

# ESTUDO DA CONEXÃO HIDRÁULICA DOS AQUIFEROS RIO DA BATATEIRA E MISSÃO VELHA POR ANÁLISE ISOTÓPICA E DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

*Luiz Alberto R. Mendonça<sup>1</sup>, Horst Frischkorn<sup>1</sup>,  
Marlúcia Freitas Santiago<sup>2</sup> e Josué Mendes Filho<sup>2</sup>*

## Resumo

*A cidade de Juazeiro do Norte é abastecida pela CAGECE, basicamente por uma bateria de 17 poços tubulares na área Riacho do Macacos/Lagoa Seca. Com a finalidade de entender o funcionamento dos aquíferos regionais foi feita a sinopse dos 17 perfis geológicos de perfuração para identificar a estratificação da área e foram interpretadas as medidas de condutividade elétrica e dos isótopos  $^{18}\text{O}$  e  $^{14}\text{C}$  das águas dos poços. Com este estudo, foi possível entender a dinâmica do sistema aquífero, identificar conexões hidráulicas entre os aquíferos Rio da Batateira e Missão Velha e determinar os percentuais de contribuição de cada aquífero.*

## Abstract

*A battery of 17 drilled wells in the area Riacho dos Macacos/Lagoa Seca, operated by CAGECE, constitutes the base for public water supply in the town of Juazeiro do Norte. In order to understand the functioning of the regional aquifers we performed the synopsis of the seventeen individual drilling profiles for a better visualization of the stratigraphy of the area of the battery and the interpretation of electrical conductivity and isotopic analyses of  $^{18}\text{O}$  and  $^{14}\text{C}$  for the waters of the wells in terms of a two component mixing. In such case, using the listed methods understand hydrodynamics and hydraulic connections between the aquifers Rio da Batateira and Missão Velha could be proved.*

## Introdução

A região do Cariri, localizada no extremo sul do Estado do Ceará, região Nordeste do Brasil, possui a maior e mais importante bacia sedimentar do Ceará. Nesta região, os recursos hídricos subterrâneos são a mais importante fonte de água potável para abastecimento público e privado, bem como para diversas atividades, tais como práticas agrícolas, industriais e lazer.

A cidade de Juazeiro do Norte, localizada no Vale do Cariri, no sopé norte da Chapada do Araripe, possui um sistema de captação de água, implantado e operado pela CAGECE, a partir de uma bateria de 17 poços tubulares, localizada na área Riacho dos Macacos/Lagoa Seca, construídos em duas etapas pela firma CORNER. A produção máxima atual da bateria, segundo a CAGECE, é de 2592 m<sup>3</sup>/h com os poços operando 24 horas/dia. Os filtros dos poços de captação penetram somente no aquífero superior, o Rio da Batateira, com o poço JZ-06 sendo o mais profundo com 200 m.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Caixa Postal 6018, CEP 60451-970. Fortaleza. CE. Tel.: (085)288.9623, Fax: (085)288.9627 e E-Mail cariri@ufc.br.

<sup>2</sup> Departamento de Física da UFC, Tel.: (085)288.9913 e Fax: (085)287.4138.

O sistema aquífero estudado é muito complexo devido a um tectonismo intenso no Vale do Cariri. Por isto, a avaliação química e isotópica das águas tem que ser definida através do seguinte procedimento: (i) definir a estratigrafia em sub-superfície através de perfis litológicos correspondente à bateria de poços, para visualizar melhor o comportamento das formações através do conjunto de sondagens, podendo identificar falhas e “percursos preferenciais” do fluxo orientado por lentes de argila e folhelho; (ii) comparar o resultado da análise estratigráfica com os dados de condutividade elétrica da água, de oxigênio-18 e de carbono-14, para melhor avaliar as conexões hidráulicas através do efeito de mistura das águas nas proximidades destas conexões (usando resultados obtidos pelo Grupo de Física Isotópica da UFC).

## Avaliação dos Dados de Condutividade Elétrica e Isotópicos

### Condutividade elétrica

Os valores da condutividade elétrica dos poços variam de  $162\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $522\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabela 1). O valor mais baixo é do poço JZ-17 mais raso com 83 m e os mais altos, dos poços mais profundos JZ-06 e JZ-08 com 200 m e 190 m, respectivamente (CEARÁ, 1988).

Observa-se que nas proximidades da provável conexão hidráulica entre o aquífero superior Rio da Batateira e o inferior Missão Velha (Poço JZ-06 na Figura 1) a condutividade elétrica da água no aquífero superior aumenta.

**Tabela 1** – Dados de Caracterização dos poços profundos. C.E. – Condutividade elétrica.

Fonte: SANTIAGO et al., 1994.

POÇO	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	pMC
JZ-01	258	-3,4	-
JZ-02	168	-3,1	$74,6 \pm 0,9$
JZ-03	243	-3,2	$92,0 \pm 0,7$
JZ-04	291	-3,4	$78,2 \pm 0,5$
JZ-05	380	-3,6	$48,09 \pm 0,4$
JZ-06	447	-3,6	-
JZ-07	281	-3,2	$75,1 \pm 0,4$
JZ-08	522	-3,9	$35,4 \pm 0,6$
JZ-14	299	-3,5	$61,0 \pm 0,5$
JZ-16	182	-3,0	$88,7 \pm 0,6$
JZ-17	162	-3,1	$80,5 \pm 0,6$

### Oxigênio-18

A razão isotópica  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  (número de átomos de oxigênio-18 / número de átomos de oxigênio-16) nas precipitações é função de vários fatores. Decresce com a distância à costa, com o aumento da altitude, com a diminuição da temperatura e com a quantidade de chuva. Além

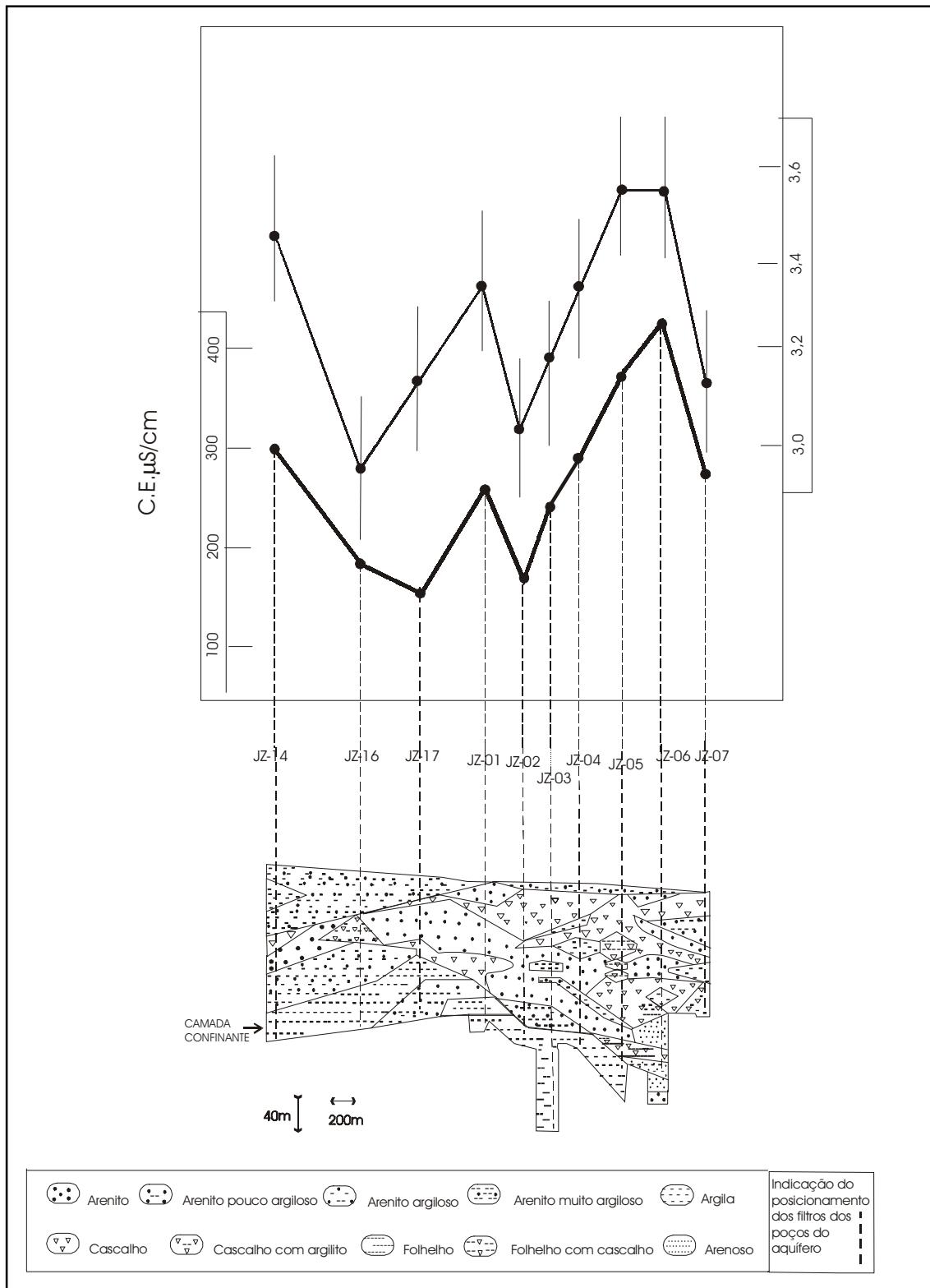


Figura 1 – Perfil estratigráfico associado aos resultados da análise da água.

disso, podem ser observadas variações sazonais e dependência da latitude geográfica. Em água superficial, sujeita à evaporação,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  aumenta. Assim, águas superficiais e pluviais são marcadas, por esta razão, no tempo e no espaço. Em aquíferos profundos a razão  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  é conservada, por isso, sua análise permite a obtenção de informações valiosas sobre a origem e a história da água (MOOK, 1972).

Neste trabalho, a razão isotópica é usada para caracterizar as águas dos aquíferos superiores e inferiores e para detectar mistura destas.

As medidas de  $^{18}\text{O}$  são feitas em relação ao padrão SMOW (Standard Mean Ocean Water – fornecido pelo National Bureau of Standards dos EUA) e expressas em “valor de  $\delta$ ”;

$$\delta = [ (R - R_0) / R_0 ] \text{ onde:}$$

R – razão isotópica ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) entre o isótopo pesado  $^{18}\text{O}$  e o mais abundante  $^{16}\text{O}$ , na amostra;  
R<sub>0</sub> – razão isotópica R ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), no padrão.

Os resultados são obtidos utilizando espectrômetro de massa. As medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  foram feitas pela Hydroisotop/Munique-Alemanha com um erro de  $\pm 0,15\text{‰}$ .

Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  para os poços Ts situam-se entre  $-3,9\text{‰}$  e  $-3,0\text{‰}$  (Tabela 1). Constitui-se que, novamente, os poços JZ-06 e JZ-08 destacam-se por valores extremos, no caso, os menores.

A média ponderada dos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  das chuvas do Cariri foi de  $3,18\text{‰}$ . Atribui-se, portanto, este valor aproximado à recarga atual local. Valores bem inferiores são interpretados como produto de mistura com águas mais profundas, de recargas antigas.

Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  bem abaixo de  $-3,2\text{‰}$  são testemunhos de um clima mais frio por aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$  nessa região até 10000 anos antes de hoje, como foi comprovado por medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  e C-14 nos aquíferos profundos do Piauí (FRISCHKORN et al., 1984).

#### Carbono-14

O  $^{14}\text{C}$  é o isótopo radioativo (decaimento  $\beta^-$ ) do carbono, com meia vida de 5730 anos. Ele é gerado na alta atmosfera pela interação dos nêutrons da radiação cósmica com nitrogênio da atmosfera onde o processo mais importante de produção é  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ .

O  $^{14}\text{C}$  entra na atmosfera por oxidação junto com o carbono “normal”, com uma razão de concentração de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 10^{-12}$  e na água subterrânea, durante a infiltração através da zona não saturada do solo, encontra-se na forma de  $\text{CO}_2$  e de  $\text{HCO}_3^-$ . Uma vez separado da atmosfera sua concentração cai exponencialmente de acordo com a lei de decaimento radioativo. Na Hidrologia Isotópica usa-se esta espécie para datação de água subterrânea. A concentração de  $^{14}\text{C}$  é expressa em pMC (“percentagem de Carbono Moderno”) onde 100% corresponde à concentração atmosférica de  $^{14}\text{C}$  em 1950. O pMC decresce exponencialmente com a “idade” t da água:

$$(pMC)_t = (pMC)_0 \exp[-(t_{\text{anos}})/8036]$$

onde,  $(pMC)_0$  refere-se ao pMC da água que entra no aquífero.

De um modo qualitativo usa-se o  $^{14}\text{C}$  para distinguir águas jovens de águas velhas e mais especificamente para determinar as áreas de recarga. Uma descrição mais detalhada dos

métodos isotópicos na hidrologia encontra-se na literatura especializada como em PLATA BEDMAR (1972).

As medidas de carbono-14 foram feitas no Departamento de Física da UFC. Os resultados obtidos através da análise da estratigrafia (Figura 1), estão de acordo com os resultados obtidos utilizando medidas de condutividade elétrica, oxigênio-18 e carbono-14 (Figura 1). É notável o comportamento paralelo dos três parâmetros.

Na bateria de poços, as concentrações de carbono-14 variam de  $35,4 \pm 0,6$  a  $92,0 \pm 0,7$  pMC (Tabela 1). O valor mais baixo foi encontrado no poço JZ-08 e a amostragem do poço JZ-06 não foi possível na época.

## Interpretação dos Resultados

As Figuras 2 e 3 apresentam as correlações lineares entre o pMC e a concentração de  $^{18}\text{O}$  e entre o pMC e a condutividade elétrica, respectivamente.

Da Figura 2 vê-se que  $\delta^{18}\text{O}$  muda linearmente ( $r = 0,910$ ) com o pMC. Como  $\delta^{18}\text{O}$  na água subterrânea é um parâmetro conservador, isso significa que a reta é produzida pela mistura de dois componentes: um velho com pMC baixo e com  $\delta^{18}\text{O}$  baixo e um novo com pMC alto e com  $\delta^{18}\text{O}$  alto. Interpreta-se também a reta da Figura 3 como decorrente de mistura.

Para fins de interpretação quantitativa da mistura na Figura 2, adota-se para o componente velho  $\delta^{18}\text{O} \sim -4,3\text{‰}$ , marcado pelo paleoclima mais frio em tempos 10000 anos antes de hoje e  $\delta^{18}\text{O} \sim -3,0\text{‰}$ , marcado pelas condições climáticas atuais, para o componente jovem. Os valores intermediários são, então, valores médios ponderados da mistura. Avaliando  $\delta^{18}\text{O}$  obtém-se as misturas indicadas na Tabela 2. Nesta tabela, X e Y são respectivamente os percentuais dos componentes novo e velho.

Para testar o modelo de mistura usou-se os mesmos valores de Y obtidos do  $\delta^{18}\text{O}$ , para explicar o comportamento da condutividade elétrica e do pMC; observa-se nas Figuras 4 e 5 com coeficientes de correlação linear 0,960 e 0,911, respectivamente que o modelo explica satisfatoriamente os parâmetros levantados como resultado de mistura de dois componentes. Observa-se que os poços com maior contribuição de componentes novos apresentam maior percentual de carbono moderno e menor condutividade (e vice-versa).

As equações correspondentes às Figuras 4 e 5 são, respectivamente:

$$\begin{aligned} C.E (\mu\text{S/cm}) &= 5 * Y(\%) + 154 \\ pMC &= -8, * Y(\%) + 90 \end{aligned}$$

Destas equações obtém-se os componentes de mistura: águas velhas e mineralizadas com 10 pMC e C.E. 650  $\mu\text{S/cm}$  ( $Y=100\%$ ) e um componente novo pouco mineralizado com 90 pMC e C.E. 150  $\mu\text{S/cm}$  ( $Y=0\%$ ) conforme está esquematizado na Figura 6, onde o componente novo é proveniente do aqüífero superior, Rio da Batateira e o componente de águas velhas é proveniente do aqüífero inferior, Missão Velha.

## Avaliação do Comportamento Hidráulico

Os valores isotópicos e de condutividade elétrica encontrados no aqüífero superior são interpretados como resultantes de mistura com águas do aqüífero inferior.

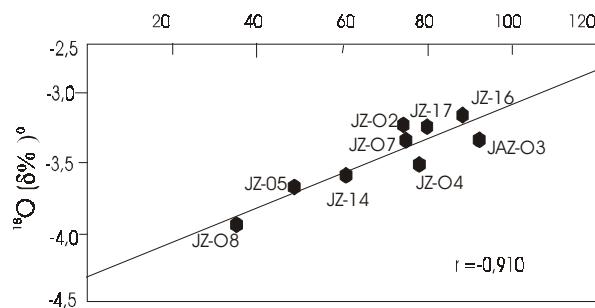


Figura 2 - Correlação linear pMC versus  $^{18}\text{O}(\delta\text{\textperthousand})$

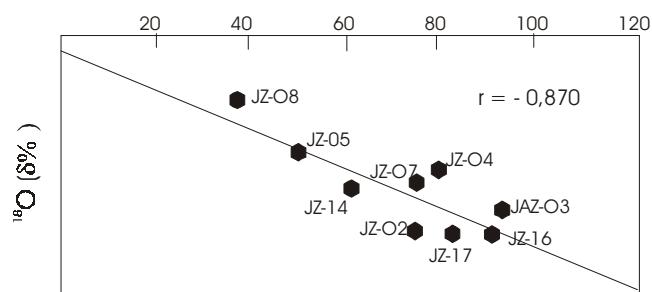


Figura 3 - Correlação linear pMC versus  $^{18}\text{O}(\delta\text{\textperthousand})$

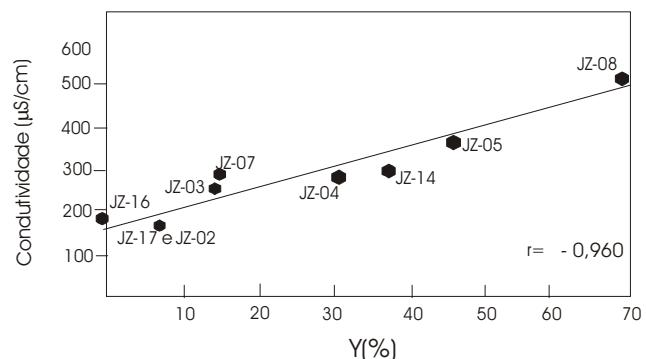


Figura 4 - Correlação linear Y (%) versus condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

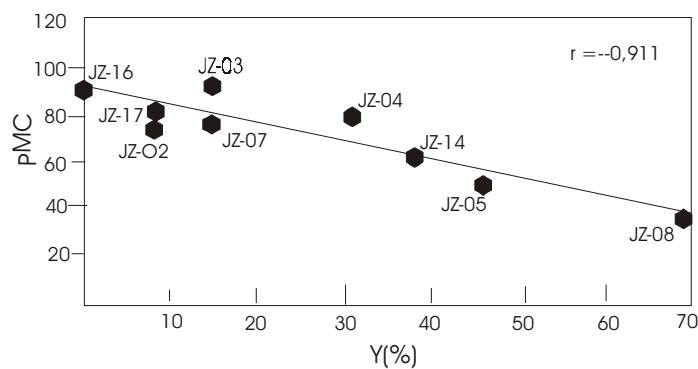


Figura 5 - Correlação linear Y (%) versus pMC

Os valores de  $\delta^{18}\text{O} < -3,5\text{‰}$  (Y(%)=38) associados a C.E.  $> 300\text{ }\mu\text{S/cm}$  e pMC = 60 (Tabela 2) identificam os pontos críticos de vazamento no confinamento, evidenciando uma contribuição mais intensa de águas isotopicamente bem diferentes das águas pluviais presentes no aqüífero superior. Também pode ser observada contribuição menos intensa para o aqüífero superior através dos valores de  $\delta^{18}\text{O} > -3,5\text{‰}$  associados a C.E.  $< 300\text{S }\mu\text{S/cm}$  e pMC  $> 60$ , com valores tendendo para águas com características somente do aqüífero supenor.

POÇO	pMC	C.E. ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	X	Y
JZ-01	-	258	-3,4	69	31
JZ-02	$74,6 \pm 0,9$	168	-3,1	92	8
JZ-03	$92,0 \pm 0,7$	243	-3,2	85	15
JZ-04	$78,2 \pm 0,5$	291	-3,4	69	31
JZ-05	$48,09 \pm 0,4$	380	-3,6	54	46
JZ-06	-	447	-3,6	54	46
JZ-07	$75,1 \pm 0,4$	281	-3,2	85	15
JZ-08	$35,4 \pm 0,6$	522	-3,9	31	69
JZ-14	$61,0 \pm 0,5$	299	-3,5	62	38
JZ-16	$88,7 \pm 0,6$	182	-3,0	100	0
JZ-17	$80,5 \pm 0,6$	162	-3,1	92	8

Uma causa de vazamentos na camada confinante do aqüífero inferior consiste na penetração parcial da perfuração nela, como observa-se no poço JZ-03, na Figura 1. A perfuração atingiu  $\sim 120\text{ m}$  de argila que posteriormente foi preenchida com entulho. O mesmo vale para o poço JZ-09. Nestes casos a diminuição da camada confinante pode induzir um fluxo vertical através dela, especialmente lembrando que a água do aqüífero inferior encontra-se sob pressão. Um exemplo disso é o poço JZ-01 que possui valores de condutividade e  $\delta^{18}\text{O}$  que indicam a presença marcante de águas provenientes do aqüífero inferior. Isto se deve à diminuição da espessura da camada confinante na base do poço (Figura 1). Esta alimentação não apresenta fluxo suficiente para traçar as águas dos poços vizinhos nas mesmas proporções ocorridas nos pontos críticos (Figura 1).

As águas subterrâneas nas proximidades da bateria de poços apresentaram, na época da perfuração, um escoamento na direção do Riacho Batateiras, com gradiente hidráulico de 4‰. Com a instalação da bateria de poços o estado natural do aqüífero foi perturbado. Observa-se na Figura 1 que cada poço capta água de toda extensão do aqüífero superior produzindo uma “estratificação forçada”, onde as águas provenientes do aqüífero inferior que vazam através das descontinuidades (ou diminuição da espessura da camada confinante pela perfuração) produzem uma “nuvem” de água do aqüífero inferior no aqüífero superior. A direção preferencial deste fluxo é determinada pela anisotropia do aqüífero superior que tem condutividade vertical menor que a condutividade horizontal devido aos níveis argilosos. A captação das águas traçadas com componentes velhos ocorre, principalmente, através dos filtros próximos à base. As águas mais recentes do aqüífero superior são captadas pelos filtros mais próximos à superfície.

A mineralização no aquífero inferior, medida pela condutividade elétrica, se processa, muito provavelmente por dissolução de sais no aquífero, já que o tempo de contato neste aquífero é muito grande (~ 20000 anos correspondendo a 10 pMC).

Através da Figura 1, pode-se observar que o poço JZ-06 está sobre a descontinuidade da camada confinante. Sobre este ponto crítico verifica-se a presença de folhelhos que desviam horizontalmente o fluxo ascendente do aquífero inferior. Mais adiante, o fluxo é direcionado por lentes argilosas proporcionando uma diluição gradual no aquífero superior na direção dos poços JZ-05, JZ-04 e JZ-03. Para uma melhor visualização deste efeito de diluição observa-se que a condutividade no poço JZ-06 é elevada com  $\delta^{18}\text{O}$  e pMC baixos, dentro das características de misturas em pontos críticos. O fluxo traçado com estas características é captado pelos poços vizinhos cujos valores refletem uma diminuição gradual da condutividade elétrica, um aumento do  $\delta^{18}\text{O}$  e do pMC com a distância ao vazamento. Os valores tendem aos obtidos para o aquífero superior (Figura 1). Observa-se também que parte do fluxo proveniente do aquífero inferior, através do poço JZ-06, alimenta o poço JZ-07.

A princípio, atribuiu-se a alta condutividade elétrica atingida no poço JZ-08, às camadas argilosas existentes no seu perfil (CEARA, 1976), mas a análise conjunta dos valores de condutividade elétrica,  $\delta^{18}\text{O}$  e pMC mostrando a contribuição do componente velho (Tabela 2) indica a presença forte das águas provenientes do aquífero inferior, provavelmente provocada pela penetração profunda na camada confinante.

Os poços JZ-02, JZ-16 e IZ-17 apresentam características marcadas pela condutividade elétrica,  $\delta^{18}\text{O}$  e pMC do aquífero superior sem nenhuma mistura com águas do aquífero inferior.

## Referências Bibliográficas

- CEARA. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Captação de Juazeiro do Norte – dimensionamento das condições de exploração dos poços tubulares. Fortaleza: CAGECE 1 PLANAT, 1976. Paginação irregular. “Datilografado”.
- CEARA. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Diretoria Técnica Captação de Juazeiro do Norte – condição de exploração dos poços. Relatório de conclusão. Fortaleza, 1988. “Datilografado”.
- FRISCHKORN, Horst, TORQUATO, Joaquim Raul F., SANTIAGO, Marlucia Freitas. Medidas isotópicas em aquíferos profundos na região centro-oeste do Piauí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3., 1984, Fortaleza. Anais... São Paulo: ABAS, 1984. v. 2.
- MOOK, W. G. Application of natural isotopes in ground water hydrology. Geologie en Mijnbouw, v. 51, n. 1, p. 131-136, 1972 a.
- PLATA BEDMAR, Antonio. Isótopos en hidrología. Madrid: Alhambra, 1972. 328p. (ZAIROS; 8)
- SANTIAGO, Marlucia Freitas, SILVA, Carla 5. Vidal, FRISCHKORN, Horst et al. Caracterização isotópica da água subterrânea na bacia sedimentar do Cariri. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 2., 1994, Santiago de Chile.