

POR

M.F.Santiago<sup>1</sup>, A.C.Rebouças<sup>2</sup> e H.Frischkorn<sup>3</sup>

RESUMO--Um modelo isotópico, baseado nas razões  $180/160$  da água e um modelo químico, usando as concentrações do ion  $Cl^-$ , são descritos e aplicados para a determinação da evaporação e de fluxos subterrâneos que entram ou saem de açudes. Durante três anos foram estudados os açudes Péreira de Miranda e Caxitoré em Pentecostes-Ceará-Brasil (80 km a oeste de Fortaleza), localizados em rochas cristalinas de idade Precambriana. Os resultados mostram que os modelos propostos tem boa aplicabilidade, permitindo avaliar a lamina média diária perdida por evaporação direta do espelho líquido e os fluxos que se verificam através do meio subterrâneo.

### INTRODUÇÃO

As formas isotópicas mais abundantes das moléculas de água são  $H_2^{16}O$  e  $H_2^{18}O$ . Estas aparecem na natureza na proporção de aproximadamente 997.680 : 2.000, apresentando propriedades físico-químicas ligeiramente diferentes. Esta proporção sofre variações quando a água é submetida a mudanças de fase. No caso da evaporação, as moléculas  $H_2^{16}O$ , por serem relativamente mais leves, tendem a evaporar com mais facilidade do que aquelas que contêm  $^{18}O$ , produzindo-se um enriquecimento da água remanescente em isótopos mais pesados. Este fracionamento isotópico pode ser utilizado com êxito na determinação das perdas por evaporação direta do espelho líquido e os fluxos subterrâneos, uma vez que o primeiro processo muda a composição isotópica, o que não ocorre no segundo, embora ambos influenciem no volume.

O fracionamento isotópico, durante o processo de evaporação direta, foi estudado inicialmente por CRAIG & GORDON (1965) para reservatórios em atmosfera úmida e por GONFIANTINI (1965) para reservatórios com água salgada. O balanço isotópico de reservatórios, com perdas por evaporação e fluxo subterrâneo, foi estudado por STOLF et al. (1979), ALLISON (1979) e SANTIAGO (1984). Os primeiros autores consideraram que o volume de fluxo subterrâneo é proporcional ao volume evaporado; o segundo admitiu que o volume de perdas subterrâneas era também proporcional ao volume de água do reservatório; e o terceiro autor analisou o processo sem considerar qualquer proporcionalidade.

<sup>1</sup>Professor, Departamento de Física da UFC, Fortaleza

<sup>2</sup>Professor, Instituto de Geociências da USP, São Paulo

<sup>3</sup>Professor, Departamento de Hidráulica da UFC, Fortaleza

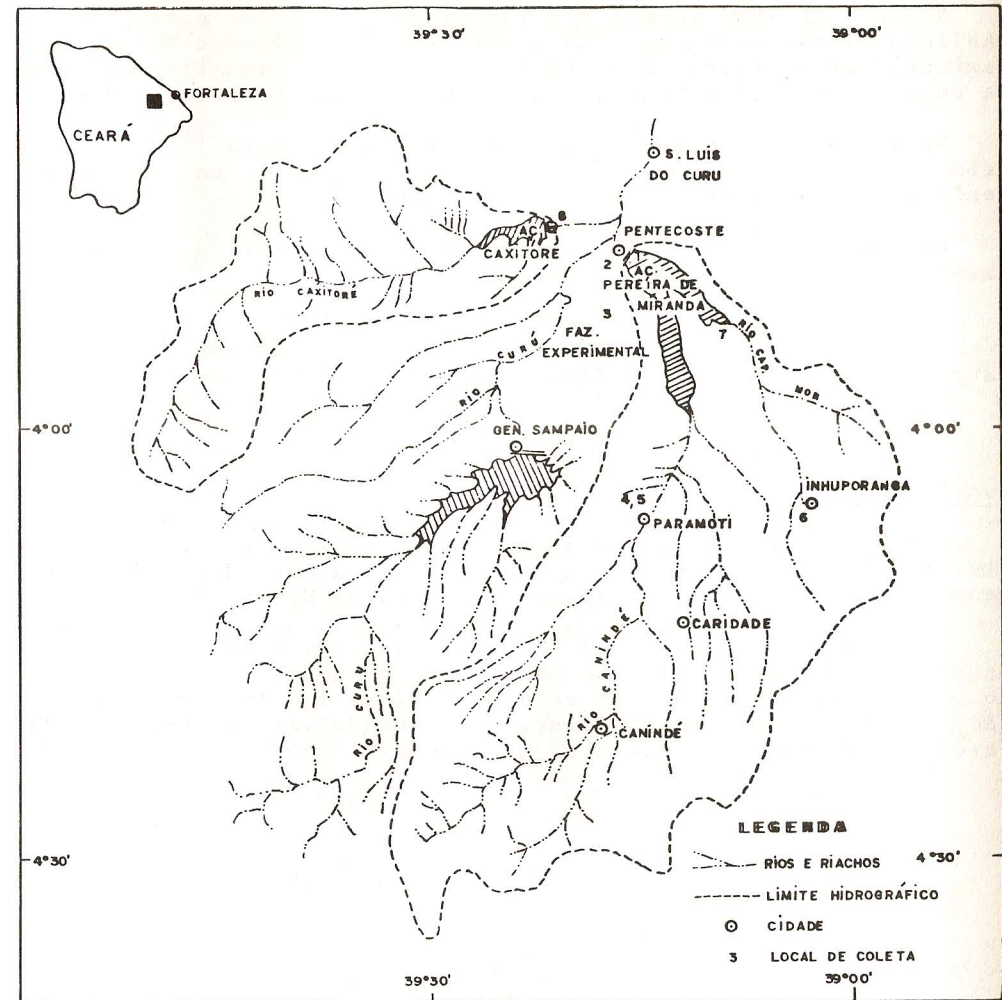


Figura 1. "Localização dos açudes estudados".

Neste trabalho, os métodos isotópicos e químico propostos por SANTIAGO (1984) foram aplicados aos açudes Pereira de Miranda e Caxitorê, em Pentecostes no Ceará, permitindo quantificar a taxa de evaporação e as perdas ou contribuições subterrâneas (Figura 1).

Em analogia ao modelo isotópico que usa a razão  $^{18}O/^{16}O$ , o modelo químico usa as variações das concentrações de um elemento, tendo sido usado, no presente caso, o íon  $Cl^-$ .

As medidas da razão  $^{18}O/^{16}O$  foram feitas por espectrometria de massa e expressas em  $\delta \%$ , onde:

$\delta \%$  =  $(R_{amostra} - R_{padrão}) / R_{padrão} \times 10^3$   
sendo R a razão  $^{18}O/^{16}O$  e o padrão é o SMOW (Standard Mean Ocean Water). As medidas de  $Cl^-$  foram feitas por método potenciométrico.

### OS MODELOS DE BALANÇO

#### Modelo isotópico

Com o objetivo de se determinar as taxas de evaporação e de fluxos subterrâneos que entram ou saem dos açudes estudados, desenvolveu-se o modelo isotópico ilustrado na Figura 2.

Neste modelo tem-se que: V: volume do reservatório;  $V_E$ : volume perdido por evaporação no período estudado;  $V_I$ : volume liberado pela tomada de água;  $V_A$ : volume do fluxo subterrâneo, considerado positivo quando entra e negativo quando sai; R,  $R_E$ ,  $R_I$  e  $R_A$ : razões isotópicas dos respectivos volumes.

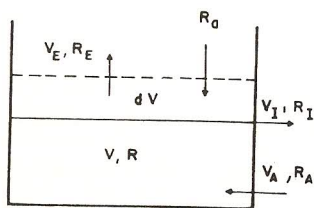


Figura 2. "Esquema dos modelos isotópico e químico".

A variação do volume V do reservatório é dada por:

$$dV = -V_E - V_I + V_A \quad (1)$$

e seu balanço isotópico pode ser assim expresso:

$$d(RV) = -R_E V_E - R_I V_I + R_A V_A \quad (2)$$

A partir das equações (1) e (2) obtêm-se:

$$V dR = (R_A - R)V_A + (R - R_E)V_E + (R - R_I)V_I \quad (3)$$

A razão isotópica de saturação, para um reservatório com perdas somente por evaporação e sem alimentação de qualquer origem, é representada por  $R_S$ . Nestas condições, define-se um fator m que é dado pela relação:

$$m = (R - R_E) / (R_S - R) \quad (4)$$

Este fator pode ser obtido experimentalmente, a partir de dados de evaporação de um tanque classe A, onde são medidas as razões isotópicas do líquido, ao longo do período de evaporação. Uma alternativa para obtenção do fator m foi proposta por CRAIG & GORDON (1965), a partir da seguinte expressão:

$$m = (h - \epsilon) / (1 - h + \Delta \epsilon) \quad (5)$$

onde h é a umidade relativa na atmosfera,  $\epsilon$  a separação isotópica, e  $\Delta \epsilon$  a separação cinética (Gonfiantini 1983).

Para um reservatório homogêneo ( $R_I = R$ ), obtém-se:

$$\frac{dR}{R_S - R} = \left[ \frac{R_A - R}{R_S - R} \right] \frac{V_A}{V} + m \left[ \frac{V_A - V_I}{V} \right] - m \frac{dV}{V} \quad (6)$$

Considerando-se V e R no intervalo de tempo para o qual a variação é linear pode-se utilizar os valores médios  $\bar{V}$  e  $\bar{R}$ . Por outro lado, estabelecendo-se que:

$$D = (R_A - \bar{R}) / (R_S - \bar{R}) \quad (7)$$

tem-se:

$$\frac{dR}{R_S - R} = \frac{V_A (D + m) - m V_I}{\bar{V}} - m \frac{dV}{V} \quad (8)$$

Integrando-se a Equação (8) para as condições de contorno inicial  $R_0$ ,  $V_0$  e final R, V tem-se:

$$\ln \left( \frac{R_S - R}{R_S - R_0} \right) = m \left[ 1 + \frac{V_I - (1 + D/m)V_A}{\bar{V} \ln(V/V_0)} \right] \ln \frac{V}{V_0} \quad (9)$$



Para efeito operacional, o primeiro produto do segundo termo da Equação (9) pode ser expresso por  $m'$ , ou seja:

$$m' = m \left[ 1 + \frac{V_I - (1 + D/m) V_A}{\bar{V} \ln (V/V_0)} \right] \quad (10)$$

Quando não há fluxo subterrâneo ( $V_A = 0$ ) e não há descarga pela tomada de água ( $V_I = 0$ ), as perdas se dão somente por evaporação. Neste caso,  $m' \approx m$ , onde  $m$  é o valor obtido no tanque classe A, conforme Equação (4) ou a partir da Equação (5).

Substituindo  $m'$  na Equação (9) e apresentando na forma exponencial obtem-se:

$$(R_S - R)/(R_S - R_0) = (V/V_0)^{m'} \quad (11)$$

Exprimindo-se as razões isotópicas da Equação (11) em termos de  $\delta \%$ , e a relação  $V/V_0$  sendo a fração,  $f$ , de volume remanescente, tem-se:

$$\delta = \delta_S + (\delta_0 - \delta_S) f^{m'} \quad (12)$$

A partir da Equação (12) pode-se, portanto, determinar o valor de  $m'$  e consequentemente, substituindo-se na Equação (10), avaliar o valor de  $V_A$ .

Considerando que as variações de volume são relativamente pequenas tem-se que:

$$\bar{V} = V_0 - \frac{dV}{2}; \quad \ln \frac{V}{V_0} \approx \frac{dV}{V_0}$$

e nestas condições, da Equação (10) obtem-se a seguinte expressão:

$$V_A = \frac{(1 - m'/m) + V_I/dV}{1 + D/m} \cdot dV \quad (13)$$

Nesta equação, quando o valor de  $V_A$  encontrado tiver sinal negativo indicará fluxo de água do reservatório através dos aquíferos subterrâneos circunvizinhos, com perdas por evaporação, pela fundação da barragem ou por qualquer outra forma de saída.

O volume perdido por evaporação do espelho líquido pode ser avaliado a partir da equação (14) que resulta da substituição do valor de  $V_A$  dado pela Equação (1) na Equação (13).

$$V_E = - \frac{m' + D (1 + V_I/dV)}{m + D} \cdot dV \quad (14)$$

#### Modelo químico

Além do modelo isotópico, utilizou-se o balanço de sais dos dois reservatórios, nas mesmas condições do modelo anterior, para

se determinar as taxas de evaporação e de perda ou de alimentação subterrânea. Considerando os símbolos utilizados na Equação (1) e que  $C$ ,  $C_A$ ,  $C_I$  e  $C_E$  são, respectivamente, as concentrações de sais na água do reservatório, da água subterrânea, da água de recarga e no vapor que sai, tem-se que:

$$d(CV) = C_A V_A - C_E V_E - C_I C_I \quad (15)$$

como  $C_E$  é geralmente desprezível e para reservatórios bem misturados  $C_I = C$ , tem-se que:

$$V dC = C_A V_A - C (V_I + V_E) \quad (16)$$

Nos reservatórios com fluxo subterrâneo e com perdas por evaporação, a relação entre os volumes inicial ( $V_0$ ) e final ( $V$ ), e as concentrações inicial ( $C_0$ ) e final ( $C$ ) pode ser assim expressa

$$V = V_0 (C_0/C)^n \quad (17)$$

O expoente  $n$  varia com as condições do reservatório, sendo igual à 1 quando há somente evaporação.

No caso geral, o volume evaporado pode ser obtido a partir das Equações (16) e (17), o que resulta na seguinte expressão:

$$V_E = \left[ 1 - \frac{C_A}{C} \right] V_A + C_0^n \cdot V_0 \frac{dC}{C^n + 1} \quad (18)$$

Neste caso, o volume de água evaporado é determinado considerando um período durante o qual a concentração variou de  $C_0$  a  $C$ , com um valor médio  $\bar{C}$  e o volume variou de  $V_0$  até  $V$ . Assim, tem-se

$$V_E = V_A \left[ 1 - \frac{C_A}{\bar{C}} \right] - \frac{dV}{n} \quad (19)$$

O volume do fluxo subterrâneo é obtido, considerando-se que a Equação (1) na Equação (19) resulta na expressão seguinte:

$$V_A = \frac{(1 - 1/n) + V_I/dV}{C_A/C} \cdot dV \quad (20)$$

Nesta equação, quando o valor de  $V_A$  encontrado tiver sinal negativo significa que há fluxo de água do reservatório para os aquíferos circunvizinhos subterrâneos, com perdas por evaporação, pela fundação ou por qualquer outra forma de saída.

#### APLICAÇÃO DOS MODELOS

Para testar os modelos propostos utilizaram-se medidas realizadas em tanques classe A e em dois açudes.

#### Resultados dos tanques classe A



Para efeito de determinação dos parâmetros básicos ( $\delta_s$  e  $m$ ) referidos nas Equações (12) e (14), foram realizadas medidas em tanques classe A, em três etapas, localizados a cerca de um quilômetro de um dos açudes estudados, sendo alimentados com água de origens diferentes: poço, açude e canal de irrigação.

Conforme ilustram os elementos da Figura 3, observa-se que os valores de  $\delta_s$  são muito semelhantes, não obstante as águas tenham composições isotópicas iniciais diferentes. Em função deste comportamento, utilizou-se a Equação (21) de CRAIG & GORDON (1965) para determinar  $\delta_a$ , isto é a composição isotópica do vapor de água da atmosfera.

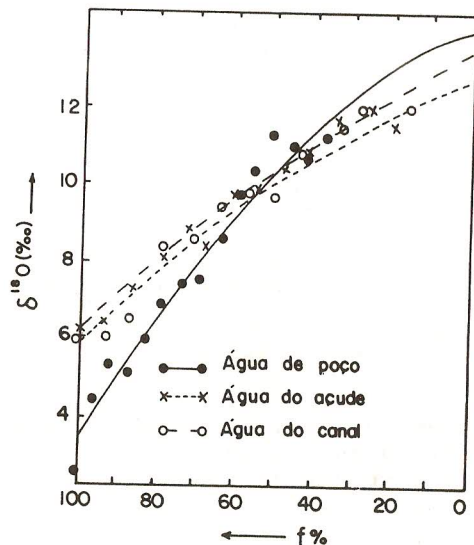


Figura 3. Relação entre  $\delta^{18}O$  e fração de volume de água residual,  $f\%$ , para tanques classe A alimentados com diferentes tipos de água.

$$\delta_a = (h - 0,015) \delta_s - 15 / h \quad (21)$$

Utilizando-se os dados experimentais na Equação (12) foram determinados os valores de  $m$  que se mostraram bastante variáveis, como se vê pelas expressões seguintes:

$$\delta^{18}O_{\text{poço}} = 14,2 - 11,1 f^{1,45} \quad (\text{Água de poço: 30/11 a 13/12/80})$$

$$\delta^{18}O_{\text{canal}} = 13,6 - 7,5 f^{0,97} \quad (\text{Água do canal: 30/11 a 20/12/83})$$

$$\delta^{18}O_{\text{açude}} = 12,8 - 6,9 f^{1,37} \quad (\text{Água do açude: 30/11 a 20/12/83})$$

Os valores de  $m$  mostrando-se muito influenciados pelos teores da unidade relativa, nos levaram a repetir as médias em tanques classe A instalados às margens do açude Pereira de Miranda.

No presente caso, o valor de  $m$  foi obtido a partir da Equação (5) tendo-se  $m = 1,71$  para valores de unidade relativa  $h = 64\%$ ,  $m = 1,64$  para  $h = 63\%$  e  $m = 1,86$  para  $h = 66\%$ . As medidas de tanque ora executadas serão objeto de uma avaliação futura para se situar o nível de consistência da Equação (5), especificamente para as condições semi-áridas da região.

#### Resultados dos açudes

A variação de  $\delta^{18}O$ , do volume  $V$ , da concentração de  $Cl^-$  e das alturas pluviométricas em função do tempo, é mostrada na Figura 4, para o açude Pereira de Miranda, e 5, para o açude Caxitoré. Os valores correspondentes foram tabelados e discutidos por SANTIAGO (1984).

A Figura 6 mostra as variações de  $\delta^{18}O$  com a fração de volume de água remanescente dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré, para os períodos de estiagem. Aplicando-se os dados experimentais de cada período na Equação (12), verifica-se, para os dois açudes, as seguintes relações:

$$\text{Pereira de } \delta^{18}O \text{ ‰} = 11,9 - 11,1 f^{0,72} \quad (\text{em 1980})$$

$$\text{Miranda } \delta^{18}O \text{ ‰} = 12,3 - 11,8 f^{0,59} \quad (\text{em 1981})$$

$$\delta^{18}O \text{ ‰} = 11,2 - 8,8 f^{0,40} \quad (\text{em 1982})$$

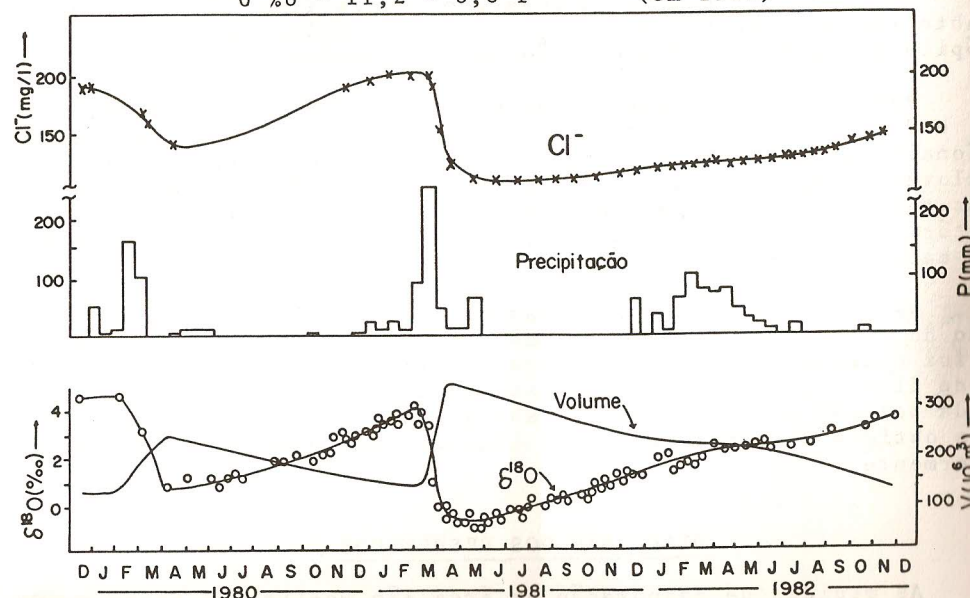


Figura 4. "Variação de  $\delta^{18}O$ , do volume  $V$ , da concentração de  $Cl^-$  e pluviometria. Açude Pereira de Miranda".



Caxitorê:

$$\delta^{18}O\text{‰} = 12,3 - 11,2 f^{0,53} \quad (\text{em } 1981)$$

$$\delta^{18}O\text{‰} = 11,9 - 9,5 f^{0,44} \quad (\text{em } 1982)$$

Estas relações permitiram obter o parâmetro  $m'$  para cada um dos açudes, nos diferentes períodos de estudo. Os valores de  $\delta^S$  para cada período foram avaliados através da Equação (21) considerando  $\delta_a = -11,8\text{‰}$  e a umidade relativa correspondente.

Com base nestes resultados foram avaliados os volumes de água evaporada e de fluxo subterrâneo dos dois reservatórios, durante os períodos de tempo que se seguem:

80a: 3/7 a 2/9/80; 80b: 3/9 a 2/11/80; 80c: 3/11 a 2/1/81; 81a: 9/7 a 8/9/81; 81b: 9/9 a 8/11/81; 81c: 9/11 a 8/1/82; 81d: 16/7 a 15/9/81; 81e: 16/9 a 15/11/81; 81f: 16/11 a 14/1/82; 82a: 18/6 a 17/8/82; 82b: 18/8 a 17/10/82; 82c: 18/10 a 3/12/82; 82d: 10/6 a 9/8/82; 82e: 10/8 a 9/10/82; 82f: 10/10 a 30/11/82.

Os valores correspondentes aos dois açudes encontram-se na Tabela 1. Na interpretação destes resultados deve-se considerar que:

1) Quando os valores de  $V_A$  têm sinal positivo, de acordo com o desenvolvimento do modelo, o reservatório recebe água subterrânea com composição isotópica igual ao valor da água subterrânea da região, que é de  $-2,35\text{‰}$ .

2) Quando  $V_A$  tem sinal negativo, significa que houve perda subterrânea e, neste caso,  $\delta^A$  deve ter o valor da composição isotópica média do reservatório no período estudado.

Para se transformar os volumes  $V_A$  e  $V_E$  em termos de lâminas  $H_A$  e  $H_E$  e poder comparar com valores obtidos pelos métodos convencionais, utilizou-se a relação área-volume dos reservatórios. Os valores de  $H_i$  foram avaliados a partir dos volumes liberados pelas tomadas de água para atender às demandas das atividades irrigatórias. O termo  $H$  representa, portanto a lâmina correspondente às saídas totais.

As concentrações de  $Cl^-$  nas águas dos dois açudes, em função do tempo, estão apresentadas nas Figuras 4 e 5. O parâmetro  $n$  foi determinado através da Equação (17) e os volumes evaporado e de fluxo subterrâneo, com base nas Equações (19) e (20), para cada período de estiagem. Na Tabela 2 são apresentados os valores obtidos e transformados em lâminas, conforme referido anteriormente.

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As medidas de evaporação na área são realizadas através de uma rede de estações evaporimétricas, equipadas com tanques Classe A e Piche e medidas de nível de água em cerca de 200 reserva-

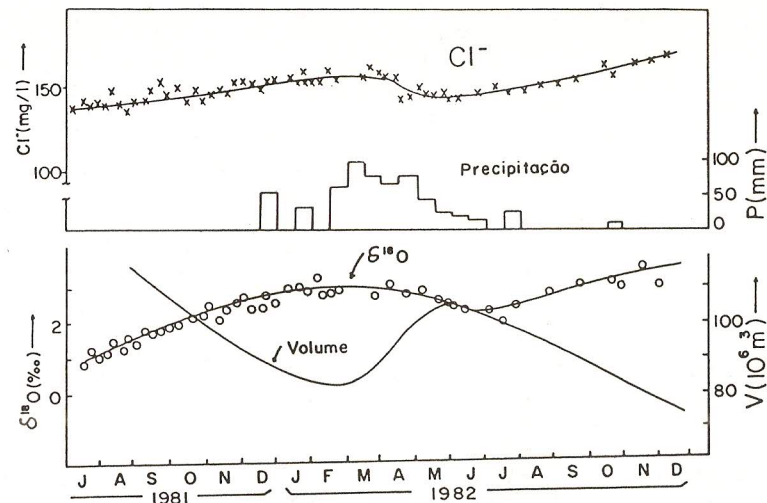


Figura 5. "Variação de  $\delta^{18}O$ , do volume  $V$ , da concentração de  $Cl^-$  e pluviometria. Açude Caxitorê".

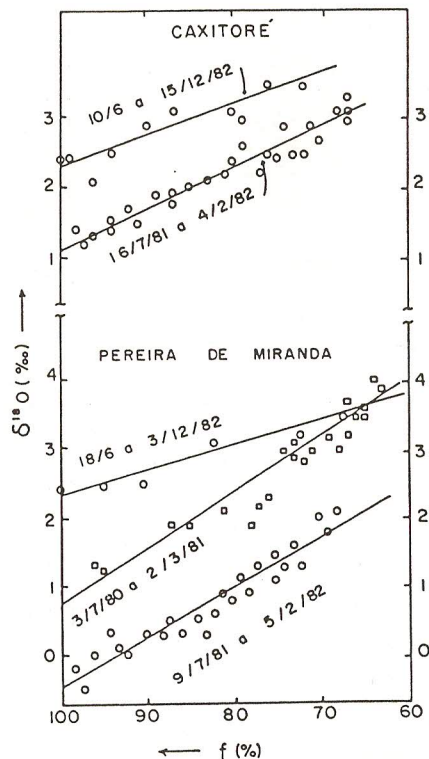


Figura 6. "Relação entre  $\delta^{18}O$  e fração de volume de água residual  $f\%$ , nos açudes Pereira de Miranda e Caxitorê".



Tabela 1. Lâminas de água evaporada e de fluxo subterrâneo determinadas pelo modelo isotópico.

Período	h (%)	m	m'	Vol(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Lâmina de água(mm/dia)				
				V <sub>A</sub>	V <sub>E</sub>	H <sub>A</sub>	H <sub>E</sub>	H <sub>I</sub>	H	
Pereira de Miranda	80 a	64	1,71	0,72	-0,7	12,6	-0,3	6,0	8,0	14,3
	80 b				+2,0	8,8	+1,0	4,6	7,4	11,0
	80 c				+2,5	7,6	+1,3	4,0	6,8	9,5
	81 a	63	1,64	0,59	-7,3	13,0	-2,5	4,5	5,5	12,5
	81 b				-6,4	11,9	-2,5	4,6	5,6	12,7
	81 c				-5,0	8,3	-2,0	3,2	5,0	10,2
	82 a	66	1,86	0,40	-7,4	6,4	-3,3	2,8	7,2	13,3
	82 b				-4,4	6,0	-2,4	3,2	9,4	14,9
	82 c				-2,0	3,4	-1,7	3,1	9,2	14,0
Caxitoré	81 d	63	1,64	0,53	-2,3	5,2	-2,4	5,4	8,7	16,5
	81 e				-1,5	4,6	-1,8	5,7	9,6	17,1
	81 f				+0,1	3,6	+0,2	4,7	9,8	14,3
	82 d	66	1,86	0,44	-3,2	2,4	-3,8	2,8	5,2	11,8
	82 e				-2,6	2,4	-3,4	3,2	6,7	13,3
	82 f				-2,1	1,9	-3,4	3,1	6,5	13,0

Tabela 2. Lâminas de água evaporada e de fluxo subterrâneo determinadas pelo método químico.

Período	C̄	1/n	Vol(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		Lâminas de água(mm/dia)				
			V <sub>A</sub>	V <sub>E</sub>	H <sub>A</sub>	H <sub>E</sub>	H <sub>I</sub>	H	
Pereira de Miranda	81 a	116	-0,384	-6,1	14,2	-2,1	4,9	5,5	12,5
	81 b			-5,5	12,8	-2,1	5,0	5,6	12,7
	81 c			-4,2	9,1	-1,6	3,6	5,0	10,2
	82 a	141	-0,329	-3,9	9,9	-1,7	4,4	7,2	13,3
	82 b			-1,2	9,2	-0,7	4,9	9,4	15,0
	82 c			-0,2	5,3	-0,2	4,6	9,2	14,0
Caxitoré	81 d	138	-0,300	-2,7	4,8	-2,8	5,0	8,7	16,5
	81 e			-1,9	4,2	-2,3	5,2	9,6	17,1
	81 f			-0,2	3,3	-0,2	4,3	9,8	14,3
	82 d	140	-0,386	-1,7	3,9	-2,0	4,6	5,2	11,8
	82 e			-1,1	3,9	-1,4	5,2	6,7	13,3
	82 f			-0,9	3,1	-1,5	5,0	6,5	13,0

tórios. Os registros das barragens mostram curtos períodos de rápido aumento de volumes e longos períodos de diminuição contínua. No presente caso, a variação de volume (Figuras 4 e 5) registrada integra todas as saídas, incluindo as descargas realizadas pela tomada de água. A avaliação das perdas por evaporação tem sido normalmente realizada através das medidas de tanques evaporimétricos e/ou atmômetros Piche, mediante a aplicação de um fator de transformação. Nesta área, o valor médio do coeficiente adotado é de 0,85 para as medidas de tanque classe A (REBOUÇAS & MARINHO - 1972) e 1,2 para as medidas de Piche (MATIAS FILHO, 1972).

As lâminas médias evaporadas nos dois açudes, assim avaliadas, são apresentadas na Tabela 3. Observa-se que os valores médios obtidos ano a ano, a partir das medidas de Piche e do tanque, são bem próximas. Nestas avaliações, as perdas por percolação subterrânea foram normalmente admitidas como desprezíveis.

Período	1980		1981		1982		Médias	
	H <sub>E1</sub>	H <sub>E2</sub>	H <sub>E1</sub>	H <sub>E2</sub>	H <sub>E1</sub>	H <sub>E2</sub>	H <sub>E1</sub>	H <sub>E2</sub>
Jul-ago	5,3	5,7	6,2	-	5,2	5,0	5,6	5,3
set-out	5,6	5,8	6,8	-	5,5	6,0	6,0	5,9
nov.dez	4,4	5,6	5,6	6,0	5,6	6,0	5,2	5,9
Médias	5,1	5,7	6,2	6,0	5,4	5,6	5,6	5,7

Tabela 3. Lâminas médias evaporadas em mm/dia dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré (BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO) H<sub>E1</sub> Piche; H<sub>E2</sub> tanque Classe A.

Os modelos isotópico e químico propostos permitem separar a componente de perda por evaporação direta do espelho líquido da perda subterrânea, e os resultados obtidos (Tabelas 1 e 2) revelam que esta não é desprezível.

A análise dos valores de H<sub>A</sub> e H<sub>E</sub> das Tabelas 1 e 2, em relação com a evolução dos volumes (Figuras 4 e 5) mostra que as perdas subterrâneas crescem na medida em que os níveis ou volumes em tocados aumentam, chegando a haver maior perda subterrânea do que evaporação, quando estes são máximos. Por exemplo, durante o ano de 1981, o período de estiagem encontrou o reservatório Pereira de Miranda sensivelmente abastecido, verificando-se, em consequência, que as perdas subterrâneas são nitidamente superiores aos valores observados no ano anterior, decrescendo na medida em que o esvaziamento progride, até se verificar contribuição quando os volumes são mínimos H<sub>A</sub> = + 1,0 e H<sub>E</sub> = + 1,3. Comportamento similar é encontrado no açude Caxitoré, tendo havido contribuição subterrânea, evidenciada pelo sinal positivo do termo H<sub>A</sub> = + 0,2, coincidente com o nível mínimo atingido no período de 1981 a janeiro de 1982.



Este comportamento é compatível com o quadro hidrogeológico e morfológico da área. Com efeito, neste domínio, as condições aquíferas estão relacionadas com a ocorrência de mantos de alteração e/ou aluviões pouco espessos, geralmente associados a fraturamentos do substrato rochoso. Isto implica que, as permeabilidades e porosidades mais importantes são restritas às zonas mais rasas e decrescem rapidamente em profundidade. Em consequência, na medida em que os reservatórios enchem, os níveis de água atingem as zonas aquíferas relativamente mais extensas, porosas e permeáveis, acarretando crescentes perdas de água. Este mecanismo é favorecido pelas características das bacias hidráulicas, cujo aspecto geral é de reservatório de pendentes extremamente suavizadas. Nestas condições, instala-se no subsolo aquífero, de composição argilo-arenosa predominantemente associada a fraturas, uma zona de saturação, cujo nível varia de sub-aflorante a pouco profundo.

Desta forma, a maior parte da água infiltrada é perdida pelos fenômenos de evaporação através do solo e uma pequena parcela pela transpiração da escassa cobertura vegetal. Estes processos não provocam fracionamento isotópico acentuado, porém influência nos volumes estocados e nos teores salinos.

Na medida em que os reservatórios têm seus volumes reduzidos, verifica-se a restituição das águas subterrâneas residuais das "vazantes", cujos teores salinos são geralmente muito altos. Os aspectos de salinização das vazantes são bem evidenciados pela formação de crostas salinas e/ou desenvolvimento de vegetação característica nos setores com deficientes condições de drenagem. Estes mecanismos de salinização são objeto de pesquisas em andamento.

Em conclusão, verifica-se que a gestão dos açudes deverá ter um compromisso de qualidade, tão importante e quiçá maior do que a tradicional preocupação com as quantidades de águas armazenadas.

O presente estudo oferece um subsídio importante para uma política de uso racional das águas do contexto semi-árido, na medida em que mostra que, as perdas por evaporação no domínio das vazantes encharcadas podem ultrapassar aquelas devido aos fenômenos de evaporação do espelho líquido, além de induzir rápida salinização dos solos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições e pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho: ao Banco do Nordeste do Brasil e à FINEP pela concessão de auxílio para a realização dos trabalhos de campo e de laboratório; à Divisão de Hidrologia do DNOCS pelos dados relativos aos reservatórios; à SUDEC e ao NUTEC pelas análises químicas, ao CEPAS-IG, USP pelo apoio em termos de infraestrutura científica e aos colegas que participaram na análise dos dados.

Agradecemos, também, ao CNPq pelo apoio através de bolsa de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- ALLISON, G.B. - Comments on the Water budget of a dam in the semiarid northeast of Brazil based on oxygen-18 and chlorine contents by Stolf and co-workers. in: Isotopes in Lake Studies. IAEA, Viena, 65-71, 1979.
- BOLETIM AGROMETEOROLÓGICO-UFC, Fortaleza, 1980, 1981, 1982.
- CRAIG, H. & GORDON, L. - Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. in: Stable Isotopes in Oceanography and Paleotemperatures. Pisa, Lab. di Geologia Nucleare, TONGIORGI, 9-130, 1965.
- CONFIANTINI, R. - Effetti isotopici nell'evaporazione di acque salate. Atti della Soc. Tosc. Sc. Nat., Pisa. Seria A-72, 1-2, 1965.
- MATIAS FILHO, J. - Evaluating selected methods for estimating evaporation in northeastern Brazil. (Tese de Mestrado - Univ. of Arizona) 1972.
- GONFIANTINI, R. - Environmental isotopes in lake studies. in: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, FRITZ, P. & FONTES, J.CH. 2nd Volume, 1983.
- REBOUÇAS, A.C. & MARINHO, M.E. - Hidrologia das Secas. Recife. SUDENE. Série Hidrogeologia, 40, 126 pp. 1972.
- SANTIAGO, M.F. - Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará. (Tese de Doutorado-USP). São Paulo, 1984.
- STOLF, R.; MENESES LEAL, L.; FRITZ, P.; SALATI, E. - Water budget of a dam in the semi-arid northeast of Brazil based on oxygen-18 and chlorine contents. in: Isotopes in Lake Studies. Viena, IAEA, 57-66, 1979.

#### ABSTRACT

Two different approaches are made: an isotope model, based on the observation of the  $^{18}O/^{16}O$  ratio of the water, and an hydrochemical model, using the  $Cl^-$  concentration, are described and applied to determine the evaporation and groundwater flow rates from or to dams. During a period of three years the dams Pereira de Miranda and Caxitoré in Pentecostes - Ceará-Brazil (8) km west of Fortaleza), located in the Precambrian crystalline rock area, were studied. The results show that the models have a good applicability, to estimate the average (daily depth of evaporation from free-water surfaces, from nearby porous media or the groundwater inflow or outflow.