

CONTRIBUIÇÃO DE DIVERSAS TÉCNICAS ISOTÓPICAS NO ESTUDO DO AQUIFERO CÁRSTICO DA REGIÃO CENTRAL DA BAHIA (IRECÊ-IRAQUARA)*

ANTONIO PLATA BEDMAR**, ADELBANI BRAZ DA SILVA***, FERNANDO GOMES JARDIM*** e
LUIZ BARRETO DE OLIVEIRA***

ABSTRACT The karst of the central region of the state of Bahia (Brazil) has been studied by using different isotopic techniques, which included: a) determination of the well profile with artificial radioisotopes for flow measurements; b) analyses of the environmental isotopes, deuterium, oxygen-18 and tritium.

The isotopic profiles of the wells allowed determinations of the distribution of the fracturing and the karstic structure of the aquifer as well as the calculation of an approximate value for the effective porosity of the transmissivity. The transmissivity obtained by using these methods agree with those calculated using the pumping test.

The stable water isotopes allowed the identification of four different aquifer zones being important to establish the general ground water flow. It was also verified that the water experiences evaporation before infiltration in two of these zones, characterizing them as recharging zones.

An exponential model of water renewal was utilized to determine the aquifer recharge in different zones based on tritium determination. The water volume was also evaluated in the aquifer by using the porosity from the isotopic profiles.

The following isotopic techniques were used: 1) well profiles using artificial radioactive tracers; 2) measurements of the stable water isotope concentrations (deuterium and oxygen-18); 3) measurement of the thermonuclear tritium; 4) test with radioactive tracers to measure the effective porosity; 5) measurement of the source flow utilizing iodine-131 as a tracer.

The present report describes the results of the first three items. Due to the reduced number of tests the results obtained are not statistically representative and measurements of the source flow were only completed to support the system hydrogeological interpretation.

INTRODUÇÃO Um levantamento dos recursos hídricos subterrâneos, para fins de aproveitamento integrado, foi realizado pela SUDENE-CONESP, através da OESA—Organização e Engenharia S.A., na região central da Bahia (Irecê-Iraquara). Estes estudos, que se desenvolveram de junho de 1974 a março de 1976, compreenderam pesquisas a nível de detalhe objetivando definir as características dimensionais e hidrodinâmicas dos aquíferos, as condições de circulação e descarga natural, o uso e produção da água subterrânea, e a geoquímica das águas. A região estudada é constituída de um aquífero cárstico. O estudo de aquíferos cársticos com as técnicas convencionais utilizadas na Hidrologia encontra, frequentemente, sérias dificuldades devido às suas características peculiares tais como: ausência de uma superfície de drenagem bem definida; elevada capacidade de infiltração localizada em pontos concretos da superfície; e fluxo subterrâneo concentrado em acidentes estruturais do meio. Tudo isto produz heterogeneidade na circulação da água, assim como na maior parte dos parâmetros do aquífero, o que limita a utilização daquelas técnicas hidrológicas que fornecem uma informação de tipo local, obrigando a realizar um número

muito elevado de testes para atingir uma representatividade estatística razoável dos resultados. Neste trabalho são apresentados os principais resultados obtidos na pesquisa de água subterrânea utilizando radioisótopos ambientais e artificiais, que serviram de subsídios às técnicas hidrológicas, para o estudo do carste da região central da Bahia.

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA A área estudada está situada na região central da Bahia (Irecê-Iraquara) e abrange uma superfície de 12.000 km² (Fig. 1).

A região é circundada por um planalto montanhoso, constituído de metassedimentos detríticos do Grupo Chapada Diamantina. Sua morfologia foi esculpida por sucessivos aplanamentos, resultando um platô dissecado. Sua litologia é constituída de uma sequência de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (calcários, dolomitos, margas) sobrepostas ao Grupo Chapada Diamantina. Na parte central da área estudada as rochas apresentam-se com intensos dobramentos, bem evidenciados na foto-interpretação pelos lineamentos de direção E-W. Nas áreas próximas ao contato, essas rochas carbonáti-

* Estudo realizado pela SUDENE-DRN-CONESP, através da OESA—Organização e Engenharia S.A., como parte do programa "Estudos de reconhecimento e Estudos Hidrogeológicos para Aproveitamento Integrado da Região Central da Bahia".

** Consultor da OESA e técnico do Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas do Ministério de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid-Espanha.

*** OESA—Organização e Engenharia S.A., Rio de Janeiro-Brasil.

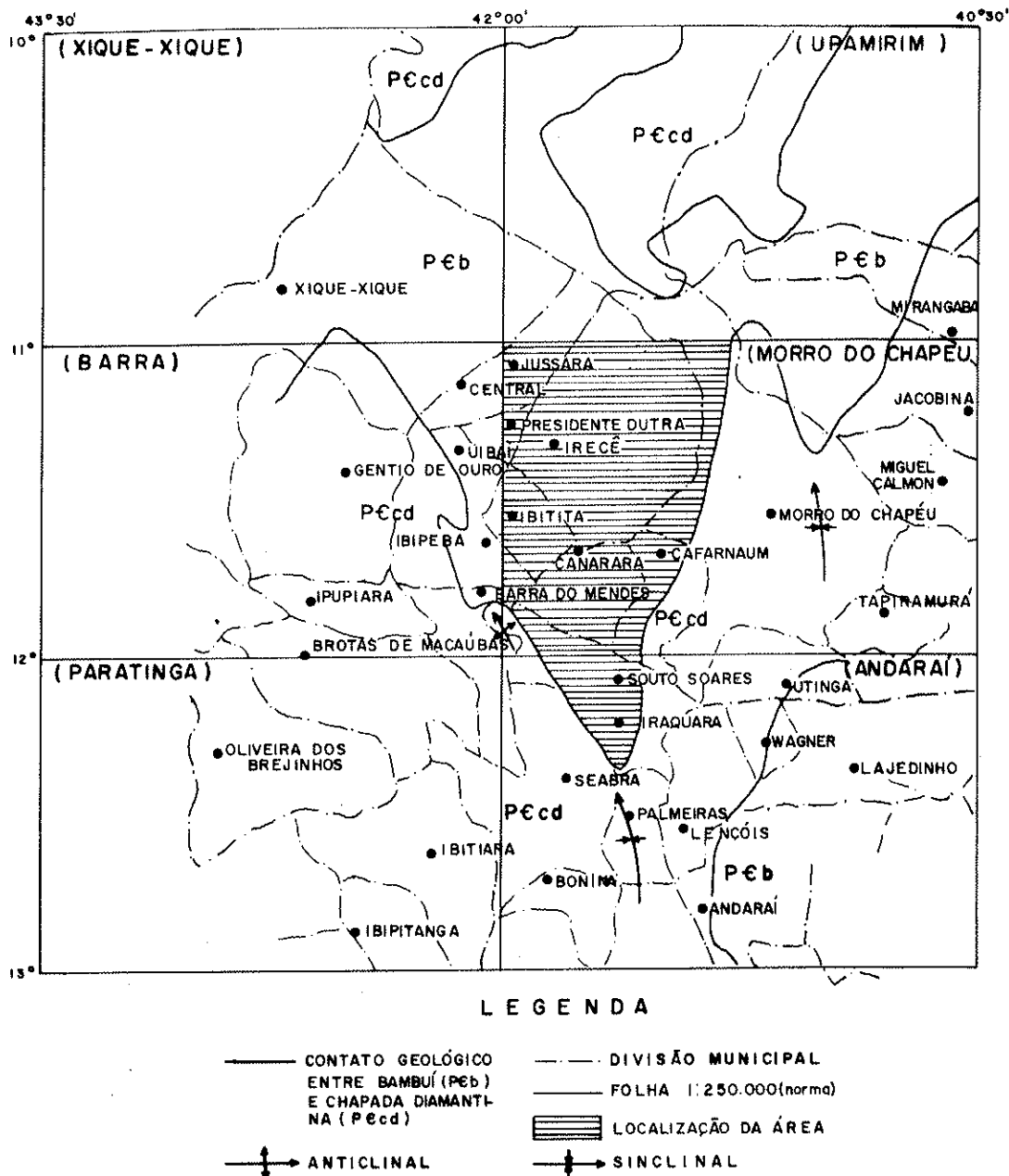


Figura 1

cas se amoldam ao substrato quartzítico, predominando os lineamentos de direção N-S.

Os fenômenos de carstificação atingiram os calcários diferencialmente, originando uma morfologia diversificada dentro da área estudada. Ao sul (região de Iraquara), a morfologia é caracterizada por uma elevada densidade de dolinas, normalmente de grande diâmetro, solos bem espessos e vales profundos. Estas dolinas chegam a atingir 200 m de diâmetro e mais de 100 m de profundidade. Na área de Irecê, ao norte, a carstificação foi menos intensa e atuou diferencialmente em função da composição da rocha, estrutura tectônica e outros fatores, originando um relevo com dolinas de diâmetro pequeno (5 a 10 m), com poucos sumidouros e vales rasos.

As curvas isopiezométricas se adaptam muito à topografia e mostram a circulação de águas subterrâneas

para os vales dos rios Jacaré e Verde. As variações piezométricas sazonais da área são, geralmente, menores nas proximidades do vale do Rio Jacaré, onde o incremento do nível d'água é inferior ou igual a 1 m; enquanto em Irecê chegam a ser da ordem de 6 m.

Os níveis d'água nos poços estão relativamente próximos da superfície do terreno (10 a 15 m). A profundidade útil dos poços varia entre 40 e 70 m, aproximadamente, ou seja, não se tem captado aquíferos profundos. Os valores de transmissividade são muito variáveis de um poço ao outro, não seguindo nenhum padrão identificável.

A alimentação do aquífero procede da infiltração direta de uma parcela da precipitação pluviométrica e pela rede de drenagem procedente dos quartzitos. Esta alimentação é diferenciada em função da maior ou menor carstificação existente. Os gradientes hidráulicos

são mais fortes na parte oeste ($10 \cdot 10^{-3}$), onde as águas vertem para o Rio Verde. Os fluxos para o Rio Jacaré são lentos, com gradientes muito pequenos ($1 \cdot 10^{-3}$), enquanto que, para o riacho da Pratinha, os gradientes aumentam em direção ao Vale. Verifica-se, ainda, direções preferenciais de fluxo, em algumas áreas, comprovadas pela maior capacidade específica dos poços e pelas medidas de fluxo horizontal, realizadas com traçador radioativo. As saídas d'água do sistema cárstico são para os rios Jacaré e Verde, na zona central, e para o Rio Santo Antonio na zona sul, secundariamente, as perdas por evapotranspiração devem desempenhar papel importante, nas zonas baixas e depressões, onde os níveis d'água se apresentam próximos à superfície. As descargas por bombeamento não são significativas, a exceção da área urbana de Irecê, onde se exploram intensamente os aquíferos. O volume total de água bombeada na área é da ordem de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

PERFILAGEM DE POÇOS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS A perfilagem de poços com traçadores radioativos tem por finalidade a localização e medida dos fluxos naturais d'água existentes nos mesmos. Estes fluxos podem ser horizontais ou verticais. Quando um poço atravessa um aquífero livre, com uma superfície piezométrica única, o fluxo existente é, geralmente, horizontal, ainda que existam camadas com diferentes permeabilidades. O mesmo acontece quando o poço atravessa um aquífero confinado se a permeabilidade das camadas superiores, atingidas pela coluna de água, é desprezível.

Pelo contrário, quando o poço põe em comunicação duas ou mais camadas com diferentes níveis piezométricos, existe no interior do poço um fluxo vertical, circulando a água da camada de maior potencial para a de menor. No caso de um aquífero cárstico, estas camadas podem ser visualizadas como fendas isoladas ou trechos fendilhados. Normalmente os fluxos verticais descendentes ocorrem nas áreas onde o aquífero se recarrega e os ascendentes nas proximidades das áreas de descarga.

Métodos experimentais A técnica experimental utilizada para a medida de fluxos horizontais está baseada na marcação com traçador radioativo de toda a coluna de água do poço, de maneira uniforme, para posteriormente se determinar perfis de concentração em função de tempo com um detetor que se desloca ao longo do poço. A concentração de traçador diminui nos trechos que têm fluxo. A diminuição de concentração em função do tempo e da velocidade do fluxo obedece a uma lei exponencial bem conhecida, que conduz à fórmula prática seguinte:

$$V = \frac{1,81 \cdot d}{\alpha \cdot t_{1/10}} \quad (1)$$

sendo V = velocidade do fluxo (velocidade Darcy)

d = diâmetro interno do poço

$t_{1/10}$ = tempo no qual a concentração diminui a décima parte do valor inicial

α = coeficiente que leva em conta a perturbação hidrodinâmica nos fluxos do aquífero ocasionada pela presença do poço.

No caso de poços sem tubulação de revestimento, como acontece no caso presente, pode-se utilizar um valor de α compreendido entre 1 e 2.

O método permite determinar, de forma aproximada, a velocidade do fluxo horizontal para os diferentes trechos permeáveis do poço. O somatório dos produtos da velocidade do fluxo pelo comprimento dos respectivos trechos proporciona o que se pode chamar transmitância de velocidade. O quociente desta transmitância pelo gradiente piezométrico local dá a transmissividade do poço.

O método de marcação de toda a coluna de água proporciona também informação sobre a presença de fluxos verticais do poço. Mas a determinação quantitativa de tais fluxos se realiza de forma exata mediante a injeção pontual do traçador numa determinada profundidade do poço próximo ao trecho onde se produz a entrada de água. Neste caso, depois de efetuada a injeção, se determina a velocidade de deslocamento da nuvem de traçador ao longo do poço por meio de um detetor. As sucessivas posições da nuvem, em função do tempo, permitem determinar diversos valores da velocidade do fluxo vertical. As mudanças de velocidades permitem localizar as zonas pelas quais entra e sai a água, isto é, as zonas permeáveis do poço. A existência de fluxo vertical ascendente ou descendente pode ser motivada, principalmente, pelo seguinte: a) fluxo vertical ascendente — pode ser devido a existência de águas confinadas que atingem um nível superior permeável; b) fluxo vertical descendente — pode estar motivado pela existência de níveis suspensos saturados que fornecem água do poço.

Resultados obtidos O número de poços estudados foi de 48, com um comprimento total de coluna de água de 2.462 metros. Destes poços, 22 mostravam a existência de fluxo horizontal, 15 tinham fluxo vertical descendente e 11 fluxo vertical ascendente. Como exemplo apresentamos os gráficos correspondentes a dois poços, um deles com fluxo horizontal e o outro com fluxo vertical (Figs. 2 e 3). As conclusões obtidas a partir destes testes são resumidas a seguir.

Características do fendilhamento A maior parte dos poços estudados apresentam fendas ou trechos fendilhados bem definidos. Só em 6 poços não foi possível localizar fendas devido a existência de fluxos excessivamente lentos. Em 11 poços detectou-se apenas um só trecho fendilhado. Em 28 foram encontrados dois trechos fendilhados, em 2 poços havia 3 trechos e em 1 poço havia 4 trechos. Predomina, portanto, a existência de dois trechos fendilhados. O método de trabalho permite obter só de forma aproximada o tamanho dos trechos fendilhados. Portanto, para um total de em 2.462 metros investigados, aproximadamente 402 metros são fendilhados. Sendo o número total de trechos com fendas de 77, obtém-se como valor médio, 5 metros para cada zona de permeável.

Por outro lado, os 402 metros de trecho fendilhado representam 16% do comprimento total de coluna de água estudada (2462 metros). De forma estimativa, poder-se-ia adotar, para o trecho fendilhado, uma porosi-

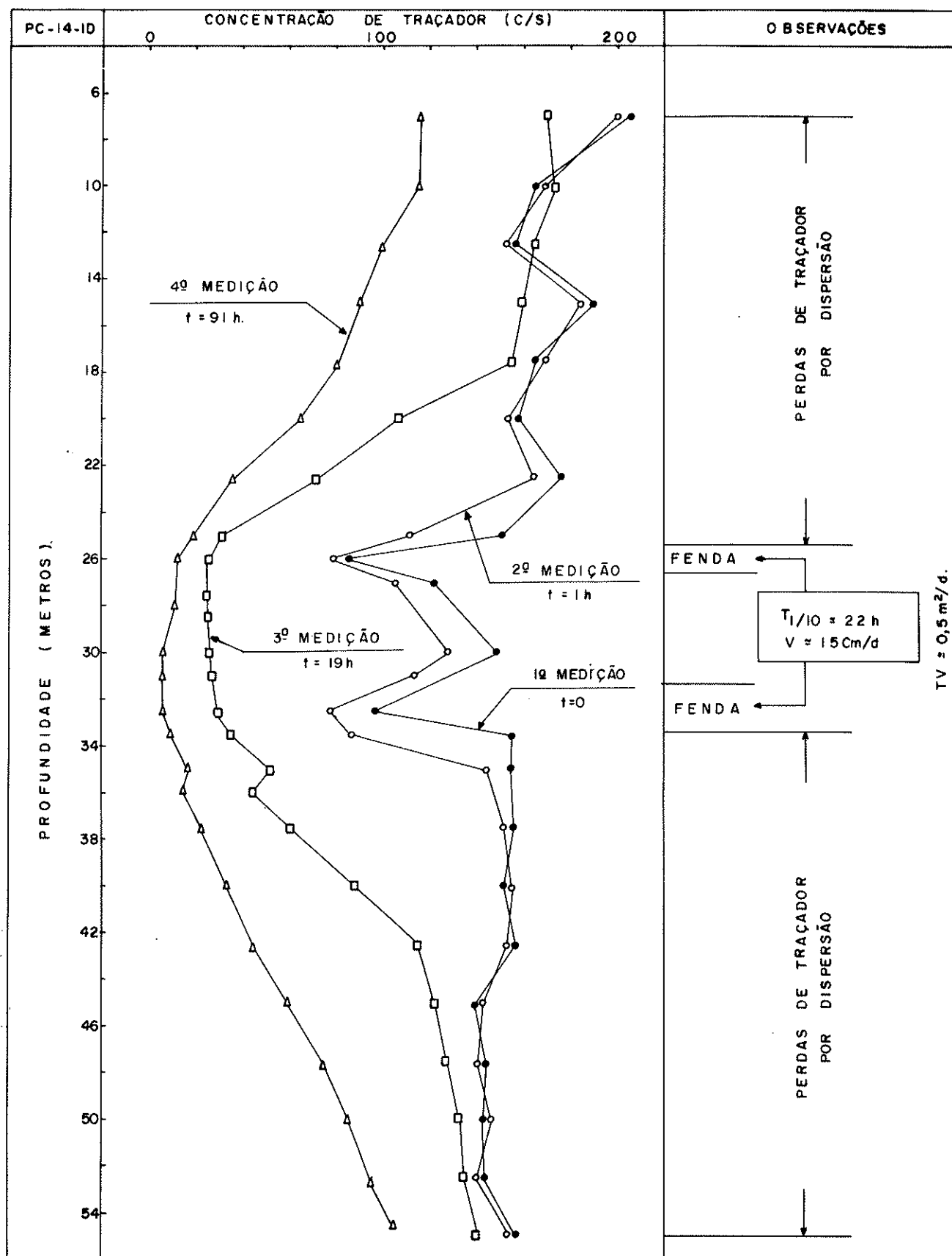


Figura 2

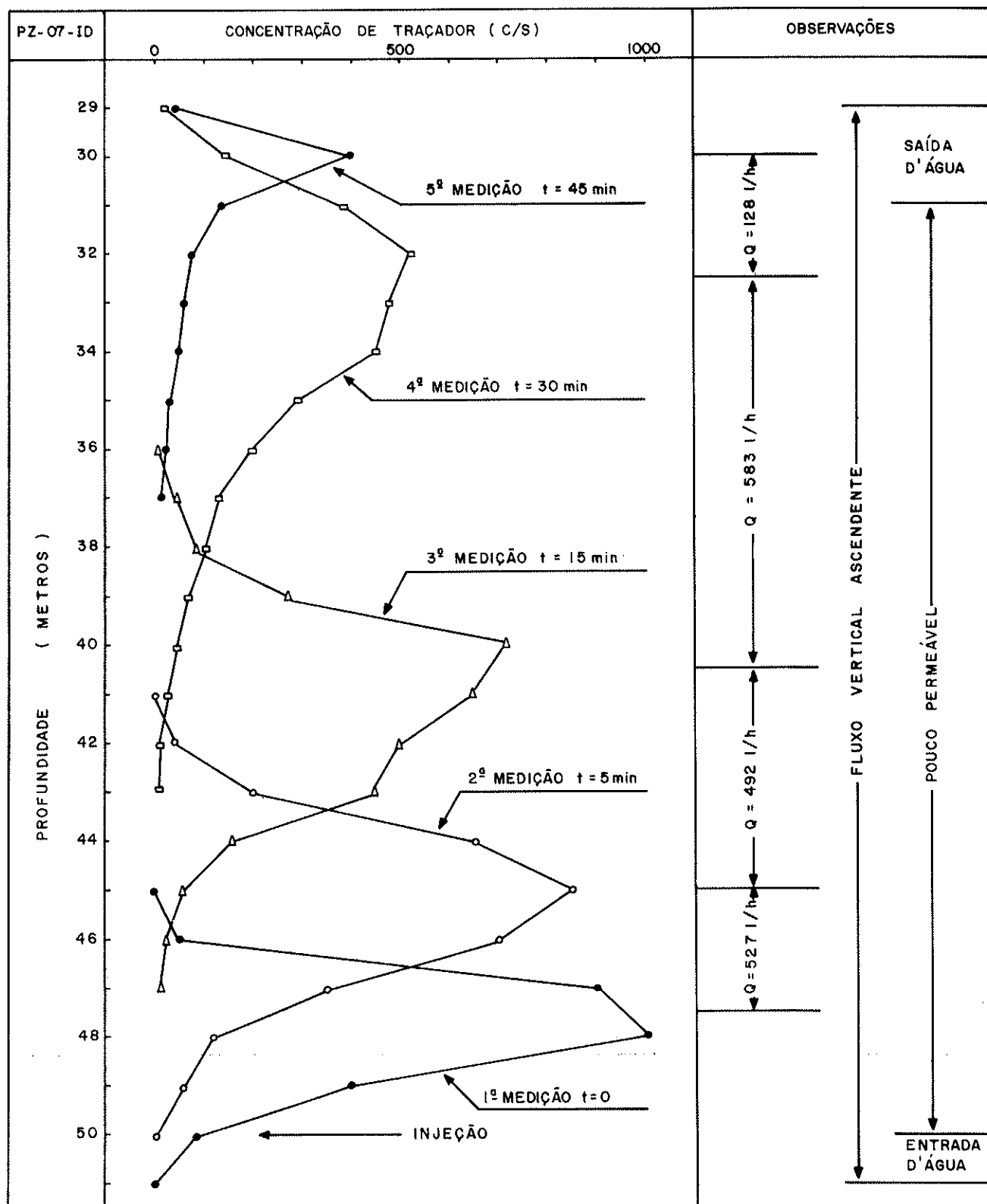


Figura 3

dade média de 0,2. Isto daria para o conjunto do aquífero uma porosidade de $0,16 \times 0,2 = 0,032$ (3,2%) válida para uma espessura de 66 metros, que é a profundidade média dos poços estudados. Com este valor obtém-se um armazenamento de água de $66 \times 0,032 = 2$ metros ou $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Na Fig. 4 apresentam a distribuição vertical das fendas localizadas no conjunto de poços estudados. O gráfico termina em 80 metros porque o número de poços que atingiram profundidades maiores é insuficiente para um tratamento estatístico. Observa-se que a maior probabilidade de encontrar fendas corresponde ao trecho compreendido entre 7,5 e 35 metros de profundidade (medidos desde o nível do solo), no qual encontram-se, aproximadamente, 59% das fendas.

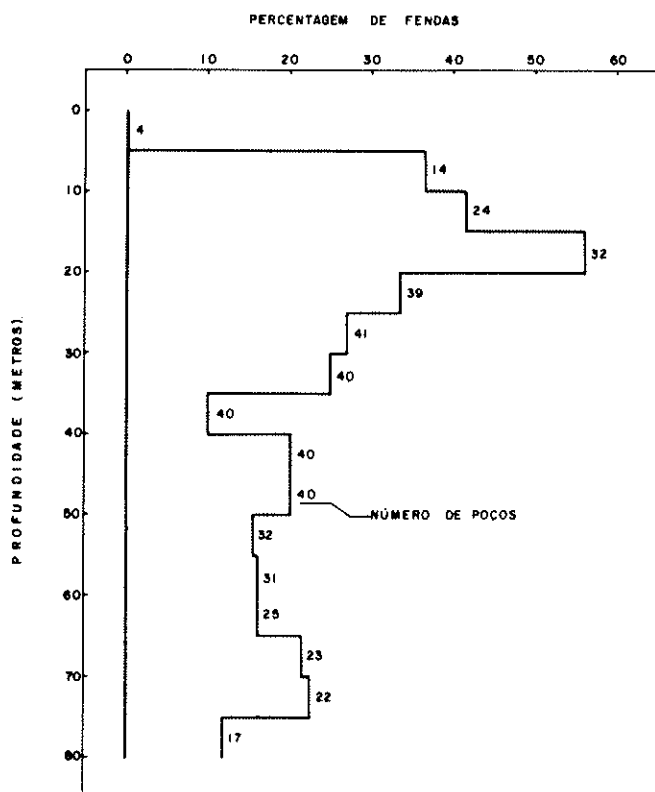


Figura 4

Transmissividade Em 20 dos 22 poços que apresentavam apenas fluxo horizontal foram realizados testes de bombeamento que proporcionaram o valor da transmissividade. A relação entre os valores obtidos por ambos os procedimentos encontram-se na Fig. 5. A linha marcada corresponde aos pontos do mesmo valor para os dois métodos. Os 4 pontos com uma seta correspondem a poços onde a velocidade do fluxo era muito baixa e foi determinado apenas o limite superior da mesma.

As diferenças entre os valores obtidos por ambos os tipos de testes podem ser explicados pelo fato destes terem sido feitos em épocas diferentes, pelo erro cometido na determinação do gradiente piezométrico local e por diversas causas de erro das duas técnicas experimentais.

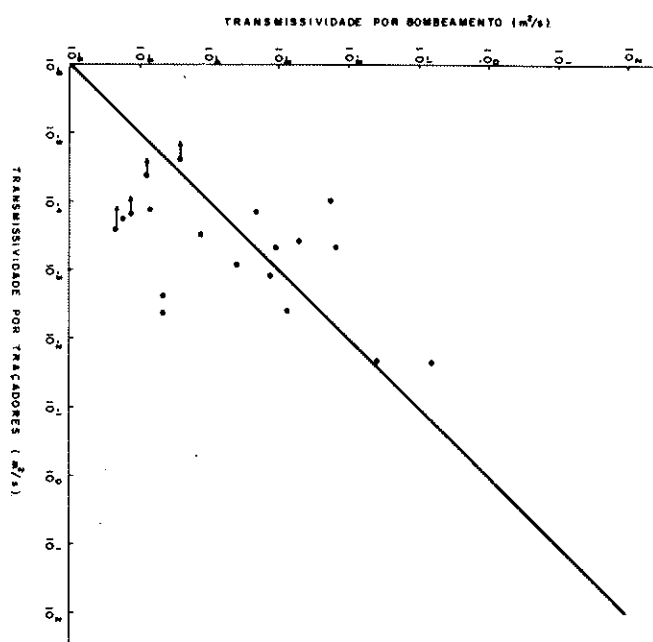


Figura 5

Características do fluxo no aquífero Os ensaios com traçadores foram realizados na época de estiagem, quando os níveis piezométricos se encontravam próximos a seus valores mínimos. Por esta razão, os fluxos medidos correspondem aos valores mínimos.

A distribuição espacial dos poços com fluxo vertical ascendente e descendente foi totalmente irregular e não esteve relacionada com a recarga ou descarga do aquífero. Em zonas de descarga próximas aos rios observaram-se, algumas vezes, fluxo vertical descendente e ao contrário em zonas de recarga. Isto indica que os fluxos verticais estavam condicionados, nestes casos, por situações locais. Possivelmente, a distribuição desses fluxos deve ser mais normal na época de chuva.

Os valores dos fluxos horizontais medidos foram geralmente muito baixos e oscilaram entre 0 e 21 cm/dia, para a maioria dos poços, com um valor médio de 3 cm/dia. Isto pode ser devido ao período de estiagem. Só em 6 poços encontraram-se fluxos superiores a 1 m/dia. Quatro destes poços estavam situados na zona sul do aquífero onde o tamanho e número de dolinas são maiores e onde existe uma descarga bem definida através de diversas fontes, cuja vazão média total é maior que $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Os outros dois poços encontravam-se próximos a zonas de descarga nos rios Verde e Jacaré.

ISÓTOPOS ESTÁVEIS D'ÁGUA Os isótopos estáveis d'água (deutério e oxigênio-18) foram analisados em 69 poços, todos eles situados em calcário do Grupo Bambuí. Os resultados obtidos estão indicados na Tab. 1, classificados em 4 grupos diferentes, que serão justificados a seguir. Todas as análises foram realizadas pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) de Piracicaba, SP. Os erros das medições indicados por este Centro são de $1,5 \text{ ‰}$ para δ_D e $0,2 \text{ ‰}$ para δ_{18} .

Tabela 1 — Composição isotópica das amostras d'água dos poços

Zona	Nº de ordem	δ_D ‰	δ_{18} ‰	Zona	Nº de ordem	δ_D ‰	δ_{18} ‰
1	IR-032	-30	-3,4	2	IR-270	-32	-4,4
	IR-262	-29	-4,4		IR-072	-43	-6,1
	IR-041	-30	-3,5		IR-044	-30	-3,4
	JR-008	-29	-4,1		IR-035	-44	-6,4
	PD-001	-26	-3,8		IR-109	-38	-5,7
	PC-06-ID	-29	-4,1		IR-159	-39	-5,9
	PD-002	-22	-9,2		IR-261	-39	-5,7
	IR-136	-25	-4,1		IR-120	-45	-6,7
	IR-239	-22	-3,6		IR-022	-47	-6,9
	IR-217	-28	-4,9		E-008	-47	-6,9
	IR-250	-28	-4,5		Valor médio	-40	-5,8
	IR-122	-25	-4,0	3	IR-016	-31	-4,3
	IR-179	-23	-3,5		PC-14-ID	-32	-4,7
	IR-023	-27	-4,3		IA-033	-32	-4,4
	IR-003	-23	-3,0		CN-006	-39	-7,0
	PC-10-ID	-30	-4,8		IA-031	-34	-5,5
	PZ-06-ID	-32	-4,6		PZ-04-ID	-31	-4,9
	IR-156	-28	-4,0		CN-001	-41	-6,3
	IR-185	-25	-3,6		IR-054	-43	-6,3
	IR-249	-24	-4,3		CA-011	-38	-5,6
	IR-203	-21	-3,7		CA-009	-45	-7,1
	IR-077	-26	-3,7	4	E-007	-37	-6,5
	IR-148	-28	-4,0		Valor médio	-37	-5,7
	IR-149	-22	-2,9		IQ-003	-27	-4,5
	IR-009	-28	-3,6		IQ-005	-30	-4,8
	IR-229	-28	-4,0		PZ-03-ID	-27	-5,0
	IR-232	-37	-5,4		SR-001	-25	-4,0
	IR-246	-25	-4,3		SR-002	-31	-5,2
	IR-046	-30	-4,2		SR-008	-25	-4,2
	IR-010	-21	-3,0		PC-13-ID	-25	-4,3
	IR-048	-31	-4,4		CN-003	-25	-4,3
	IA-003	-25	-3,8		CN-026	-24	-2,9
	IR-045	-24	-3,0		Valor médio	-27	-4,4
	IR-172	-29	-4,0				
	IA-010	-28	-4,3				
	IR-071	-26	-3,7				
	IR-243	-29	-4,2				
	Valor médio	-27	-4,1				

De acordo com os valores absolutos das desviações isotópicas obtidas e com o excesso de deutério, calculado pela equação $\Delta_D = \delta_D - 8 \delta_{18}$, podem definir-se quatro zonas de águas diferentes no aquífero, caracterizados pelos valores médios seguintes:

ZONA 1

$$\delta_D = 26,9 \text{ ‰}; \delta_{18} = -3,95 \text{ ‰}; \Delta_D = 4,7$$

ZONA 2

$$\delta_D = -40,4 \text{ ‰}; \delta_{18} = -5,81 \text{ ‰}; \Delta_D = 6,1$$

ZONA 3

$$\delta_D = 36,6 \text{ ‰}; \delta_{18} = -5,69 \text{ ‰}; \Delta_D = 8,9$$

ZONA 4

$$\delta_D = 26,5 \text{ ‰}; \delta_{18} = 4,36 \text{ ‰}; \Delta_D = 8,3$$

Os limites destas zonas no aquífero são, aproximadamente, os indicados no mapa da Fig. 6. Este mapa inclui também as divisórias do fluxo subterrâneo obtidas a partir das medições de nível piezométrico.

Infelizmente não se dispunham de dados sobre a composição isotópica das precipitações locais. A região mais próxima da qual existem dados que corresponde a estação do aeroporto de Brasília, está incluída na rede mundial de pontos da WMO—OIEA para controle de D, O¹⁸ e T nas precipitações. Aceitando um grau de continentalidade semelhante para esta estação na área do

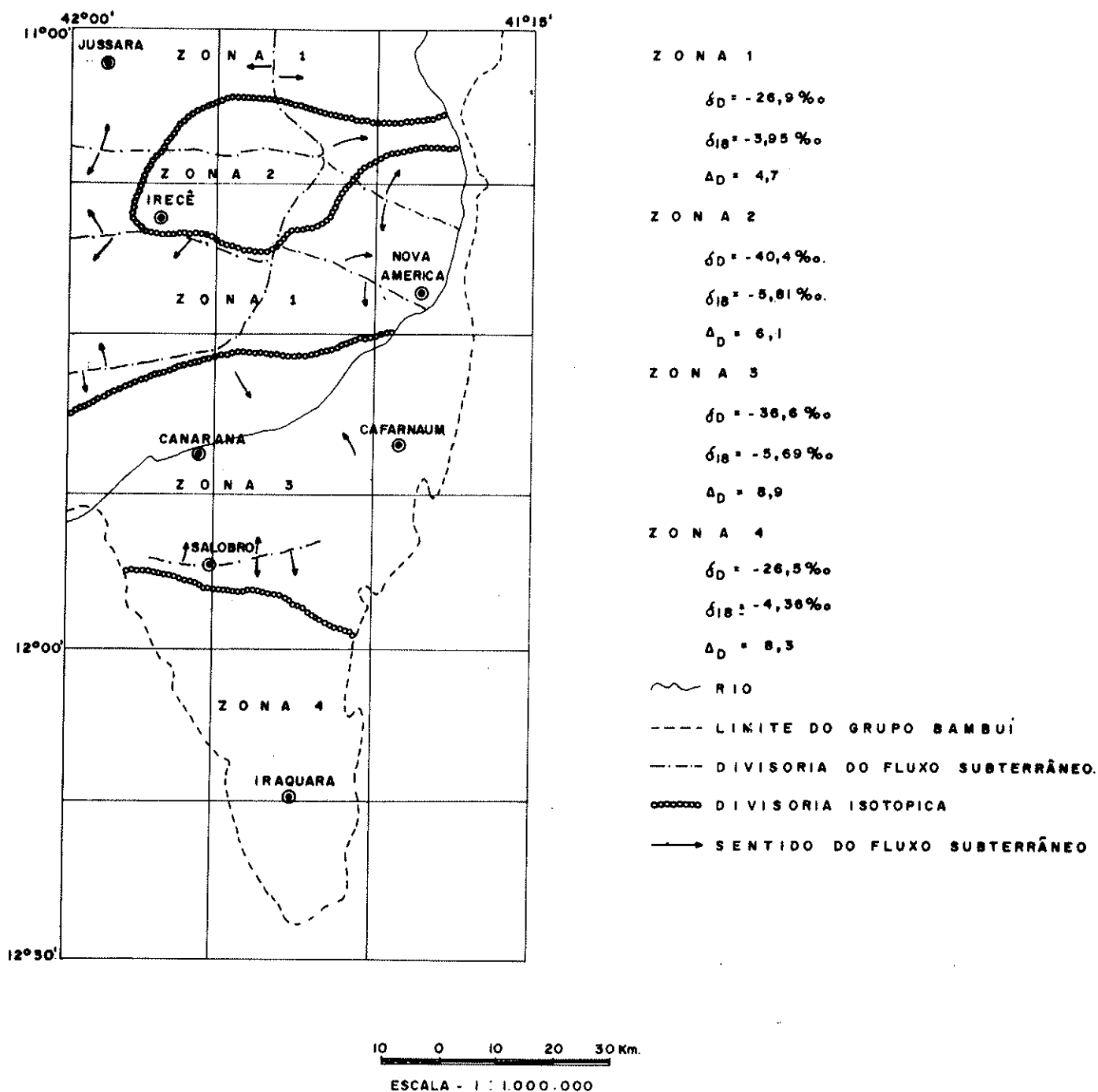


Figura 6

estudo, os dados da mesma podem ser utilizados como representativos das precipitações locais. A Fig. 7 corresponde ao diagrama $\delta_D - \delta_{18}$ para as precipitações de Brasília, incluindo somente os dados para o período Outubro-Abril e para precipitações médias mensais maiores de 20 mm. Os pontos do diagrama não se desviam muito da equação $\delta_D = 8 \delta_{18} + 10$, correspondente a maior parte das precipitações do mundo. No entanto, os pontos ajustam-se melhor à equação $\delta_D = 7,4 \delta_{18} + 8,5$.

Um diagrama semelhante para as águas subterrâneas do aquífero mostra-se na Fig. 8. Observa-se a falta de pontos com δ_D maior de -20‰ e menor de -50‰ , o que é lógico se considerarmos que a água do aquífero representa valores médios devido à mistura de diferentes águas de precipitações. A maior parte dos pontos encontra-se à direita das linhas de precipitação correspondente a Brasília, especialmente os pontos da zona 1. Isto se explica pelo fato de ocorrer evaporação da água antes da sua infiltração no subsolo. Uma con-

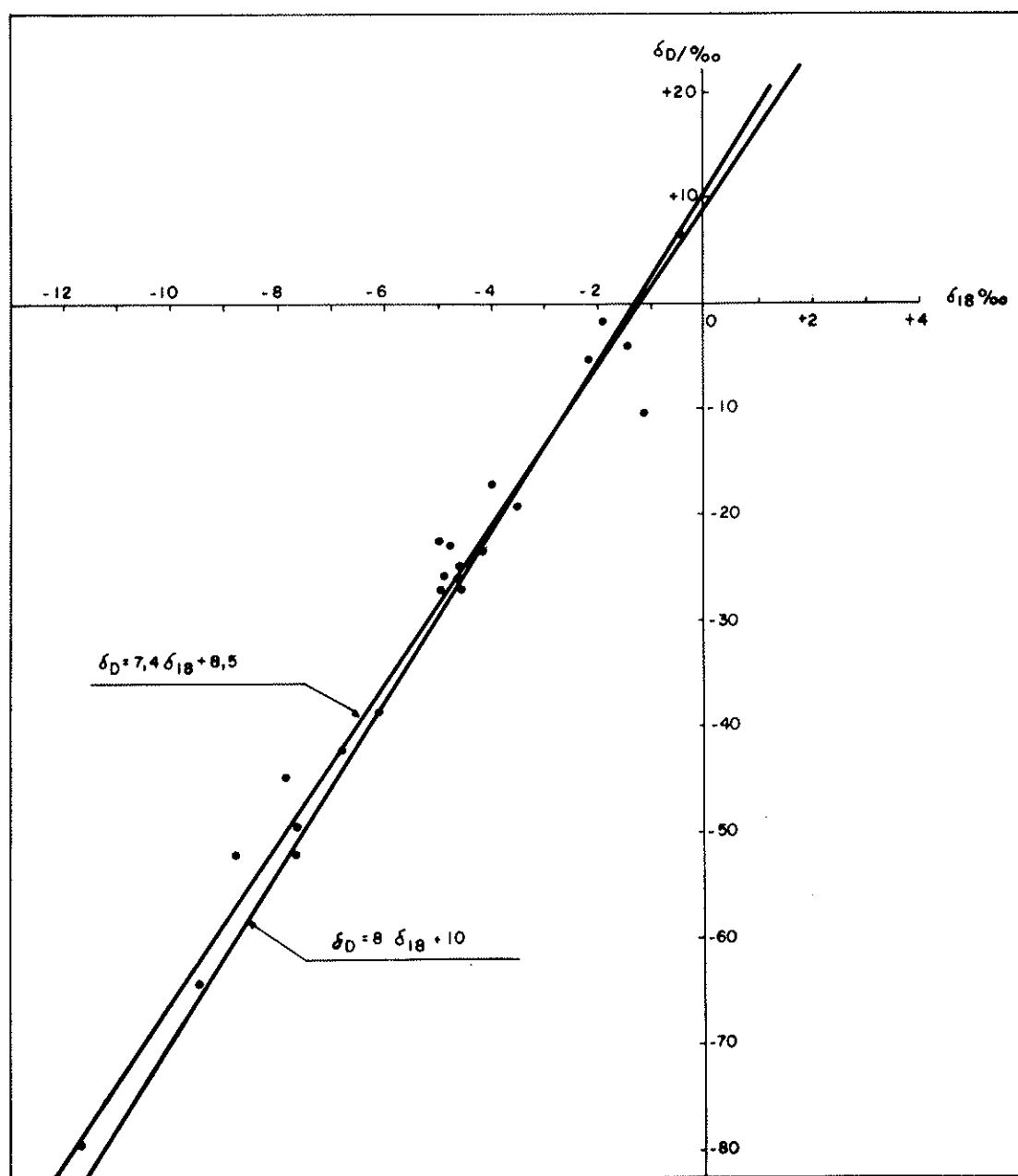


Figura 7

firmação desta conclusão tem-se nos valores dos incrementos de deutério Δ_D . Para as zonas 3 e 4 os valores de Δ_D são da mesma ordem de grandeza que para as precipitações, indicando uma evaporação prévia desprezível. O contrário acontece na zona 1, onde o valor de Δ_D se desvia muito do correspondente às precipitações. A zona 2 tem uma situação intermediária. A evaporação prévia significa um maior tempo de permanência d'água na superfície antes da sua infiltração e, portanto, uma menor permeabilidade das camadas superficiais. Na zona 1 o tamanho e número de dolinas existentes são muito menores do que nas zonas 3 e 4. A água das precipitações na zona 1 tem que percorrer um maior caminho até encontrar um sumidouro ou dolina por onde se infiltrar no

subsolo e a recarga nesta zona deve ser menor do que nas zonas 3 e 4.

Por outro lado, se a composição isotópica média das precipitações para a área toda fosse constante, poder-se-ia esperar que as águas com valor δ mais negativo deveriam corresponder a uma infiltração mais rápida e estas águas deveriam ter associado um incremento de deutério elevado. Pelo contrário, águas com valor δ mais positivo deveriam corresponder a águas com evaporação prévia e ter um valor de Δ_D menor. No caso presente, isto não se cumpre. Por exemplo, na zona 4, os valores δ das águas são os mais positivos da área e não apresentam sintomas alguns de evaporação. Por outro lado, as águas da zona 2 são as mais negativas e apresen-

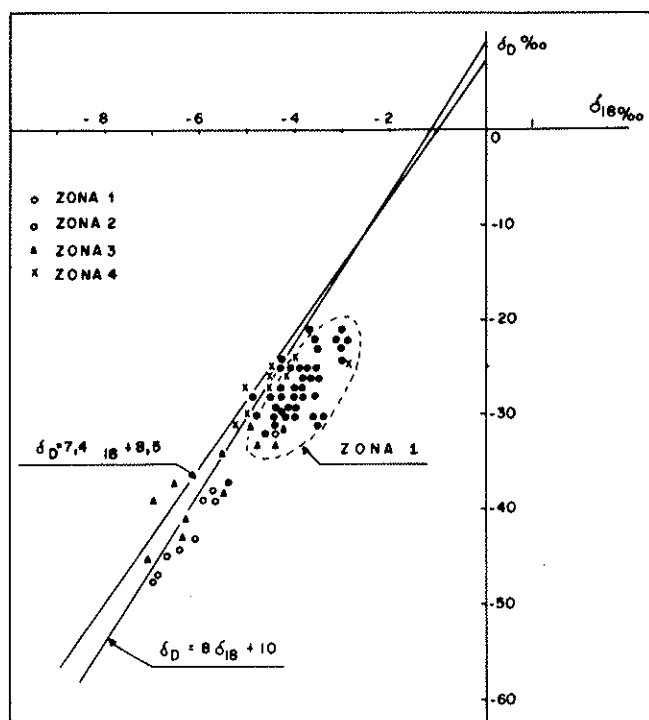


Figura 8

tam indícios de ligeira evaporação. Isto parece indicar que a composição isotópica média das precipitações não é homogênea em toda a área, devido, provavelmente, a uma variação do grau de continentalidade, o qual parece ser certo, sobretudo, comparando a zona 4 com o resto da área. Esta zona parece receber precipitações mais pesadas motivadas por massas de nuvens que viajam desde o mar por um caminho mais direto (menor grau de continentalidade). Como se verá mais adiante quando se estuda o tempo de renovação da água, o aquífero contém uma mistura de águas de precipitações de muitos anos. Portanto, não é possível explicar o fenômeno anterior como variações de composição devidas às precipitações mais recentes.

As diferentes zonas isotópicas indicadas na Fig. 6 têm o significado de que a água pode ter qualquer tipo de fluxo dentro de uma zona. Mas a mistura entre águas de diferentes zonas deveria ser muito pequena ou inexistente. Portanto, as divisórias isotópicas deveriam coincidir com divisórias do fluxo subterrâneo. Isto acontece satisfatoriamente no caso das divisórias que separam as zonas 1 e 3 e as zonas 3 e 4. Pelo contrário, a zona 2 constitui uma anomalia. A água desta zona deveria descarregar somente no Rio Jacaré e não no Rio Verde, situado mais a Oeste da área do estudo. Uma possível explicação desta anomalia pode ser a grande concentração de poços existentes na zona de Irecê. Antes de existirem estes poços, as divisórias hidráulicas poderiam ter sido semelhantes à divisória isotópica que define a zona 2. O rebaixamento do nível da água no aquífero como consequência da exploração dos poços pode ter invertido o sentido do fluxo nesta zona, modificando as divisórias hidráulicas.

Por meio dos estudos realizados, acredita-se que a maior parte da água subterrânea da zona 4 é descarregada através da fonte da Pratinha situada cerca de 5 km ao sul de Iraquara. Esta fonte tem uma vazão uniforme ao longo do ano igual a 1,7 m³/s. As outras fontes da área têm vazões pequenas dando em total uns 0,1 m³/s.

A composição isotópica da água da fonte mencionada é $\delta_D = -270/00$ e $\delta_{18} = -4,5/00$. Estes valores são sensivelmente iguais aos valores médios para o conjunto de poços medidos nesta zona. Esta concordância confirma a informação que se tinha a este respeito. Portanto, pode-se admitir que a recarga da zona 4 corresponde à vazão total destas fontes. Uma vazão de 1,8 m³/s corresponde a $5,68 \times 10^7$ m³/ano. Como a superfície da zona 4 situada ao Norte da fonte da Pratinha é de $1,49 \times 10^9$ m², tem-se uma recarga para esta zona de 39 mm/ano, que representa, aproximadamente, 6,5% da precipitação média local.

Por último, na Fig. 9 se representa a relação entre o excesso de deutério e a concentração de íon Cl da maior parte das amostras analisadas. Os pontos ordenam-se formando dois grupos, sendo que em ambos a concentração de íon cloreto aumenta à medida que diminui o valor de Δ_D . Isto parece demonstrar o efeito da evaporação prévia à infiltração durante a permanência d'água na superfície. A existência de dois grupos de amostras com salinidades diferentes deve estar relacionada com a composição do solo, mas este ponto não pode ser comprovado devido à distribuição irregular das amostras.

TRÍTIUM DE ORIGEM TERMONUCLEAR Devido a algumas dificuldades no laboratório de análise só foi possível determinar a concentração de trítio em 12 amostras. Os resultados obtidos mostram-se na terceira coluna da Tab. 2. A segunda coluna desta tabela indica a zona do mapa da Fig. 6 na qual está situado cada poço. O erro estatístico 2σ das concentrações de trítio oscila entre 0,8 e 1,5 U.T.

Para a interpretação dos resultados em termos de idade é preciso conhecer as concentrações de trítio nas precipitações locais durante os últimos 20 anos. Devido à carência de dados, foi necessário utilizar os valores conhecidos para as estações de controle da WMO-OIEA existentes em Brasília e Rio de Janeiro. Os valores disponíveis na época compreendiam o período 1965-1971 e são indicados na Tab. 3 (concentrações médias anuais e as concentrações médias referidas ao período útil de recarga que vai de Outubro até Abril). Devido ao efeito do grau de continentalidade, observa-se como as concentrações em Brasília são entre 20 e 30 ‰ maiores do que no Rio de Janeiro. A área de estudo tem uma situação intermediária, e por isto os valores para a mesma têm sido calculados pela média dos correspondentes a estas duas estações. No caso dos anos para os quais não se têm dados, as concentrações foram calculadas seguindo o modelo de "Ottawa", sendo este um método aceito universalmente. O erro provável cometido na elaboração dos dados para a área do estudo é inferior a 20%.

Para a interpretação das concentrações de trítio em sistemas cársticos é muito utilizado um modelo de renovação de tipo exponencial, também chamado de boa

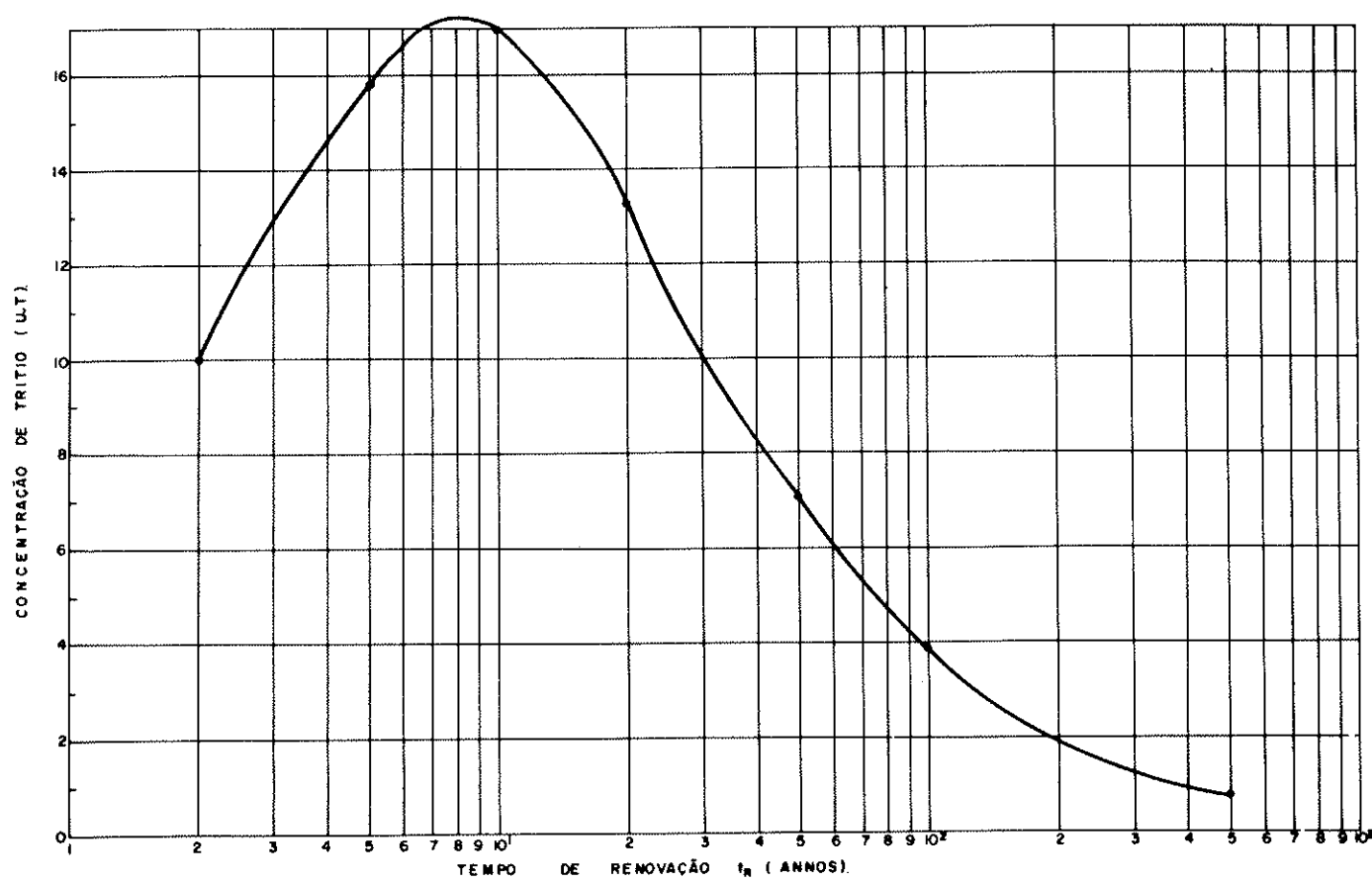


Figura 9

Tabela 2 — Concentrações de trítio e tempos de renovação obtidos com o modelo exponencial

Poço	Zona	Concentração (U.T.)	Tempo de renovação (anos)	
			Valor individual	Valor médio
JR-08	1	8,8	37	100 (57,5)*
IR-179		3,9	97	
IR-250		6,1	59	
PD-01		8,8	37	
PZ-06-ID	2	1,3	270	77,3
IR-72		5,7	64	
IR-109		4,9	76	
IR-261		4,1	92	
CN-06	3	9,4	34	39,5
CN-01		7,6	45	
SR-01	4	14,0	18	22
PC-13-ID		11,3	26	
Valor médio geral			71,2 (53,2)*	

* Não incluindo o valor de 270 anos.

mistura (CUSTÓDIO, 1975; SIEGENTHALER et al., 1970; YURTSEVER, Y. e PAYNE, B. R., 1978). Trata-se de um modelo interpretativo que supõe o aquífero em equilíbrio e portanto com recarga igual a descarga. A recarga anual média se mantém constante e o tempo de mistura de cada fração de recarga é pequeno comparado com o tempo de renovação da água. A concentração de trítio na recarga é uma função do tempo $C_0(t)$. Esta é a chamada função de entrada e corresponde aos valores da última coluna da Tab. 3. Chamando V ao volume d'água armazenada no aquífero e $C(t)$ a função correspondente às variações de concentração de trítio neste volume, o balanço deste isótopo no aquífero pode-se expressar da seguinte forma:

$$RC_0(t) - RC(t) - \lambda VC(t) = V \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

Entradas - Saídas - Perdas = Acumulação

O termo $\lambda VC(t)$ corresponde às perdas por desintegração radioativa do trítio. Como o tempo de renovação t_R é definido pela relação $t_R = V/R$, a equação de balanço anterior toma a forma:

$$\frac{1}{t_R} [C_0(t) - C(t)] - \lambda C(t) = \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

cujas solução é:

$$C(t) = \frac{1}{t_R} \int_{-\infty}^t C_0(t') \exp \left[\left(\lambda + \frac{1}{t_R} \right) (t - t') \right] dt' \quad (4)$$

Na qual t é o tempo atual e o termo $(t - t')$ de sinal negativo representa a idade de cada uma das frações de água que compõem a mistura atual do aquífero.

Logicamente, a condição de boa mistura não se cumpre para a totalidade do aquífero, mas sim para pequenas áreas do mesmo. Se considera que cada poço é representativo de uma pequena fração do aquífero na qual se cumpre dita condição. Portanto, o valor médio dos tempos de renovação obtidos para um número elevado de poços pode ser considerado representativo do aquífero.

A forma de utilizar a equação 4 é transformando-a num somatório de N termos, sendo N igual ao número de anos transcorridos desde o início das explosões termonucleares (1952) até o momento atual. Considera-se que a contribuição ao valor de $C(t)$ das águas de recarga anteriores a 1952 ou 1955 é desprezível comparada com a contribuição da recarga dos anos seguintes. Primeiramente, fixa-se na equação 4 um valor determinado de t_R . Depois calcula-se o valor de $C(t)$ a partir do somatório obtido com todos os valores de $C_0(t')$ da última coluna da Tab. 3, correspondente a incrementos negativos de tempo $(t - t')$. O valor de λ é constante e equivale a $0,0565 \text{ anos}^{-1}$. Da mesma forma calculam-se novos valores de $C(t)$ para tempos de renovação diferentes. Os resultados obtidos nestes cálculos mostram-se na Fig. 9. A curva permite obter, diretamente, o tempo de renovação a partir dos valores de concentração obtidos em cada poço. Chega-se assim aos valores indicados nas duas

Tabela 3 — Concentrações de trítio nas precipitações de Brasília, Rio de Janeiro e área do estudo

Ano	Concentração de trítio (U.T.)				
	Brasília		Rio de Janeiro		Área do estudo
	Média anual	Período Outubro-Março	Média anual	Período Outubro-Março	Período Outubro-Março
1955	3,7		3,0		3,4
1956	12,3		10,0		11,1
1957	8,1		6,6		7,3
1958	40,3		32,7		36,5
1959	47,8		38,8		43,3
1960	12,5		10,1		11,3
1961	13,1		10,7		11,9
1962	76,1		62,3		69,5
1963	252,2		204,6		228,4
1964	152,0		123,0		137,5
1965	37,4	45,0	38,3	40,0	42,5
1966	40,4	40,8	27,2	28,9	34,8
1967	30,9	30,2	19,5	21,1	25,6
1968	33,7	31,5	24,3	21,0	26,2
1969	23,9	26,3	19,5	19,9	23,1
1970	22,7	20,6	24,0	22,4	21,5
1971	20,1	20,9	17,7	16,4	18,6
1972	17,2		13,6		15,4
1973	15,4		11,6		13,5
1974	13,1		9,8		11,4

últimas colunas da Tab. 2, dos quais podem-se fazer as considerações seguintes:

1) O poço PZ-06-ID proporciona um tempo de renovação anormalmente elevado. Isto pode ser explicado pelo fato de se tratar de um poço locado em Nova América (Fig. 6) a poucos metros do Rio Jacaré, isto é, numa zona de descarga. O poço tem um fluxo horizontal rápido (47 cm/d) no trecho compreendido entre 58 e 74 metros de profundidade. Portanto, resulta lógico que esta água seja uma das mais antigas do aquífero.

2) O tempo de renovação nas zonas 1 e 2 é maior do que nas zonas 3 e 4. Isto concorda satisfatoriamente com os resultados dos isótopos estáveis. Nas zonas 1 e 2 a água apresenta sintomas claros de evaporação prévia, o que significa um tempo de permanência maior na superfície e uma taxa de infiltração menor (vide item 4). A maior densidade e tamanho das dolinas justifica a maior recarga das zonas 3 e 4.

3) Infelizmente, o número de amostras analisadas em cada zona é muito reduzido para se ter uma boa representatividade. No entanto, utilizando estes dados e considerando para as zonas 1 e 2 um valor médio de $t_R = 67$ anos, as relações entre volume de água armazenado no aquífero e a recarga seriam:

$$\text{Zonas 1 e 2 : } V = 67 R$$

$$\text{Zona 3 : } V = 39 R$$

$$\text{Zona 4 : } V = 22 R$$

Se o volume V é expressado como espessura de lâmina de água e aceitamos, em princípio, o valor de 2 metros, indicado no item 3.2.1, os valores da recarga anual média seriam:

$$\text{Zonas 1 e 2 : } R = 31 \text{ mm/ano}$$

$$\text{Zona 3 : } R = 53 \text{ mm/ano}$$

$$\text{Zona 4 : } R = 95 \text{ mm/ano}$$

Logicamente estes valores não têm um elevado grau de exatidão, devido, principalmente, à deficiente estatística na determinação do tempo de renovação (reduzido número de poços estudados) e ao erro previsível na determinação da espessura da lâmina d'água.

No caso da zona 4, o valor da recarga ($R = 39,2$ mm/ano), obtido supondo que a fonte da Pratinha coleta quase a totalidade da água da dita zona, corresponderia, para o tempo de renovação de 22 anos, a uma espessura de lâmina de água só de 0,86 metros, equivalente a uma porosidade de 1,3% para a camada superficial de 66 metros que é difícil de aceitar levando em conta as perfilagens isotópicas realizadas nos poços. Provavelmente, acontece que a fonte da Pratinha coleta só uma parte da recarga da zona 4 (em redor de 40% da recarga).

4) Supondo que são certos os dados indicados anteriormente para a recarga e a espessura de lâmina de água, pode-se calcular o volume total d'água armazenada para o período de estiagem e a recarga total nas diferentes zonas. Chega-se assim aos seguintes resultados:

Zonas 1 e 2

$$\text{Superfície total} = 4,7 \times 10^9 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume d'água} = 9,9 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\text{Recarga total} = 1,5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Zona 3

$$\text{Superfície total} = 2,0 \times 10^9 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume d'água} = 4,3 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\text{Recarga total} = 1,0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Zona 4

$$\text{Superfície total} = 1,6 \times 10^9 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume d'água} = 3,4 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\text{Recarga total} = 1,5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Para a totalidade do aquífero, ter-se-ia um volume armazenado na época de estiagem igual a $1,75 \times 10^{10} \text{ m}^3$ e uma recarga de $4,0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$. Se aceitamos a porosidade de 0,032 indicada no item Características do fendilhamento, a elevação média máxima do nível d'água no aquífero no fim do período de recarga seria de, aproximadamente, 1,5 metros.

CONCLUSÕES A aplicação de diversas técnicas isotópicas no aquífero cárstico da região central do Estado da Bahia forneceu uma importante informação qualitativa e quantitativa sobre a dinâmica do fluxo subterrâneo. As perfilagens isotópicas dos poços demonstram que se trata de um aquífero muito pouco carstificado, encontrando-se a maior parte dos sistemas de fendas entre 5 e 35 metros de profundidade. A transmissividade do aquífero obtida através destes ensaios concorda razoavelmente com os resultados dos testes de bombeamento.

Os isótopos estáveis d'água, deutério e oxigênio-18, permitiram identificar 4 zonas do aquífero com diferentes modalidades de recarga. O excesso de deutério constitui um excelente indicador de evaporação d'água previamente a sua infiltração e foi utilizado para obter conclusões qualitativas sobre a recarga nas diferentes zonas. As subdivisões isotópicas obtidas foram de grande valor para estabelecer o esquema de fluxos no aquífero e, em linhas gerais, confirmam o esquema obtido através dos estudos piezométricos.

As medições das concentrações de trítio no aquífero permitiram a determinação do tempo de renovação da água, concluindo que as águas da zona Sul são mais jovens do que as da zona Norte, o que concorda com a textura superficial dos materiais e com os resultados correspondentes aos isótopos estáveis. O tempo de renovação, junto com o valor da porosidade estimado através das perfilagens isotópicas dos poços, permitiram o cálculo do volume d'água armazenado nas diferentes zonas do aquífero, assim como a recarga anual previsível. No entanto, esta informação é considerada como estimativa e para seu uso em outros cálculos deve ser comparada com a obtida através de outras técnicas. Para a determinação do tempo de renovação d'água utilizou-se um modelo exponencial, cuja validade deveria ser testada com posteriores análises de trítio em um número elevado de poços.

Finalmente, considera-se que as técnicas utilizadas são de grande valor para o estudo de aquíferos cársticos. Devido a que as causas de erros são muito diferentes das correspondentes às outras técnicas convencionais, a comparação dos resultados obtidos com ambos os tipos de técnicas pode reforçar profundamente a validade das conclusões.

BIBLIOGRAFIA

- CUSTÓDIO, E. e LLAMAS, M.R. — 1975 — Hidrologia Subterránea, Tomo II, Ediciones Omega S.A., Barcelona, pp. 1278-1280.
- HALLEVY, E. et al. — 1967 — Borehole Dilution Techniques: a critical review: Isotopes in Hydrology, Proc. Symp. Vienna, 1966, IAEA, Vienna, 1967.
- PLATA, A. — 1972 — Isótopos en Hidrologia, Editorial Alhambra, Madrid, 328 pp.
- SIEGENTHALER, U., OESCHGER, H. e TONGIORGI, E. — 1970 — Tritium and oxygen-18 in natural water samples from Switzerland: Isotope Hydrology, International Atomic Energy, Proc. Symp. Vienna, 1970, pp. 373-385.
- YURTSEVER, Y. e PAYNE, B.R. — 1978 — Application of environmental isotopes to groundwater investigations in Qatar: International Symposium on Isotope Hydrology, Neuherberg, Germany, Fed. Rep. of 19-23 June 1978, paper IAEA-SM-228/24.
- W.M.O. e IAEA: World Survey of isotope concentration in precipitation, Environmental Isotope Data, Volume Nºs 1, 2, 3, 4 and 5, IAEA, Vienna.

Recebido em 24 de julho de 1979.