

FRACIONAMENTO ISOTÓPICO DA ÁGUA (^{18}O E D) DO AÇUDE SANTO ANTÔNIO DE RUSSAS DURANTE A EVAPORAÇÃO*

M. M. F. SANTIAGO**, E. SALATI*** e E. MATSUI****

ABSTRACT Concentrations of ^{18}O and D were measured in the water from an artificial lake located in Ceará State, Brazilian Northeast, during dry seasons. The samples were collected in the periods of August to January of 1971 and August to December of 1972. The evaporation line obtained was $\delta_D = 5,0 \delta_{18O} + 0,4$. From δ_D values, the fraction of water evaporated in these periods was calculated. This evaporation rate was 26% for the first period and 33% for the second one. The comparison of these values with the limnimetric measurements obtained during the aforementioned periods showed that loss through evaporation is much heavier than through infiltration.

INTRODUÇÃO O açude Santo Antônio de Russas é um represamento no Rio Palhano, localizado na parte meridional e oriental do Estado do Ceará, numa região que se caracteriza por condições meteorológicas particulares (GEVJ-SUDENE) — Fig. 1.

A estação das chuvas, entre janeiro e junho, tem duração média de 114 dias. Nos outros meses as precipitações são raras e pouco intensas, não atingindo com poucas exceções 20 mm mensais. As precipitações, em geral, são curtas, duram algumas horas e aparecem de preferência no fim da tarde e à noite. Um estudo das precipitações, feito a partir de 1918, mostrou que há um ano de seca em cada onze anos. A seca se caracteriza pela

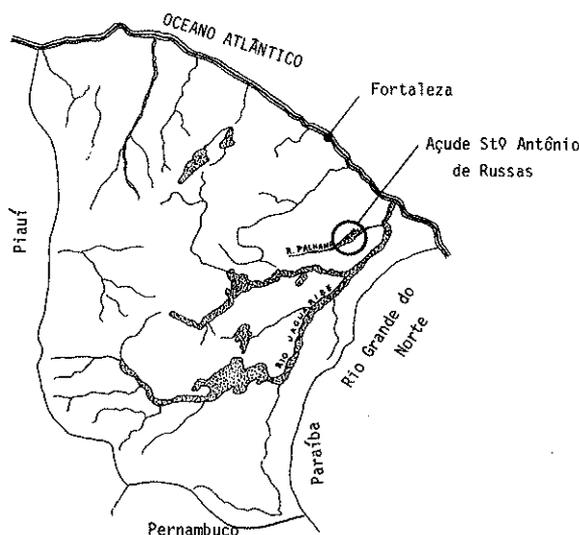


Figura 1 — Localização do açude Santo Antônio de Russas (CE)

*Trabalho realizado com o auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 67/577) e da Comissão Nacional de Energia Nuclear

**Instituto de Física da Universidade Federal do Ceará

***Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CNEN-USP

****Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CNEN

diminuição das precipitações durante a estação das chuvas quando em geral a média mensal torna-se inferior a 60 mm, ou, ainda, pela curta duração do período de chuvas que, embora intensas, não atinge 40 dias.

Nesta região a temperatura média anual é de 28 °C, sendo a máxima de 36 °C e a mínima de 24 °C. A umidade relativa média oscila, das estações secas para as mais chuvosas, entre um mínimo de 55% em outubro e um máximo de 70% a 75% em março-abril.

A barragem do açude é feita de terra e foi construída em 1928 com três sangradores e um canal para tomada de água. Sua capacidade máxima é de $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ com um volume morto de $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, inundando uma área de 10 218 000 m^2 . No início do estudo, em 17 de agosto de 1971, o reservatório tinha um volume aproximado de 25 065 300 m^3 de água.

Iniciou-se em agosto de 1971 um estudo procurando correlacionar a evaporação desse açude com as variações das concentrações de deutério e oxigênio-18, variações estas devidas às diferenças entre as tensões de vapor e dos coeficientes de difusão no ar das espécies moleculares H_2^{16}O , H_2^{18}O e HD^{16}O (CRAIG *et al.*, 1965; MERLIVAT, 1970). Este trabalho representou a segunda etapa de um plano de pesquisa sobre evaporação e fracionamento isotópico da água realizada no CENA sob os auspícios da CNEN e da FAPESP. Na primeira etapa, estudou-se a evaporação em condições naturais, utilizando-se tanques de evaporação classe A e, pelos resultados, verificou-se ser possível aplicarem-se equações teóricas, relacionando-se a taxa de evaporação com as concentrações de D e ^{18}O da água residual (SANTIAGO *et al.*, 1973). Este trabalho corroborou com os desenvolvidos por CRAIG *et al.*, 1965; EHHALT *et al.*, 1965; ERIKSSON, 1965; DINCER, 1968; CONFIANTINI, 1965; e MERLIVAT, 1970.

Nesta segunda etapa, são apresentados os dados das concentrações isotópicas do açude Santo Antônio de Russas nos períodos de seca de 1971 e 1972.

MATERIAL E MÉTODO As amostras foram coletadas no açude Santo Antônio de Russas, localizado no Estado do Ceará. As coletas foram feitas em duas séries: a primeira, de agosto a dezembro de 1971 e, a segunda, de agosto a dezembro de 1972. Nesses períodos, o rio onde o açude é represado estava seco. Foram escolhidas três localidades diferentes e duas profundidades, 0,5 m e 1 m e a coleta foi feita de 15 em 15 dias.

As concentrações de ^{18}O e D foram medidas por espectrometria de massa, segundo as técnicas desenvolvidas por McKINNEY *et al.*, 1950; EPSTEIN, 1953; FRIEDMAN, 1953; MATSUI *et al.*, 1971. Os dados estão expressos em relação a um padrão definido por CRAIG, 1961, utilizado internacionalmente e denominado *SMOW* (Standard Mean Ocean Water), assim:

$$\delta_{18\text{O}}(\text{‰}) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ amostra} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ SMOW}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ SMOW}} \times 10^3$$

$$\delta_{\text{D}}(\text{‰}) = \frac{(\text{D}/\text{H}) \text{ amostra} - (\text{D}/\text{H}) \text{ SMOW}}{(\text{D}/\text{H}) \text{ SMOW}} \times 10^3$$

ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS **CONCENTRAÇÃO ISOTÓPICA DA ÁGUA DO AÇUDE** As amostras foram coletadas em três localidades distintas nas alturas de 0,5 m e 1 m, cujos resultados de análise isotópica encontram-se na Tab. I. Análises das amostras de água coletadas em 30 de novembro de 1971 em profundidades até 3,5 m mostraram perfeita homogeneidade vertical quanto à composição isotópica.

Tabela I – Concentração de deutério e oxigênio-18 nas amostras do açude Santo Antônio de Russas, coletadas em três localidades e em duas profundidades diferentes

Profundidade	1/2 m			1,0 m		
	margem direita	margem esquerda	centro	margem direita	margem esquerda	centro
1971	$\delta_D (^{\circ}/\text{oo}) \pm 2$					
17 - 8	- 2	- 2	- 3	- 4	0	- 2
1 - 9	0	0	0	- 3	- 2	- 2
16 - 9	1	1	1	0	0	1
1 - 10	3	1	2	3	3	3
16 - 10	4	3	4	5	4	6
31 - 10	4	-	3	6	5	3
15 - 11	7	8	9	8	9	7
30 - 11	9	9	10	10	9	9
15 - 12	9	9	10	10	11	10
30 - 12	11	12	11	10	11	12
1971	$\delta_{18O} (^{\circ}/\text{oo}) \pm 0,2$					
17 - 8	- 0,6	- 0,8	- 0,8	- 0,7	- 0,8	- 0,7
1 - 9	- 0,1	- 0,4	- 0,5	- 0,2	- 0,3	- 0,2
16 - 9	0,3	0,1	0,1	- 1,1	0,2	- 0,1
1 - 10	0,5	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3
16 - 10	0,9	0,8	0,7	0,7	1,0	0,8
31 - 11	1,1	-	1,0	1,0	1,0	1,0
15 - 11	1,3	1,6	1,4	1,6	1,5	1,4
30 - 11	1,6	1,7	1,6	1,6	1,7	1,5
15 - 12	1,8	2,0	1,9	2,2	2,3	2,0
30 - 12	2,3	2,4	2,0	2,2	2,0	2,3

Pelos dados da Tab. II, que representam as médias dos valores de diversos pontos, representados esquematicamente na Fig. 2, pode-se ver que no primeiro período os valores de δ_{18} variaram desde $-0,7^{\circ}/\text{oo}$ a $2,2^{\circ}/\text{oo}$ e os de δ_D desde $-2^{\circ}/\text{oo}$ a $11^{\circ}/\text{oo}$. No segundo período, essas variações foram de $3,0^{\circ}/\text{oo}$ a $5,0^{\circ}/\text{oo}$ e de $16^{\circ}/\text{oo}$ a $25^{\circ}/\text{oo}$, respectivamente para δ_{18} e δ_D .

Os valores de δ_{18O} e δ_D em agosto de 1972 já estavam maiores do que em dezembro de 1971. Isto se deve ao fato de a recarga do açude não ter atingido o nível anterior que pode ser visto na Tab. II, onde estão indicados também os níveis da água. Espera-se que em anos mais chuvosos volte-se às condições iniciais semelhantes às de agosto de 1971. No entanto, pode-se ver pela Fig. 3 que a tendência geral das linhas de evaporação são as mesmas.

Tabela II – Valores médios da concentração de deutério e oxigênio-18 das amostras de água do açude Santo Antônio de Russas; h é a altura de água medida com um limnômetro

D a t a	h (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δ_{D} (‰)
1971			
17 - ago	10,59	- 0,7	- 2
01 - set	10,50	- 0,3	- 1
16 - set	10,38	0,2	0
01 - out	10,24	0,4	2
16 - out	10,17	0,8	4
30 - out	10,08	1,1	5
15 - nov	9,99	1,4	8
30 - nov	9,89	1,6	9
15 - dez	9,62	2,0	10
30 - dez	9,54	2,2	11
1972			
13 - ago	9,35	3,0	16
26 - ago	9,29	3,1	17
10 - set	9,20	3,3	18
24 - set	9,09	3,6	17
07 - out	8,98	3,9	19
22 - out	8,86	4,1	21
29 - dez	8,38	5,0	25

RELAÇÃO $\delta_{\text{D}} - \delta^{18}\text{O}$ Com os valores de deutério e oxigênio-18 das amostras de água do açude (Tab. II), obtém-se a reta:

$$\delta_{\text{D}} = 4,8 \delta^{18}\text{O} + 0,4$$

para o período de agosto a janeiro de 1972 e

$$\delta_{\text{D}} = 4,3 \delta^{18}\text{O} + 3,0$$

para o período de agosto a dezembro de 1972.

Esses valores são comparados na Fig. 3 com a expressão:

$$\delta_{\text{D}} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

obtida por CRAIG, 1961-a, para amostras de várias origens e por SALATI *et al.*, 1971, para amostras de precipitações no Nordeste do Brasil.

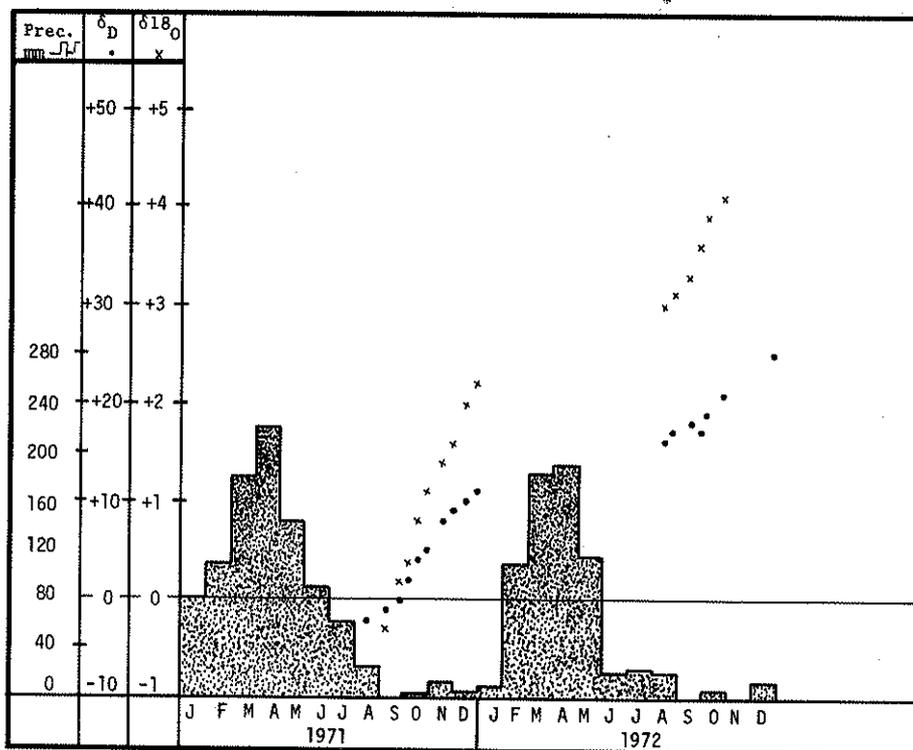


Figura 2 — Valores de δ_D e $\delta^{18}O$ para águas do açude Santo Antônio de Russas e totais mensais das precipitações na região

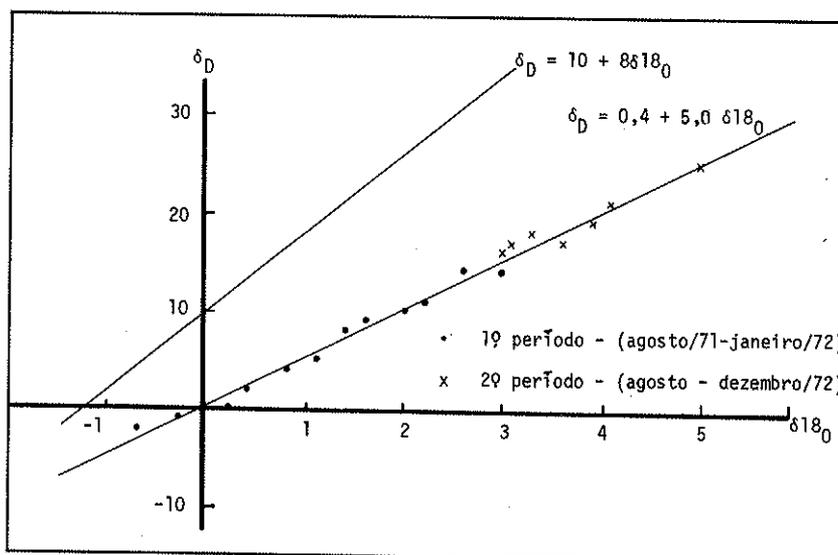


Figura 3 — Relação entre $\delta^{18}O$ e δ_D para águas do açude Santo Antônio de Russas (CE)

Comparando-se estatisticamente as duas primeiras equações pode-se considerar que os coeficientes angulares não são diferentes. Desse modo, a relação geral para os dois períodos de amostragem é:

$$\delta_D = 5,0 \delta_{18O} + 0,4,$$

sendo que esta expressão poderá ser utilizada para lagos de outras regiões do Nordeste brasileiro com as mesmas características e condições climáticas no período estudado (GAT e DANSGAARD, 1972).

ESTIMATIVA DA TAXA DE EVAPORAÇÃO Como nos períodos estudados não houve precipitação ou esta foi muito pequena, e como os rios formadores do açude estavam sem água, utilizamos para calcular a concentração isotópica da água remanescente a expressão abaixo (SANTIAGO *et al.*, 1973):

$$\delta_L = \delta_L^o + \delta'(1-f^A) \quad (1)$$

sendo,

$$\delta' = \frac{B}{A} (\delta_a + 1) - (\delta_L^o + 1)$$

com:

$$A = \frac{(1/\alpha)(D'/D)^{1/2} - (1-u)}{(1-u)} \quad \text{e} \quad B = \frac{u(D'/D)^{1/2}}{(1-u)}$$

onde δ_L é o valor de δ para o líquido;

δ_L^o é o valor de δ_L inicial;

δ_a , δ para o vapor de água na atmosfera;

α o coeficiente de fracionamento líquido-vapor em equilíbrio;

u , a umidade relativa média;

D/D' , a razão entre os coeficientes de difusão de $H_2^{16}O$ e $H_2^{18}O$ (ou HDO) no ar;

f , a fração do líquido remanescente.

Da Eq. (1) tem-se:

$$f = \exp \left[\frac{1}{A} \ln \left(\frac{\delta_L^o - \delta_L}{\delta'} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

Tabela III – Volume de água do açude em metro cúbico. f é a fração de água residual

D a t a	V (m ³)	f%
1971		
17 - ago	25 065 300	100
30 - dez	17 938 000	71
1972		
13 - ago	15 440 200	100
29 - dez	10 013 800	65

Utilizando-se a Eq. (2), os valores de δ_D da Tab. II, umidade relativa de 60%, teor de deutério do vapor de água $\delta_a = -80\text{‰}$, e $\alpha_D (28^\circ\text{C}) = 1,078$, obteve-se no primeiro período $f = 74\%$ e no segundo período $f = 67\%$. Ou seja, a evaporação de 26% e 33%, respectivamente.

Comparando esses dados com os da Tab. III pode-se verificar estar este método em boa concordância com os dados de medida direta de evaporação.

CONCLUSÕES A linha de evaporação do Açude Santo Antônio de Russas foi de $\delta_D = 5,0 \delta_{18O} + 0,4$ no período das secas.

Pode-se determinar a taxa de evaporação de um açude sem recarga, com precisão relativamente boa, por meio de medidas de composição isotópica da água do mesmo, do vapor de água do ar, da umidade relativa do ar e da temperatura da água do açude no período considerado. Conhecendo-se o decréscimo do volume de água do reservatório no mesmo período, poderá ser estimada a taxa de infiltração subterrânea.

BIBLIOGRAFIA

- CRAIG, H. — 1961-a. — Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Science*, **133**: 1702-1703
- CRAIG, H. — 1961-b — Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters, *Science*, **133**: 1833-1834
- CRAIG, H. e GORDON, L. I. — 1965 — Deuterium and Oxygen-18 Variations in the Ocean and Paleo Temperatures, *Lab. di Geologia Nucleare, Pisa*, 1-98
- DINCER, T. — 1968 — The Use of O-18 and Deuterium Concentrations in the Balance of Lakes, *Water. Resour. Res.*, **4** (6): 1289-1305
- EHHALT, D. e KNOTT, K. — 1965 — Kinetische Isotopentrennung bei der Verdampfung von Wasser, *Tellus*, **17** (3): 389-397
- EHHALT, D. — 1969 — On the Deuterium Salinity Relationship in the Baltic Sea, *Tellus*, **21** (3): 429-435
- EPSTEIN, S. e MAYEDA, T. — 1953 — Variations of the Oxygen-18 Content of Water from Natural Sources, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4** (5): 213-224
- ERIKSSON, E. — 1965 — Deuterium and Oxygen-18 in the Precipitation and other Natural Waters, Some Theoretical Consideration and *Tellus*, **17** (4): 498-512
- FRIEDMAN, I. — 1953 — Deuterium Content of Natural Waters and Others Substances, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4** (2): 89-103
- GEVJ-SUDENE — Monografia Hidrológica do Vale do Jaguaribe
- GONFIANTINI, R. — 1965 — Effetti Isotopici nell' evaporazione di acque salate. *Atti Della Soc. Tosc. Sc. Nat.* **LXXII** (a): 1-22
- MATSUI, E. *et al.* — 1971 — Medida da Variação Natural da Relação D/H em Amostras de Água, Publicação do CENA, BC-001
- McKINNEY, C. *et al.* — 1950 — Improvements in Mass Spectrometers for the Measurement of Small Difference in Isotope Abundance Ratios, *Rev. of Sc. Inst.*, **21** (8): 724-730
- MERLIVAT, L. — 1970 — Problèmes Liés à l'Étude Quantitative de Bilans de Lacs à l'Aide des Concentrations en Deuterium et Oxygen-18 dans l'Eaux, *Rapport CEA Conf. n° 1 538*
- SALATI, E. *et al.* — 1971 — Estudos Preliminares das Concentrações de O-18 e D em Águas do Nordeste Brasileiro, Publicação do CENA, BC-002
- SANTIAGO, M. M. F., MATSUI, E. e SALATI, E. — 1973 — Enriquecimento Isotópico durante Evaporação de Água em Condições Naturais em Tanques Classes A, Publicação do CENA, BC-011