. M.; SAMESHINA, H. R., Evolution of the chemical composition of water passing through the unsaturated zone to groundwater at an experimental site at the University of São Paulo, Brasil. **Jour. Hidrol.** 118(1/4): 175-190, 1990.

TAN, R.K., The release of silicon, aluminium and potassium during decomposition of soil minerals by humic acid. **Soil Sci.** 129: p. 5-11, 1980.

TAN, R.K., Degradation of soil minerals by organic acids. In: Huang, P.M. & M. Schnitzer (Eds), Interactions of soil minerals with natural organics and microbes Madison soil science society of America, p. 1-28, 1986.

TARDY, Y., Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mém. Serv. Carte géol. Alsace Lorraine, 31. 199p., 1969.

TARDY, Y., Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. **Chem. Geol.**, v. 7. p. 253 – 271, 1971.

TEXEIRA, J.A. & OLIVEIRA, S.P.B., Perfuração de poços tubulares e levantamento geológico. Petrolina, PE: **SUDENE**, 22p, 1962.

