CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO ISOTÓPICO E QUÍMICO DOS AQUIFÉROS DA REGIÃO DE FRECHEIRINHA-CEARÁ*

HAROLDO BARBOSA DE SIQUEIRA**, JOAQUIM RAUL TORQUATO***, MARLÚCIA FREITAS SANTIAGO** e HORST FRISCHKORN****

ABSTRACT The isotopic and chemical characteristics of the aquifers in the area of Frecheirinha (State of Ceará) have been analyzed. In an area of 3,000 square kilometers three aquifers have been identified: one in the east with an age of about 5,000 years; one in the West of 2,500 years; and a central one of about 1,000 years. Except for the region east of Apazível, the aquifers are of the unconfined type with decreasing age during the rainy season.

Oxygen-18 measurements show that during the rainy season the piezometric level rises until reaching the surface. Thus the flow-water is a mixture of rainwater with stored underground-water. During the dry season flow-water is exclusively phreatic.

Chemical analysis shows all waters (except for samples 1, 2 and 3) are potable. During the rainy season, however, the chemical composition is strongly affected by a washout of deposited aerosols and fertilizers in the Serra da Ibiapaba causing a substantial increase in sodium, chloride and sulfates.

INTRODUÇÃO O ciclo das águas no Polígono das Secas é um problema de capital importância para a subsistência da vida naquela região. Muitos têm sido os trabalhos dedicados ao assunto fazendo uso de métodos clássicos de prospecção e análise de águas.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de técnicas usando isótopos naturais tem permitido uma nova visão do problema dentro do que hoje se chama Hidrologia Isotópica.

O uso do radiocarbono na datação de águas subterrâneas foi idealizado por Münnich (1957), podendo os resultados obtidos ser utilizados, entre outros fins, para a determinação da velocidade e do sentido do movimento dessas águas. A constatação da importância da interação das águas subterrâneas com as rochas em sua vizinhança levou vários pesquisadores a idealizarem modelos para a correção das idades das águas determinadas pelo método de datação carbono-14, sendo de evidenciar os trabalhos de Pearson (1965), Tamers (1967) e Münnich e Vogel (1968).

A variação na composição dos isótopos estáveis, oxigênio-18 e deutério tem sido utilizada para caracterizar águas de diferentes origens, tais como águas de precipitação, superficiais e subterrâneas. As variações na composição dos isótopos estáveis nas águas naturais são também úteis no estudo de inter-relação entre lagos, rios e reservatórios subterrâneos, baseadas no fato de que águas sujeitas ao processo de evaporação apresentam composição isotópica diferente das que não sofreram este processo.

No nordeste brasileiro, entre outros, Gat (1968), Ferreira de Melo (1969), Salati (1971), Santiago (1972), Geyh e Kreysing (1973), Leal *et al.* (1974), Salati *et al.* (1974), Cabral (1978), Siqueira (1978), Gimena *et al.* (1978) e Santiago *et al.* (1981) utilizaram métodos isotópicos no estudo de seus aquíferos principais.

O presente trabalho utiliza resultados obtidos por meio de carbono-14, oxigênio-18 e análises químicas de águas da região de Frecheirinha, tendo em vista caracterizar:

- a) Os aquíferos e o sentido de fluxo das águas subterrâneas;
- b) A qualidade das águas dos diversos reservatórios existentes;
- c) A interação das águas com os principais corpos rochosos.

ASPECTOS GERAIS A região em estudo é limitada pelos meridianos 40°31' e 41°00' oeste e pelos paralelos 3°30' e 4°00' sul, e compreende os municípios de Frecheirinha, Coreaú, Mucambo, Pacujá, Tianguá e Ibiapina, abrangendo uma área de cerca de 3 000 quilômetros quadrados no noroeste do Estado do Ceará.

O clima na região apresenta uma estação chuvosa entre dezembro e abril, e uma estação seca no restante do ano. Da escarpa da Serra da Ibiapaba para oeste a precipitação anual atinge de 1 200 a 1 500 mm enquanto que para leste alcança, no máximo, de 1 000 a 1 200 mm.

Geologicamente, a área em estudo (Fig. 1) compreende parte da formação basal da Bacia do Parnaíba (Formação Serra Grande), os sedimentos e as rochas vulcânicas associados ao Grupo Jaibaras, os metassedimentos do Grupo Ubajara e uma região de rochas cristalinas formada pelos granitóides de Meruoca e Mucambo, e migmatitos heterogêneos do embasamento regional (DNPM, 1973).

METODOLOGIA Carbono-14 Considerando as condições aceitáveis para a determinação de carbono-14, as coletas só foram efetuadas em locais onde existiam poços profundos, portanto com grande probabilidade de se encontrarem isolados do CO₂ atmosférico.

A metodologia referente ao carbono-14 aqui descrita tem por base as comunicações científicas do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC), CCF-007

*Trabalho financiado por convênio entre o Banco do Nordeste do Brasil e a Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura dentro do projeto "Métodos isotópicos e químicos aplicados à resolução de problemas hidrológicos no Nordeste"

**Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 1262, Fortaleza, CE

***Departamento de Geociências da Universidade Federal do Ceará, Caixa Postal 1262, Fortaleza, CE

****Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, em cooperação com o KFA/Jülich, República Federal da Alemanha

Figura 1 - Esboço geológico mostrando os locais de coleta de água.

(Rade e Santiago, 1975) e CCF-011 (Santiago *et al.*, 1976), e o trabalho de Santiago *et al.* (1981).

No local de coleta determina-se, por meio de titulação, o teor de carbono como bicarbonato e dióxido de carbono contido na amostra de água. Com o equipamento disponível há necessidade de pelo menos 1 g de carbono para efetuar medidas de carbono-14 de maneira que na maioria dos casos é suficiente coletar 60 litros de água, em tambores de polietileno, aos quais se adiciona hidróxido de bário.

A preparação de amostras (Fig. 2), de modo a determinar seu teor em carbono-14, é realizada em três etapas. Na primeira, obtém-se dióxido de carbono pela reação do car-

Figura 2 - Linha de preparação de amostras para análise de carbono-14

bonato de bário obtido no campo, com ácido clorídrico. A segunda consiste em se obter carbureto de lítio pela reação do CO₂ obtido na primeira etapa com lítio aquecido a 600 °C. Na terceira, faz-se reagir o carbureto de lítio com "água velha" (água sem trítio) obtendo-se acetileno, que será usado no contador proporcional para a determinação do C¹⁴ na amostra.

O sistema de contagem utilizado neste trabalho, dois contadores proporcionais a gás conectados a um circuito de anticoincidência, tem as seguintes características:

Contagem líquida do padrão = $7,142 \pm 0,217$ cpm (0,95 da atividade do ácido oxálico)

Ruído de fundo = $2,387 \pm 0,067$ cpm (medida utilizando acetileno proveniente de mármore antigo)

Eficiência do contador = 74,5%

Diferença de potencial média de trabalho = 3 800 V

Tempo total de contagem = 900 min

Para a determinação de idades, utilizamos a equação:

$$t = \frac{T}{\ln 2} \ln \frac{0,95 (N_P - N_F)}{N_A - N_F}$$

onde N_P , N_F e N_A são as taxas de contagens do padrão, fundo e amostra, respectivamente, e $T = 5\,568$ anos* é a meia-vida do C-14.

*Meia-vida convencional (valor real: 5 730 anos)

O desvio-padrão na medida da idade da amostra é dado por:

$$\sigma_t = 8\,036 \left\{ \left[\frac{\sigma_A}{N_A - N_F} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_P}{N_P - N_F} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_F}{N_A - N_F} \right]^2 \cdot \left[\frac{N_P - N_A}{N_P - N_F} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

onde

$$\sigma_A = \left[\frac{N_A}{\tau} \right]^{1/2}, \sigma_P = \left[\frac{N_P}{\tau} \right]^{1/2} \text{ e } \sigma_F = \left[\frac{N_F}{\tau} \right]^{1/2}$$

são os desvios padrões referentes às medidas da amostra, padrão e ruído de fundo, respectivamente, e τ é o tempo total de contagem.

Razão O^{18}/O^{16} A metodologia referente à determinação da razão O^{18}/O^{16} , baseia-se no método proposto por Epstein e Mayeda (1953). O equipamento utilizado é um espectrômetro de massa AEI modelo MS20.

Hidroquímica A interação entre a água subterrânea e o ambiente geológico não permite estabelecer conceitos gerais utilizáveis em qualquer situação, mas são necessários métodos empíricos no relacionamento entre o caráter químico da água e o ambiente geológico (Domenico, 1972).

Os constituintes em solução na água subterrânea podem ser visualizados como um sistema químico com cátions e ânions em equilíbrio. Mediante métodos gráficos para o estudo desse sistema observa-se que as concentrações dos cátions cálcio, magnésio e sódio, e dos ânions bicarbonato, sulfato e cloro permitem correlacionar os vários tipos de água.

Os cátions cálcio e magnésio foram determinados por potenciométrica, pela titulação com uma solução EGTA 0,01M e uma solução EDTA 0,01M, respectivamente. Sódio e potássio foram determinados por fotometria de chama, e o sulfato por nefelometria. Pela titulação potenciométrica com uma solução 0,02N de nitrato de prata e um eletrodo de prata fez-se a determinação de cloreto. O ânion nitrato foi determinado pelo método Brucina e o bicarbonato por um potenciômetro Metrohm E 353 (Pohling e Cavalcante, 1981).

RESULTADOS E DISCUSSÕES Para o estudo dos aquíferos da região de Frecheirinha foram efetuadas duas coletas: uma durante a estação das chuvas de janeiro a maio de 1978 e outra no período seco, em julho do mesmo ano.

Os resultados obtidos pelas medidas de carbono-14 referentes à coleta realizada em janeiro, apresentados nas Tabs. 1 e 2, sugerem a existência de três aquíferos distintos na região em estudo: um na parte leste (amostras 1 e 3) locais de ocorrência do Grupo Jaibaras, com idade próxima de 5 000 anos; outro na região oeste, localizado na Formação Serra Grande, com idade em torno de 2 500 anos (amostras 4, 5 e 6); e um outro com idade de cerca de 1 000 anos (amostras 8 e 9) na Formação Frecheirinha, na parte nordeste da região do Grupo Ubajara.

A coleta realizada em julho, cujos resultados se encontram igualmente na Tab. 2, evidenciou a existência de um fluxo de base possivelmente com água da Serra da Ibiapaba para leste com consideráveis misturas provenientes das precipitações recentes, o que explicaria o fato de as amostras coletadas nesse período serem mais jovens. No

Tabela 1 –

N.º no mapa	Localidade	Município	Coleta Janeiro a maio (1978)		Coleta Julho (1978)		Tipo
			N.º geral RG*	N.º C-14 FZ*	N.º geral RG*	N.º C-14 FZ*	
1	Fazenda Cipaúba	Aprazível	335	69	497	108	Poço tubular
2	Lavanderia	Coreaú	336	70	499	105	Poço tubular
3	Posto Leão	Aprazível	341	71	498	104	Poço tubular
4	Ibiapina	Sede	339	73	503	103	Poço tubular
5	P. M. Ibiapaba	Tianguá	334	75	496	111	Poço tubular
6	P. F. Anastácio	Frecheirinha	333	72	495	107	Poço tubular
7	CAGECE	Tianguá	340	74	503	102	Pç. Amazonas
8	CAGECE	Frecheirinha	337	82	600	101	Pç. Amazonas
9	Olho-d'água	Frecheirinha	339	—	501	—	Fonte
10	Fonte Alto da Serra	Tianguá	349	—	503	—	Fonte
11	Fonte H. Cascatinha	Tianguá	350	—	502	—	Fonte
12	Rio Jaibaras	Arariús	343	—	505	—	Rio
13	Rio Ubajara/Vaca Seca	Frecheirinha	345	—	507	—	Rio
14	Rio Ubajara/CAGECE	Frecheirinha	344	—	506	—	Rio
15	Aç. Jaibaras/Barragem	Aprazível	347	—	500	—	Açude
16	Rio Coreaú	Coreaú	342	—	504	—	Rio
17	Rc. P. da Neblina	Ubajara	352	—	514	—	Riacho
18	Riacho Pejoaba	Ibiapina	353	—	516	—	Riacho
19	Riacho Caiçaras	Frecheirinha	—	—	515	—	Riacho
20	Cach. B. Morto	Ubajara	—	—	517	—	Cachoeira
21	Aç. Mucambo	Mucambo	346	—	519	—	Açude
22	Aç. H. Florestal	Sobral	346	—	511	—	Açude

*RG – Número do registro geral do laboratório

*FZ – Número da amostra para medida de C-14

Tabela 2 –

N.º no mapa	Janeiro a maio (1978)		Julho (1978)	
	% Mod.	Idade (anos)	% Mod.	Idade (anos)
1	55,4 ± 0,6	4 745 ± 93	55,6 ± 0,9	4 579 ± 127
2	83,6 ± 1,4	1 437 ± 131	80,1 ± 1,8	1 779 ± 76
3	53,9 ± 0,7	4 953 ± 109	112,0 ± 1,6	Moderna
4	72,1 ± 1,0	2 624 ± 113	91,6 ± 2,1	703 ± 184
5	75,5 ± 1,0	2 256 ± 106	87,2 ± 1,1	Moderna
6	71,5 ± 0,9	2 697 ± 96	122,1 ± 1,5	1 101 ± 100
7	Perdida	Perdida	114,5 ± 1,4	Moderna
8	88,2 ± 1,3	1 013 ± 116	Perdida	Perdida
9	88,4 ± 0,8	990 ± 75	93,5 ± 1,3	541 ± 110

entanto, as amostras 1 e 2 não se mostraram afetadas por este fluxo de água, provavelmente devido às seguintes causas:

a) A amostra 1 está localizada a leste do sistema de falhas que delimitam o semigraben de Jaibaras na região de Aprazível, sendo admissível pensar que estas funcionem como uma barragem natural dificultando o acesso das águas, as quais seguiriam de preferência na direção dessas falhas e só muito lentamente se deslocariam para onde está localizada a amostra citada.

b) A amostra 2, localizada em Coreaú, é praticamente isolada pelos diques de rochas existentes na Formação Coreaú, a oeste da cidade do mesmo nome.

Os resultados das medidas da razão O^{18}/O^{16} de amostras de águas subterrâneas e superficiais da região em estudo estão indicados na Tab. 3.

Tabela 3 –

N.º no mapa	$\delta^{18}O$ (SMOW) ‰		
	Janeiro	Maio	Julho
1	-4,1	—	3,8
2	-3,8	-2,6	-2,5
3	-2,6	-3,6	-3,9
4	-6,0	-4,0	-4,7
5	-4,1	-4,9	-4,6
6	-3,6	—	-4,2
7	-4,1	-4,4	-4,4
8	—	-3,3	-3,7
9	—	-0,7	-3,6
10	—	-1,3	-4,8
11	—	-1,9	-4,0
12	—	-1,0	-1,8
13	—	-1,9	-3,4
14	—	-3,3	-3,9
15	—	—	-3,1
16	—	-2,8	-1,8
17	—	-4,7	-4,6
18	—	—	-4,5
19	—	-3,7	-2,8
20	—	—	-4,4
21	—	-2,6	+1,4

As coletas de águas de poços tubulares e amazonas (N.º 1-8), realizadas em janeiro, maio e julho, apresentam, respectivamente, nos citados meses, valores médios (relativamente ao padrão SMOW) iguais a $-4,0 \pm 0,4\text{‰}$; $-3,8 \pm 0,3\text{‰}$; e $-4,0 \pm 0,3\text{‰}$. A variação, sendo peque-

na, confirma a procedência dessas amostras como de aquíferos confinados, não sofrendo grande influência de águas superficiais (a constância da concentração total dos íons medida pela condutividade indica também este fato). Agrupando os poços de acordo com a localização (Fig. 1) — e juntando assim 1, 2 e 3 (Aprazível, Coreaú), 6 e 8 (Frecheirinha), e 4, 5 e 7 (Ibiapina, Tianguá) — obtêm-se valores médios de $-3,36 \pm 0,23\text{‰}$; $-3,70 \pm 0,18\text{‰}$, Frecheirinha; e $-4,58 \pm 0,20\text{‰}$; valores estes que refletem uma combinação entre efeito continental e efeito de altura. É interessante constatar que a condutividade mostra uma tendência no mesmo sentido (Aprazível, Coreaú: 1 500-4 200 $\mu\text{S/cm}$; Frecheirinha: 600-1 010 $\mu\text{S/cm}$; e Ibiapina, Tianguá: 70-400 $\mu\text{S/cm}$) o que faz pensar em efeitos do mesmo tipo para a salinização.

As três fontes em Frecheirinha e Tianguá mostram mudanças bastante grandes entre maio e julho. O valor médio muda de $-1,3 \pm 0,6\text{‰}$ para $-4,1 \pm 0,6\text{‰}$. A explicação deve ser que são alimentadas em maio essencialmente por águas superficiais que sofreram evaporação. Nos meses seguintes, secas, a contribuição desses cede dando lugar a águas profundas chegando assim aos valores na razão O^{18}/O^{16} característicos para estas águas (veja n.ºs 4, 5, 6, 7). Esta interpretação é reforçada pelo aumento da condutividade no mesmo período chegando a atingir valores da água subterrânea.

Os rios na área (12, 13 e 14) mostram a mesma evolução no valor de $\delta^{18}O$ e na condutividade, indicando assim a influência substancial da água profunda em sua alimentação na época seca.

Os baixos valores dos riachos (17 e 18) e da Cachoeira (20) sugerem a mesma conclusão.

Foram realizadas análises químicas em todas as amostras coletadas e os resultados são apresentados nas Tabs. 4 e 5.

Por uma questão de simplificação, os resultados foram agrupados por modos de jazida das águas e por suas ocorrências dentro das formações geológicas.

As amostras coletadas em poços das formações Serra Grande (4, 5 e 7), Frecheirinha (6 e 8), Coreaú (2) e Pacujá (1 e 3) apresentam uma evolução (Tab. 5) causada pelo carregamento de produtos de adubação do solo e de inseticidas e pela lavagem dos aerossóis de sais de cloro e sódio provenientes da água do mar (Rebouças, 1973).

Na Formação Serra Grande observa-se também a influência da presença de siltitos e folhelhos ou de argilitos variegados nas paredes do aquífero; na Formação Frecheirinha, a influência da dissolução dos calcários magnesianos ali ocorrentes; e, nas formações Coreaú e Pacujá, a influência da dissolução de calcários propiciando a formação de bicarbonato.

As águas superficiais nas formações Serra Grande (10, 11, 17 e 18), Frecheirinha (9, 13 e 14), Coreaú (16) e Pacujá (12 e 15) apresentam comportamento semelhante ao apresentado pelas amostras do lençol subterrâneo. Deve-se notar, porém, uma interdependência entre o aquífero Frecheirinha, no local 9, e as águas do Rio Ubajara (13 e 14) devido à percolação através das fraturas que afetam as rochas naquele local.

De acordo com os limites internacionalmente* adotados para a classificação de águas potáveis, indicados na Tab. 4, verificou-se:

*Recomendados pela U.S. Public Health Authority

Tabela 4 —

N.º no mapa	Concentrações (ppm)															
	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻		NO ₃ ⁻	
	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho	Jan/maio	Julho
01	233,26	59,32	87,03	30,00	80,00	290,00	6,50	150,00	591,78	476,43	180,00	44,20	124,46	366,00	16,00	13,80
02	153,60	24,80	34,43	5,84	100,00	230,00	4,25	80,00	344,06	263,68	54,08	0,00	125,00	408,70	125,00	110,35
03	338,28	96,60	142,46	85,40	260,00	520,00	16,00	150,00	1 049,34	978,96	245,00	24,00	336,00	408,70	56,00	40,00
04	5,45	1,50	0,10	0,50	10,00	20,00	0,45	3,90	14,47	18,30	3,00	6,70	14,40	13,50	5,00	9,00
05	4,30	1,60	7,24	2,00	18,00	23,00	1,50	19,50	52,28	43,06	0,00	0,00	4,40	32,00	6,00	6,65
06	111,58	40,00	18,09	38,00	54,00	50,00	1,00	30,00	171,68	125,30	0,00	190,00	350,14	36,60	6,00	3,50
07	14,80	22,00	7,80	10,00	50,00	53,00	17,00	17,00	84,13	70,52	3,00	96,00	7,32	0,00	40,00	9,50
08	98,12	39,70	11,96	27,20	36,00	38,00	1,00	5,00	86,01	70,50	3,00	48,00	312,32	173,30	3,00	12,40
09	103,00	39,70	11,59	27,20	33,50	38,00	1,25	5,00	111,48	70,50	140,00	48,00	82,96	173,30	2,66	12,40
10	3,09	59,30	1,22	45,00	3,00	40,00	0,50	5,00	8,95	95,44	1,00	45,00	6,10	298,20	2,20	2,22
11	5,77	5,00	0,56	1,20	5,00	10,00	1,00	2,00	9,63	11,86	3,00	25,00	8,54	0,00	8,00	2,66
12	5,77	10,00	2,46	2,70	9,00	7,00	2,50	2,90	19,27	33,90	0,00	0,00	21,96	4,88	6,64	1,00
13	27,70	5,00	5,83	2,70	19,50	23,00	1,25	3,00	40,66	11,78	1,00	24,00	97,60	48,80	2,20	1,00
14	28,86	32,00	6,81	20,00	19,00	23,00	1,25	5,00	41,29	65,26	3,20	0,00	102,48	145,18	3,50	1,20
15	7,70	31,26	4,16	17,00	17,50	23,00	2,00	3,00	26,84	49,66	7,50	0,00	36,60	161,20	1,00	2,00
16	20,76	1,50	7,17	1,50	17,50	10,00	2,50	2,50	51,61	13,05	4,00	0,00	69,54	10,00	4,00	4,45
17	2,32	2,00	1,46	0,60	5,00	23,00	1,00	3,00	9,63	18,20	2,00	27,00	7,56	4,90	3,50	2,22
18	3,45	5,00	1,24	7,25	3,00	20,00	1,00	2,00	6,26	27,86	6,00	0,00	7,32	53,68	3,10	1,00
19	—	32,50	—	15,20	—	30,00	—	25,00	—	96,62	—	40,00	—	36,60	—	2,22
20	—	5,00	—	2,00	—	8,00	—	2,00	—	9,22	—	19,20	—	7,20	—	3,54
21	18,08	20,00	5,47	15,00	39,00	40,00	5,50	6,00	83,95	70,50	1,00	70,00	46,36	39,20	1,80	2,20
22	—	5,00	—	6,30	—	6,00	—	3,00	—	11,66	—	25,00	—	9,80	—	3,54
Máx. Perm.	150-200		125		200		—		250		250		500		20	

Tabela 5 —

N.º no mapa	Coleta Janeiro a maio (1978)	Coleta Julho (1978)
1	Mista-cloretada	Sódica-clorobicarbonatada
2	Cálcica sódica-cloretada	Sódica-clorobicarbonatada
3	Cálcica sódica-cloretada	Sódica-cloretada
4	Sódica-clorobicarbonatada	Sódica-clorobicarbonatada
5	Sódica-cloretada	Sódica-cloretada
6	Cálcica-bicarbonatada	Mista-cloro-sulfatada
7	Sódica-cloretada	Sódica-cloro-sulfatada
8	Cálcica-bicarbonatada	Mista-clorobicarbonatada
9	Cálcica-mista	Mista-bicarbonatada
10	Cálcica-sódica-cloretada	Sódica-sulfatada
11	Cálcica-sódica-cloretada	Cálcica-sódica-sulfatada
12	Cálcica-sódica-clorobicarbo.	Sódica-sulfo-bicarbonatada
13	Cálcica-sódica-bicarbonatada	Mista-bicarbonatada
14	Cálcica-sódica-bicarbonatada	Mista-bicarbonatada
15	Sódica-cloro-bicarbonatada	Sódica-mista
16	Cálcica-sódica-clorobicarbo.	Cálcica-sódica-mista
17	Sódica-cloro-bicarbonatada	Mista-mista
18	Cálcica-sódica-mista	Sódica-cloro-sulfatada
19	—	Sódica-bicarbonatada
20	—	Sódica-cloro-sulfatada
21	Cálcica-sódica-cloretada	Cálcica-sódica-mista
22	—	Sódica-magnesiânica-sulfatada

a) As amostras 1 e 3 de poços na Formação Pacujá apresentaram na coleta de janeiro a maio, excessos de cálcio, magnésio, sódio, cloro e nitrato, e na coleta de julho, excessos de sódio, cloro e nitrato.

b) A amostra 2 na Formação Coreau apresentou excesso de sódio na coleta de janeiro a maio e excessos de cloro e nitrato em ambas coletas.

De acordo com a classificação americana para águas de irrigação, indicada na Fig. 3, as águas coletadas na região podem ser classificadas em dois grupos principais. Um que mantém suas características durante todas as épocas de

Figura 3 — Classificação das águas para irrigação

coleta e outro que é sujeito a mudanças na condutividade ou na razão de adsorção de sódio.

Do grupo que mantém suas características podemos observar que subentende três subgrupos: um C_1-S_1 , com oito amostras (4, 5, 10, 11, 12, 15, 17 e 18), situa-se em toda a Serra da Ibiapaba e numa faixa que se estende ao longo do Rio Jaibaras, sendo formado por águas de salinidade fraca e baixo teor de sódio, podendo ser utilizados para irrigação da maioria das culturas em vista do fraco risco de salinização do solo. Outro subgrupo C_2-S_1 , com duas amostras (7 e 8), está localizado na Serra da Ibiapaba e na região de Frecheirinha, sendo águas de salinidade média e baixo teor de sódio, podendo ser utilizadas se o processo de lixiviação do solo for ameno. Finalmente, o último subgrupo C_3-S_1 , contém uma única amostra (6), ocorrente na zona central da região estudada (Frecheirinha-Aprazível) com alta salinidade e baixo teor de sódio, sendo recomendadas para culturas com alta tolerância salina e solos bem drenados.

O outro grupo, aquele que apresenta mudanças em suas características de acordo com a época de coleta, revela variações interessantes. As águas de poços (amostras 1, 2 e 3) mantêm, cada uma, praticamente uma mesma condutividade variando a razão de adsorção de sódio enquanto as águas superficiais (amostras 9, 13, 14 e 15) mantêm, cada uma, praticamente a razão de adsorção de sódio e variam a condutividade (provavelmente devido à influência das águas de precipitação).

Durante as duas épocas de coleta, só as amostras 1, 2 e 3 não são recomendadas para irrigação pois evoluem, respectivamente, de C_3-S_1 para C_4-S_3 enquanto as amostras 13, 14 e 15 evoluem de C_1-S_1 para C_2-S_1 , e a amostra 9, de C_2-S_1 para C_3-S_1 .

CONCLUSÕES Do exposto anteriormente, podemos tirar as seguintes conclusões:

1) Na região em estudo são distintos três aquíferos profundos: um com idade aparente de 5 000 anos situado na área de ocorrência do Grupo Jaibaras, outro na Formação Serra Grande com idade aparente de 2 500 anos e outro com idade aparente de 1 000 anos que se localiza na Formação Frecheirinha.

2) As condições geológicas são um fator importante na distribuição dos aquíferos citados, nomeadamente os diques que cortam os grupos Ubajara e Jaibaras e o sistema de falhas situado a leste de Aprazível.

3) Os resultados sugerem que a alimentação das águas superficiais seja feita com larga contribuição do lençol subterrâneo local na época seca.

4) As águas subterrâneas apresentam um valor médio de $\delta^{18}O$ entre $-3,4\text{‰}$ e $-4,6\text{‰}$ dependendo da distância do mar e da altitude.

5) De uma maneira geral, as águas localizadas na região apresentam um bom nível de potabilidade. A qualidade das águas superficiais satisfaz aos padrões internacionais enquanto nas águas subterrâneas só os poços localizados em Coreaú (amostra 2) e Aprazível (amostras 1 e 3) estão fora desses padrões. Verifica-se que a qualidade das águas melhora durante as épocas de chuva mas não o suficiente para que as amostras 1, 2 e 3 possam ser consideradas potáveis.

6) O principal fator de poluição das águas da região é a contaminação por matéria orgânica ocorrente em locais povoados. De maneira ainda amena, em relação aos padrões internacionais estabelecidos, as águas superficiais e subterrâneas de alguns locais apresentam-se sob a influência de sulfatos em sua maioria oriundos de fertilizantes e inseticidas utilizados em culturas desenvolvidas na Serra da Ibiapaba, sendo possível que uma pequena parte seja o resultado da dissolução do ácido sulfídrico retido nos calcários da Formação Frecheirinha.

7) A influência dos aerossóis atmosféricos naturais contribuem para a salinização das águas da região na época invernal. Estes aerossóis são ricos em sódio e cloro, principalmente em sódio, conforme revelam as análises químicas.

8) A qualidade das águas para irrigação pode ser considerada boa, com exceção de algumas áreas isoladas onde recomenda-se um estudo mais detalhado de salinidade e sua relação com o tipo de solo.

Agradecimentos Este estudo foi possível graças ao financiamento do Banco do Nordeste do Brasil, entidade que tem demonstrado sempre o maior interesse na resolução dos problemas que afetam o Nordeste, especialmente os relacionados com suas secas periódicas.

Aqueles que, de uma maneira ou outra, auxiliaram na execução deste trabalho, os nossos melhores agradecimentos. Não podemos, no entanto, deixar de citar nominalmente Rolf Pohling, Maria José Cavalcante, Koji Kawashita, Joaquim Haroldo Ponte e Cleuton Freire.

BIBLIOGRAFIA

- CABRAL, F.C.F. — 1978 — Uso dos Isótopos Naturais do Carbono no Estudo das Águas Subterrâneas do Aquífero Calcário Bambuí, Bahia. Tese de Mestrado. UFBA. 73 pp.
- DOMENICO, P.A. — 1972 — Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill Book Company. 405 pp.
- DNPM — 1973 — Geologia da Bacia Jaibaras: Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. Ministério das Minas e Energia. *Geologia básica* n.º 11: 106 pp.
- EPSTEIN, S. e MAYEDA, T. — 1953 — Variation of O^{18} content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 4: 213-224.
- FERREIRA DE MELO, F.A., CUNHA, R.A., GAT, J.R. e MAZOR, E. — 1969 — Preliminary Isotope Survey of Water Sources in Northeastern Brazil (inédito).
- GAT, J.R. — 1968 — Potential Applications of Isotope and Geochemical Techniques to the Hydrological Problems of North-Eastern Brazil. Report to Atomic Energy Commission and SUDENE.

- GEYH, M.A. e KREYSING, K. — 1973 — Sobre a idade das águas subterrâneas do Polígono das Secas do Nordeste brasileiro. *Rev. Bras. Geoc.* 3: 53-62.
- GIMENA, E.C., CRUZ, W.B., SILVA, A.B., JARDIM, F.G. e PEIXOTO, C.A.M. — 1978 — Idades das águas subterrâneas no aquífero Beberibe na região costeira de Olinda-Goiana, Estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Geoc.* 8: 103-112.
- LEAL, J.M., SALATI, E., MENDES CAMPOS, M. e MATSUI, E. — 1974 — Caracterização de águas do Nordeste brasileiro com isótopos ambientais. *Sudene. Hidrogeologia* 47.
- MÜNNICH, K.O. — 1957 — Messungen des C^{14} — Gehaltes von Hartem Grundwasser. *Naturwissenschaften* 34: 32-33.
- MÜNNICH, K.O. e VOGEL, J.C. — 1968 — C^{14} Age Determination of Deep Ground-Waters. Publ. N.º 52 of the I.A.S.H., Commission of Subterranean Waters: 537-541.

- PEARSON, F.J. — 1965 — Use of C^{13}/C^{12} Ratios to Correct Radiocarbon Ages of Materials Initially Diluted by Limestone. Proc. Conf. on Radiocarbon and Tritium Dating, Pullman, 357 pp.
- POHLING, R. e CAVALCANTE, M.J.H. — 1981 — Manual de técnicas de análises de águas subterrâneas. *Estudos Hidrológicos do Nordeste*, BNB — Série Monografias, 3: 101-128.
- RÄDE, H. e SANTIAGO, M. — 1975 — H-3 e C-14 no Ciclo Hidrológico. Ocorrência, Medida e Aplicação. Comunicações Científicas, UFC, CCF-007, 30 pp.
- REBOUÇAS, A.C. — 1973 — Le Problème de l'Eau dans la Zone Semi-Aride du Brésil. Tese Pour Docteur des Sciences Naturelles. Université Louis Pauster, Strasbourg, 291 pp.
- SALATI, E., GUSMÃO, G.A., MATSUI, E. e CERVellini, A. — 1971 — Estudo Preliminar das Concentrações de O^{18} e D em Águas do Nordeste Brasileiro. CENA, Boletim Científico, BC-002, 30 pp.
- SALATI, E., LEAL, J.M. e MENDES CAMPOS, M. — 1974 — Environmental Isotopes Used in a Hydrogeological Study of Northeastern Brazil. *Isotope Hydrology IAEA — SM-182/13*: 259-283.
- SANTIAGO, M.F. — 1972 — Fracionamento Isotópico da Água durante a Evaporação. Tese de Mestrado, 66 pp.
- SANTIAGO, M., RÄDE, H. e GULICH, E. — 1976 — Laboratório de C^{14} e H^3 . Preparação e Análise de Amostras, Comunicações Científicas, UFC, CCF-011, 32 pp.
- SANTIAGO, M.F., RÄDE, H., TORQUATO, J.R. e GARRETT, L. — 1981 — Idade e Movimento das Águas Subterrâneas na Região de Picos, Piauí (Bacia do Parnaíba), e sua evolução Hidroquímica. In: *Estudos Hidrológicos do Nordeste*, BNB — Série Monografias, 3: 73-100.
- SIQUEIRA, A.F. — 1978 — O Uso dos Dados Químicos e Isotópicos como Indicadores de Origem e Sais Dissolvidos das Águas Subterrâneas do Aquífero Calcário Bambuí, Irecê, Bahia. Tese de Mestrado, UFBA, 86 pp.
- TAMERS, M.A. — 1967 — Radiocarbon Ages of Groundwater in a Arid Zone Unconfined Aquifers. *Geophysical Monograph*, n.º 11, American Geophysical Union, 143-152.

Recebido em 19 de fevereiro de 1982