

EVAPORAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NA BACIA DA GAMELEIRA, MUNICÍPIO DE AIUABA/CE

Lucilene Pereira¹ Marlúcia Freitas Santiago¹, Horst Frischkorn², José Carlos de Araújo³, Josué Mendes Filho¹, Maria do Rosário Zucchi⁴ & Andréa Sousa Fontes⁵

RESUMO --- Medidas dos isótopos ambientais (^{18}O e ^2H), realizadas em três cacimbas e no Açude do Boqueirão localizados na Bacia da Gameleira, município de Aiuaba/CE, foram utilizadas no estudo da evaporação. Um modelo isotópico foi aplicado para avaliar a taxa de evaporação no Açude do Boqueirão. As retas de correlação $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ para as amostras das cacimbas e do açude apresentaram coeficientes angulares de 4,81 e 4,64, respectivamente, indicando intensa evaporação. O modelo isotópico identificou que, no período de três meses de amostragem, houve elevada perda d'água por evaporação no açude, em média de 62%.

ABSTRACT --- Environmental isotopes ^{18}O and ^2H were measured for a study of evaporation in the waters from three dug wells and the Boqueirão dam, located in the Gameleira Basin, in the township of Aiuaba/CE. An isotope model was applied for assessing the rate of evaporation in the Boqueirão dam. Regression lines $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ for the wells and the dam show slopes of 4.81 e 4.64, respectively, indicating intense evaporation. The isotope model indicates a mean evaporation loss of 62 % during a three months period.

Palavras-Chave: evaporação, isótopos ambientais, semi-árido.

¹ UFC, Depto. de Física, Campus do Pici, Cx. Postal 6030, Fortaleza/CE. Email: lucilene@fisica.ufc.br; marlucia@fisica.ufc.br; josue@fisica.ufc.br

² UFC, Depto. Eng. Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici - Caixa Postal 6006, Fortaleza/CE. E-mail: cariri@ufc.br

³ UFC, Depto. Eng. Agrícola, Campus do Pici – Bloco 804, Fortaleza/CE. E-mail: jcaraujo@ufc.br

⁴ UNIVASF, Juazeiro/BA, Email: maria.zucchi@gmail.com

⁵ UFBA, Depto. de Geofísica, Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA), Salvador/BA. Email: asfontes@ufba.br

1 – INTRODUÇÃO

No Brasil as altas taxas de evaporação, chegando a representar 92% do volume precipitado anual médio, são as maiores causas das perdas de recursos hídricos. Estudos realizados no semi-árido estimam que cerca de 40% das águas acumuladas em reservatórios se perdem com a evaporação (SUASSUNA, 2002).

Na região semi-árida do Nordeste do Brasil a situação do abastecimento de água é grave pelas condições climáticas, insuficiência e má distribuição interanual das chuvas, e características fisiográficas; também pelas perdas por evaporação das águas dos reservatórios superficiais e pela dificuldade ao acesso à água de qualidade para o consumo humano, pois muitas vezes, as fontes de água potável existentes no semi-árido estão situadas a alguns quilômetros de distância das residências.

Na região dos Inhamuns, semi-árido cearense, onde está inserida a Bacia da Gameleira, no município de Aiuaba, o déficit hídrico é de aproximadamente 1000 mm/ano (ARAÚJO *et al.*, 2002), o que torna muito importante as formas de proteção quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos. Como o potencial hídrico desta área é baixo, somente o manejo adequado destes recursos permite criar reservas estratégicas para o abastecimento de pequenas comunidades em longos períodos de estiagem.

O uso de traçadores isotópicos tem sido sugerido como método potencial para calibração de modelos climáticos e para quantificar perdas de água por evaporação e infiltração de reservatórios. Nas quatro últimas décadas, eles têm sido utilizados, com muito êxito, como uma das ferramentas não convencionais no estudo das reservas hídricas superficiais e subterrâneas. Muitos estudos têm sido realizados para quantificar as perdas por evaporação e infiltração utilizando modelos de balanços de massa e de isótopos, como por exemplo, em SANTIAGO *et al.*, (1975); STOLF *et al.*, (1979); GIBSON, (2001); entre outros.

Neste trabalho, foi estudado o processo de evaporação na Bacia da Gameleira, através de medidas isotópicas em cacimbas próximas à bacia e no Açude do Boqueirão foi avaliado as perdas utilizando um modelo de balanço de massa e de isótopos durante o período seco.

2 - ÁREA DE TRABALHO

O município de Aiuaba situa-se na região dos Inhamuns, a sudoeste do Estado do Ceará, a uma altitude média de 466 m, ocupando uma área de 24171,6 km² (TCM, 2003). Nele encontra-se a Estação Ecológica de Aiuaba, com área de 115,3 km², onde está inserida a Bacia Experimental da Gameleira com área de aproximadamente 12 km² e perímetro de 15,22 km. A área de trabalho está localizada entre as coordenadas: 06°35' - 06°46' S e 40°07' - 40°20' W (Figura 1).

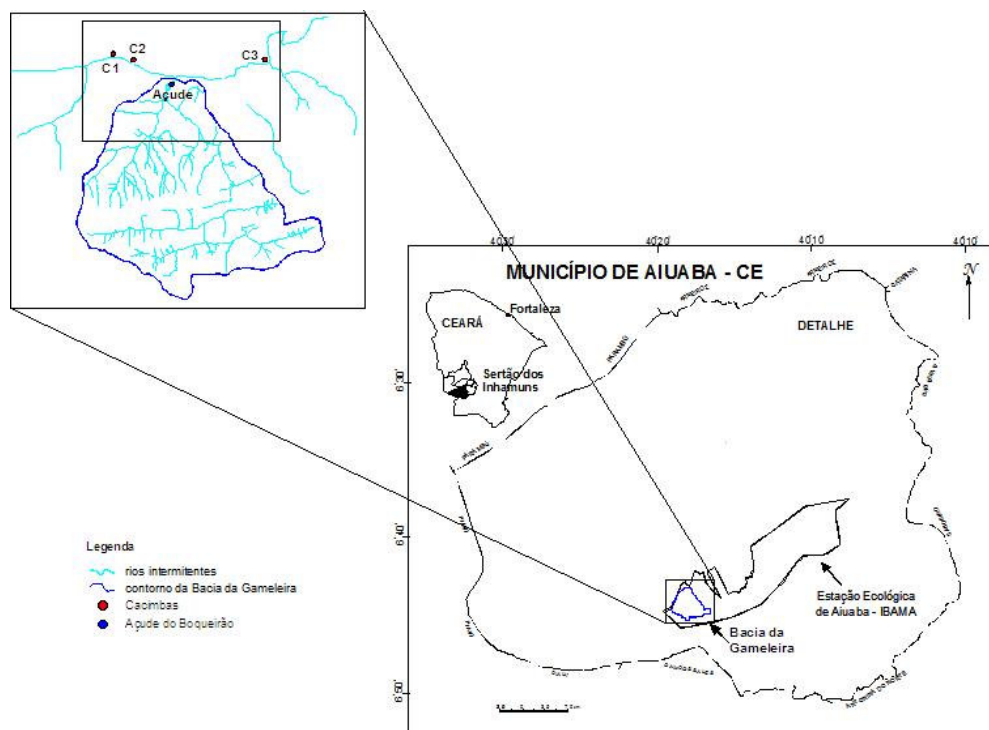


Figura 1 – Localização da Bacia da Gameleira, Aiuaba – CE e dos pontos de amostragem.

Segundo Köppen, a região é de Clima Seco, tipo B, quente e semi-árido. A temperatura média é de 24,5 °C para o período mais frio (junho-julho) e 27,8 °C para o mais quente (novembro-dezembro). O ar é seco, apresentando umidade relativa média anual de 61,6 %, com o mínimo de 44,0 % no mês de setembro (DNMET, 1992).

A geologia da bacia é dividida em Suíte Granitóide Serra do Deserto, constituída de augenortognaisses graníticos, biotita e hornblenda, e em Formação Santarém, que compreende uma seqüência constituída de intercalações de quartzitos, filitos e calcários.

Os solos da Bacia da Gameleira são do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, predominando minerais argilosos do grupo 1/1, Podzólico Vermelho-Amarelo raso, constituído de filitos e

quartzitos, e Solos Litólicos, constituídos de substrato filito-quartzito e gnaisses, cascalhos e afloramento de rocha.

3 - METODOLOGIA

A amostragem para análise isotópica foi feita em cacimbas, localizadas próximas à bacia e para o cálculo da taxa de evaporação, foi feita por coletas diárias em um Tanque Classe A (localizado a 200 m do açude) e coletas semanais no Açude do Boqueirão durante o período de estiagem. Assim, condições climáticas são as mesmas tanto para o tanque quanto para o açude, e as medidas dos parâmetros como temperatura e umidade relativa do ar não necessitaram correções.

As amostras foram armazenadas em frascos de 50 mL, lacradas com parafina para evitar o fracionamento isotópico por evaporação.

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA) da UFBA, que utiliza um Espectrômetro de Massa - Finnigan MAT Delta Plus e reator automático H-Device Thermo Quest Finnigan, específico para a análise das razões de O^{18}/O^{16} e de $^2H/H$. A precisão das medidas para $\delta^{18}O$ é de $\pm 0,1\%$ e para δ^2H é de $\pm 1 \%$.

4 - MODELO ISOTÓPICO

Os isótopos estáveis, oxigênio-18 e deutério, são partes integrantes da molécula de água e, por isso, traçadores naturais ideais para estudos na Hidrologia. Os resultados das medidas destes isótopos são expressas como razão, R, entre cada um deles e o isótopo mais abundante (O^{18}/O^{16} e D/H) em relação a um padrão internacional e expressas em $\delta\%$, definido como,

$$\delta(\%) = \frac{R_a - R_p}{R_p} \times 10^3 \quad (1)$$

onde, R_a ($^{18}O/^{16}O$ ou $^2H/^1H$) é a razão do isótopo pesado em relação ao isótopo leve na amostra e R_p é esta razão em um padrão.

Atualmente, o padrão utilizado para medidas de oxigênio-18 e de deutério é VSMOW - Vienna - Standard Mean Ocean Water (GONFIANTINI, 1981), que é uma amostra de água obtida pela mistura de água destilada do Oceano Pacífico com pequenas quantidades de outras águas para

ajustar as razões isotópicas do oxigênio-18 e do deutério aos valores do SMOW, o primeiro padrão usado por CRAIG (1961a).

Em 1961, CRAIG (1961b) observou que o oxigênio-18 e o deutério nas águas naturais mundiais guardam uma relação previsível, embora seja complexo o ciclo hidrológico. Esta relação é conhecida como Reta Meteorica Mundial e, em dados atuais (ROZANSKI *et al.*, 1993), é expressa por:

$$\delta^2\text{H} = (8,17 \pm 0,07) \delta^{18}\text{O} + (11,27 \pm 0,65) (\text{‰}) \text{ (VSMOW)} \quad (2)$$

Águas que apresentam reta com coeficiente angular menor que 8 indicam que houve evaporação cinética (de não equilíbrio entre o vapor e água), sendo a temperatura o principal fator que controla os processos de mudanças na composição isotópica.

No processo de evaporação, o vapor fica mais pobre em isótopos pesados e o líquido remanescente mais enriquecido. Um modelo que calcula o empobrecimento de isótopos pesados nas nuvens em função da quantidade de chuvas é o *modelo de destilação de Rayleigh* para o processo que ocorre quando o vapor que deixa o líquido é removido da interface vapor/líquido; então, a composição isotópica do vapor remanescente dependerá somente da fração de volume restante e do fator de fracionamento em equilíbrio líquido-vapor. A lei de destilação de Rayleigh é:

$$\delta = \delta_o + (\delta_o + 1)(f^{(\alpha-1)} - 1) \quad (3)$$

δ_o : o valor inicial de δ da água (^{18}O ou ^2H);

α : o coeficiente de fracionamento isotópico;

f: fração de líquido remanescente.

Quando a umidade do ar não é nula, a condensação do vapor d'água da atmosfera compensa parcialmente a mudança na concentração isotópica pela evaporação fazendo com que o reservatório atinja uma composição isotópica estacionária (saturada) dependendo da umidade relativa do ar. Neste caso a equação que rege o processo é:

$$\delta = \delta_s + (\delta_o - \delta_s)f^m \quad (4)$$

Sendo, δ_s e m funções da umidade relativa e da temperatura através do coeficiente de fracionamento isotópico em equilíbrio líquido-vapor α^* (SANTIAGO, 1984).

Os cálculos das perdas por evaporação no Açude do Boqueirão foram feitos considerando que, no período seco, o açude não teve recarga e nem tomada d'água, as perdas são devidas somente à evaporação e à infiltração. A Figura 2 mostra um esquema desses processos no açude.

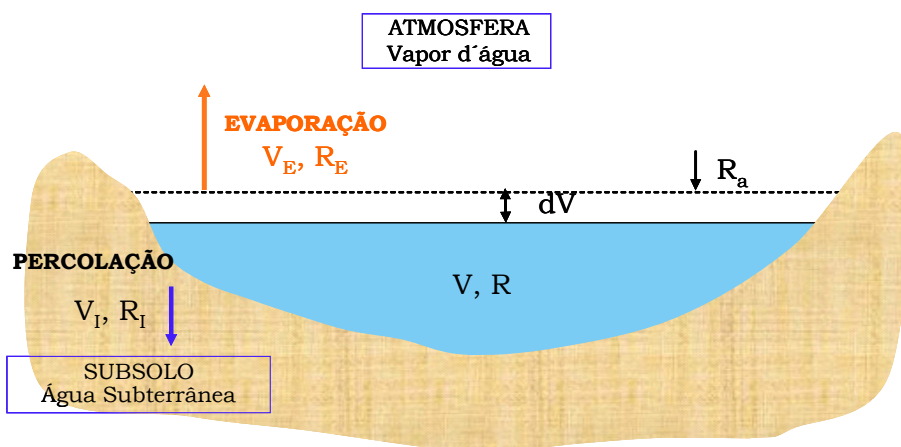


Figura 2 - Esquema dos processos de perdas por evaporação e por infiltração no açude (período seco).

onde,

V_E, V_I : Volumes perdidos por evaporação e por infiltração, respectivamente;

R_E, R_I : Razões isotópicas ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/\text{H}$) no evaporado e na água infiltrada.

Quando a umidade relativa não é nula e o reservatório perde água por evaporação e infiltração, os balanços de massa e isotópico levam à equação (SANTIAGO, 1984):

$$\delta' = \delta_s' + (\delta_o' - \delta_s')f'^m \quad (5)$$

Sendo os valores de δ' e f' são medidos no açude. Neste caso, o volume evaporado é dado por:

$$V_E = \left[\left(1 - \frac{m'}{m} \right) \frac{\bar{V}}{V_o} - 1 \right] dV \quad (6)$$

A fração do volume evaporado é:

$$f_E' = \frac{V_E'}{V_o'} \quad (7)$$

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ no Açude do Boqueirão e nas cacimbas. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$, para o açude, estiveram entre de 14,8 ‰ a 18,8 ‰ e para as cacimbas, entre 0,41 ‰ e -3,61 ‰. Para o deutério, as faixas foram de 61,13 ‰ a 79,92 ‰ e de -6,45 ‰ a -26,41 ‰, respectivamente. As correlações entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, para as amostras do açude e das cacimbas, apresentaram as equações $\delta^2\text{H} = 4,64\delta^{18}\text{O} - 6,36$ e $\delta^2\text{H} = 4,81\delta^{18}\text{O} - 7,18$, respectivamente (Figura 3). Essas retas apresentaram coeficientes angulares menores que ao da Reta Meteórica Mundial, indicando que as amostras sofreram intensa evaporação.

Tabela 1 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras do Açude do Boqueirão e das cacimbas.

Açude do Boqueirão		Cacimbas		
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Nome	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
14,8	61,13	C1	-3,61	-26,41
15,4	65,61		-1,43	-12,02
15,8	66,51		-1,4	-13,18
15,9	68,31		0,41	-6,45
16,5	69,64		-0,39	-8,76
16,8	71,25		-0,38	-10,21
17,2	73,56		-0,06	-6,97
17,5	75,14		-3,45	-23,42
17,8	76,88		-3,57	-24,03
17,9	77,53		-0,39	-8,76
18,2	78,44	C2	-0,38	-10,21
18,3	78,86		-0,06	-6,97
18,8	79,54	C3	-3,45	-23,42
18,8	79,92		-3,57	-24,03

Observa-se na Figura 3 que as amostras do açude sofreram maior evaporação do que as amostras das cacimbas, mesmo apresentando retas com coeficientes angulares aproximados. Essas retas distinguiram bem as águas superficiais das águas subterrâneas.

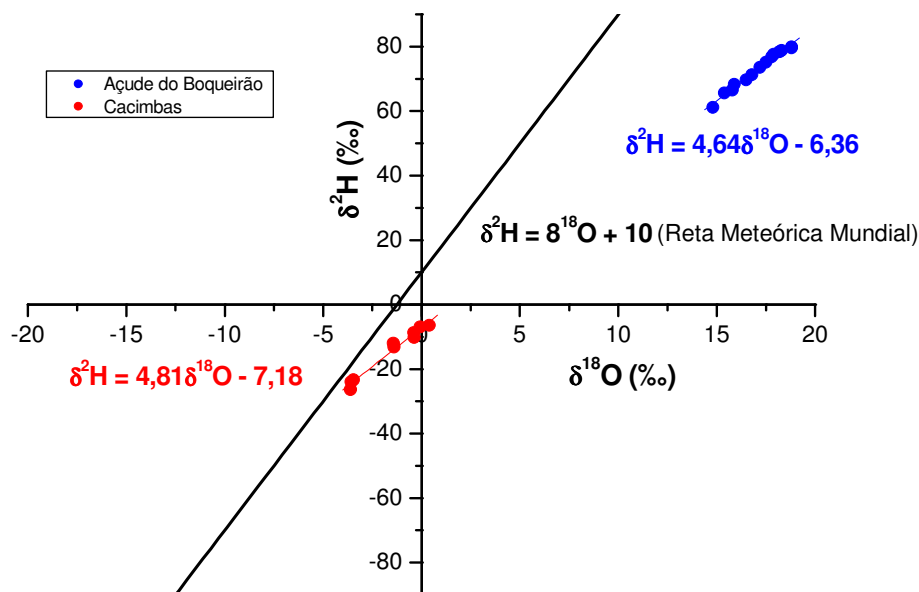


Figura 3 - $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ para as amostras do Açude do Boqueirão e das cacimbas.

Para a avaliação da taxa de evaporação no Açude do Boqueirão utilizando o modelo isotópico foram feitas coletas diárias no Tanque Classe A, no período de 12 de novembro a 04 de dezembro de 2005, e coletas semanais no açude no período de 12 de novembro de 2005 a 12 de fevereiro de 2006.

Somente as medidas de deutério foram utilizadas para calcular a taxa de evaporação usando o modelo isotópico proposto. Na Tabela 2 estão os valores de $\delta^2\text{H}$ em função da fração de água remanescente (f) no Tanque Classe A e a Figura 4 mostra o gráfico com a representação desses parâmetros.

Tabela 2 - Fração de água remanescente (f) no Tanque Classe A e valores de $\delta^2\text{H}$.

f (%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	f (%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$
100	61,13	60,4	78,89
94,0	73,04	57,2	80,60
91,6	73,37	54,8	80,20
89,6	72,31	52,8	79,91
86,0	72,99	50,0	79,23
82,0	74,15	47,6	77,85
78,4	73,58	45,6	78,01
74,0	76,09	42,4	79,02
72,8	75,38	39,6	80,71
68,8	77,15	37,2	81,21
66,0	78,52	34,8	80,12
62,4	77,79		

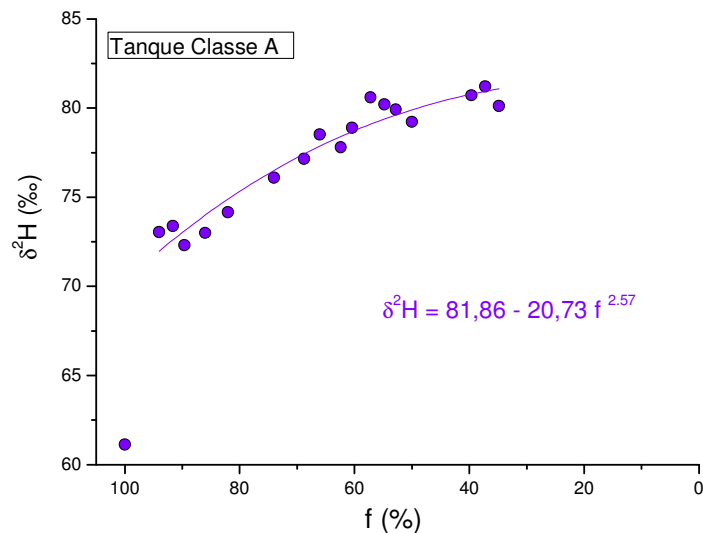


Figura 4 – Variação de δ^2H com a fração de volume de água remanescente no Tanque Classe A.

Para o cálculo do volume evaporado do açude é necessário determinar parâmetros que são obtidos através de medidas isotópicas feitas no Tanque Classe A e no Açude do Boqueirão. Ajustando os dados experimentais à uma função do tipo $y = a + bx^m$, obteve-se para o Tanque Classe A:

$$\delta^2H = 81,86 - 20,73 f^{2,57} \quad (8)$$

Na Tabela 3 estão os valores de δ^2H em função da fração de água remanescente (f), níveis d'água e volumes calculados do Açude do Boqueirão. Os níveis d' água e os volumes foram obtidos através de medições com linígrafo (PEREIRA, 2006). A Figura 5 mostra o gráfico δ^2H (‰) versus f (%).

A determinação do parâmetro m para o açude foi feita utilizando o mesmo método usado para o Tanque Classe A como mostrado na Figura 5. Neste caso, obteve-se:

$$\delta^2H = 82,10 - 20,97 f^{2,19} \quad (9)$$

Tabela 3 - Fração de água remanescente (f), $\delta^2\text{H}$, níveis d'água e volumes calculados para o Açude do Boqueirão.

Data de coleta	f(%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	Nível (m)	Volume (m ³)
12/11/2005	100,0	61,13	2,58	8598
19/11/2005	92,2	65,61	2,52	7930
26/11/2005	87,3	66,51	2,48	7507
03/12/2005	81,4	68,31	2,43	7000
10/12/2005	76,2	69,64	2,38	6553
17/12/2005	72,1	71,25	2,35	6200
24/12/2005	67,4	73,56	2,30	5796
31/12/2005	62,5	75,14	2,25	5377
07/01/2006	54,2	76,88	2,16	4663
14/01/2006	51,3	77,53	2,12	4408
21/02/2006	46,6	78,44	2,07	4005
28/01/2006	42,1	78,86	2,01	3624
05/02/2006	34,9	79,54	1,90	3001
12/02/2006	32,2	79,92	1,85	2769

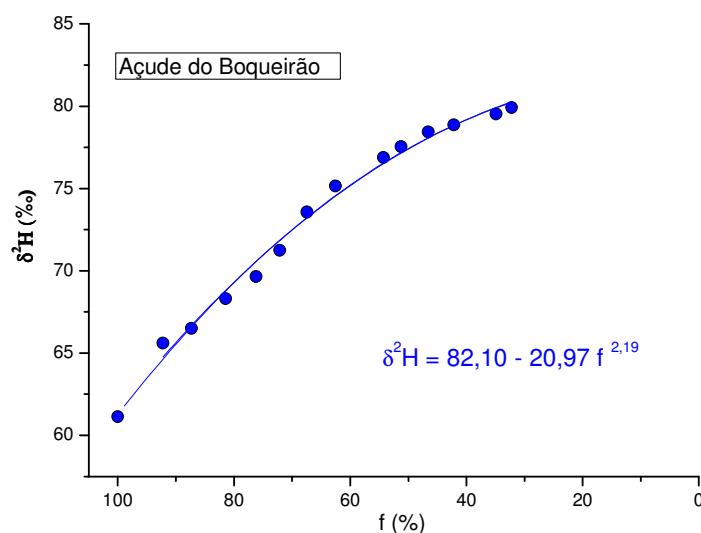


Figura 5 – Variação de $\delta^2\text{H}$ com a fração de volume de água remanescente no Açude do Boqueirão.

Os cálculos foram feitos discretizando os dados em três etapas como mostrado na Tabela 4. Para cada etapa foi calculada a fração parcial de volume evaporado considerando que, para cada uma delas, há um volume inicial e o final da etapa anterior com os seus respectivos valores de fração remanescente (f), de $\delta^2\text{H}$ e de nível. A fração total do volume evaporado foi obtida a partir das frações parciais calculadas sobre os volumes remanescentes em cada etapa.

Tabela 4 - Divisão dos valores medidos em três etapas para os cálculos das frações de volume evaporado no Açude do Boqueirão.

Período de coleta	ETAPA	f (%)	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	Nível (m)	Volume (m^3)
12/11/2005	1	100,0	61,13	2,58	8598
10/12/2005		76,2	69,64	2,38	6553
10/12/2005	2	76,2	69,64	2,38	6553
14/01/2006		51,3	77,53	2,12	4408
14/01/2006	3	51,3	77,53	2,12	4408
12/02/2006		32,2	79,92	1,85	2769

Os volumes parciais evaporados, para cada etapa, foram obtidos pelas seguintes equações:

$$V_{E_1} = V_o \cdot f_{E_1} \quad (10a)$$

$$V_{E_2} = V_{E_1} \cdot f_{E_2} \quad (10b)$$

$$V_{E_3} = V_{E_2} \cdot f_{E_3} \quad (10c)$$

onde $V_o = 8598,40 \text{ m}^3$ (volume inicial do açude).

A fração total de evaporação foi calculada pela seguinte equação:

$$f_{\text{Tot}_E} = \frac{\sum_{i=1}^3 V_{E_i}}{V_o} \times 100\% \quad (11)$$

O resultados das frações parcial e total de volume perdido por evaporação é dado na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores das frações parciais e total de volume evaporado no Açude do Boqueirão.

ETAPA	Fração parcial de volume evaporado (%)		Volume evaporado (m^3)		Fração total de volume evaporado f_{Tot_E} (%)
1	f_{E_1}	20,69	V_{E_1}	1779,08	61,94
2	f_{E_2}	28,68	V_{E_2}	1879,25	
3	f_{E_3}	32,72	V_{E_3}	1442,38	

5 – CONCLUSÕES

As análises de oxigênio-18 e de deutério de amostras das cacimbas indicam intenso processo de evaporação, ao nível do que apresentam as águas do açude Boqueirão. Estas cacimbas estão localizadas em aluvião recebendo água do fluxo de base de riachos temporários da área; o açude também é construído em aluvião. Estes resultados mostram que a evaporação da água na aluvião é da ordem da que ocorre em armazenamentos superficiais de água.

O modelo isotópico determinou uma evaporação de 62 % do volume do açude durante três meses do período seco, que é uma elevada perda de água. Este modelo permitiu determinar a evaporação somente com dados de um tanque classe A e medidas semanais de amostras do açude.

AGRADECIMENTOS

Ao IBAMA, à equipe técnica do projeto IBESA pelo apoio logístico durante as viagens de campo, à FUNCAP e a CAPES pelo apoio financeiro.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, J. C., MARTINS, E. S. P. R., GOMES, E. C. B., MÖBUS, G., DA SILVA, R. C. e BELO, P. S. C. (2002). “A *Bacia Experimental do Riacho de Aiuaba, CE*”. In: Relatório 1 do Projeto IBESA – Caracterização das Bacias Experimentais do Semi-Árido. Projeto Integrado UFRN – UFC – UFPB – UFCG – UFRPE – UFPE – UFBA: convênio FINEP-RJ / FUNPEC-RN.

CRAIG, H. (1961a). “*Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters*”. Science, 133: p. 1833-1834..

CRAIG, H. (1961b). “*Isotopic variations in meteoric waters*”. Science, 133: p. 1702-1703.

DNMET (1992) – Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normas climatológicas (1961 – 1990), Brasília,

GIBSON, J. J. (2001). “*Forest-tundra water balance traced by isotopic enrichment in lakes.*” J. Hydrol. 251, p. 1-13.

GONFIANTINI, R. (1981). “*The δ -notation and the mass spectrometric measurement techniques.*” In: J. R. GAT and R. GONFIANTINI (eds.) Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle, IAEA Technical Report Series, Nº 210, IAEA, Vienna: p. 35-84..

PEREIRA, L. (2006). *Estudo isotópico e hidroquímico das águas superficiais e subterrâneas no semi-árido cearense em área de preservação ecológica no município de Aiuaba*. Tese de Doutorado, Departamento de Física, UFC, 123p.

ROZANSKI, K. ARAGUÁS-ARAGUÁS, L., GONFIANTINI, R. (1993). “*Isotopic patterns in modern global precipitation.*” In: Continental Isotope Indicators of Climate, Washington, D. C. American Geophysical Union Monograph.

SANTIAGO, M. M. F. (1984). *Mecanismos de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos Açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, USP, 176p.

SANTIAGO, M. M. F.; SALATI, E.; MATSUI, E. (1975). “*Fracionamento isotópico da água (¹⁸O e D) do Açude Santo Antonio de Russas durante a evaporação.*” Revista Brasileira de Geociências, 5: p. 106-112.

STOLF, R.; LEAL, J.M.; FRITZ, P.; SALATI, E. (1979). “*Water budget of a dam in the semi-arid northeast of Brazil based on oxygen-18 and chlorine contents.*” In: Isotopic in lake studies. Vienna, p. 57-66.

SUASSUNA, J. (2002) “*A pequena e média açudagem no semi-árido nordestino: uso da água na produção de alimentos.*” Disponível em <http://www.fundaj.gov.br/docs/text/textrop.html> Acesso em 10 ago.

TCM (2003) - Tribunal de Contas dos Municípios do Estado do Ceará. - Disponível em: <http://www.tcm.ce.gov.br> - Acesso em 16/12/2003.