FRACIONAMENTO ISOTÓPICO DA ÁGUA DO SOLO DURANTE O PROCESSO DE EVAPORAÇÃO, EM PRESENÇA DE LENÇOL FREÁTICO

Paulo Rodolfo Leopoldo
Deptº de Engenharia Rural —
Faculdade de Ciências Agronômicas
Campus de Botucatu

Eichi Matsui
Eneas Salati
CENA — Piracicaba — SP

Rubismar Stolf
Bolsista da C.N.E.N.

ABSTRACT

This experiment was conducted with columns of soil, constituted by alluvion sediment keeping a phreatic watertable at a depth of 40 cm and constant water supply, and its objective was to check the water behaviour as to its deuterium and oxigem content when moving from the lower layers to the upper layers, and consequent loss to the atmosphere through evaporation.

It was noted that the existing D and

18O content in the water forming the phreatic watertable practically does not vary with this process.

In addition to the observations on soil columns, soil water from the Brazilian northeastern region was collected and analysed. The phreatic watertable at the collecting site lay at a depth of about 40-50 cm. Preliminarily, it was noted that these results apparently indicate an excess evaporation, and are

also consistent with those obtained by other investigators, who proposed the use of stable isotopes to study problems related to salinization of water in this region.

The data now obtained are highly promising, but further studies on the region are required, taking up a determined region and correlating other data involved in the hydrological cycle.

RESUMO

O experimento conduzido em colunas de solo, constituídas por sedimento aluvionar, com um lençol freático mantido a uma profundidade de 40 cm e constante suprimento de água, teve por objetivo verificar o comportamento da água quanto ao seu conteúdo de deutério e oxigênio, por ocasião de sua movimentação das camadas inferiores para as superiores e sua conseqüente perda para a atmosfera por evaporação.

Esse experimento demonstrou que o

teor de deutério e oxigênio¹⁸ da água do lençol freático permanece, praticamente, constante por ocasião de sua movimentação ascendente através de uma coluna de solo.

Além da observação em colunas de solo, coletou-se e analisou-se também, a água do solo da região do Nordeste Brasileiro, em local onde o lençol freático se encontrava a uma profundidade de cerca de 40 cm a 60 cm. Preliminarmente, observa-se que tais resultados

aparentemente indicam uma evaporação excessiva, e estão também de acordo com outros pesquisadores que propõem o uso de isótopos estáveis nos estudos de problemas de salinização das águas da região.

Os dados ora obtidos foram bastante promissores, e cabe a continuação dos estudos na região, tomando-se em particular uma determinada bacia e correlacionando outros dados envolvidos no ciclo hidrológico.

1. INTRODUÇÃO

A água livre, quando submetida ao processo de evaporação altera as suas relações isotópicas.

O mesmo era de se esperar com relação a água retida pelo solo e submetida a perda por evaporação.

No entanto, como pode ser observado em LEOPOLDO, SALATI e MATSUI (1974) as variações no conteúdo isotópico da água do solo ocorrem somente para aquelas retidas a altos potenciais, ou classicamente definidas como higroscópica. No intervalo entre saturação e ponto limite de água higroscópica o teor isotópico da água do solo permanece praticamente constante. Esses autores admitem que a ausência de fracionamento na água do solo se deve em razão da referida água mover-se ou estar retida através de poros capilares.

Tal observação está de acordo com aquelas feitas por GONFIANTINI et alii (1963) e ZIMMERMANN, et alii (1966) que afirmam a ausência de fracionamento isotópico nas águas que se movem através de vasos capilares de plantas.

No presente trabalho simulou-se uma determinada situação, em que se tinha um lençol freático constante quanto a profundidade e suprimento, com objetivo de ser observado o comportamento do conteúdo isotópico durante o fluxo da água para atmosfera. O mesmo destina-se a obter novos subsídios para estudos no campo da hidrologia, e principalmente para aqueles que estão sendo desenvolvidos pelo CENA em regiões do Nordeste Brasileiro. Sua importância se traduz nas observações feitas por SALATI et alii (1971) que através de um levantamento preliminar das variações das concentrações de D e ^{18}O em águas da região nordestina concluíram sobre a possibilidade de uso destes isótopos como traçadores no equacionamento de alguns problemas hidrológicos.

2. MATERIAL e MÉTODO

2.1. Colunas de solo e lençol freático

Preparou-se 5 colunas de solo, formadas por anéis de tubo de PVC de 4", com 10 cm de altura cada um dos anéis. Cada coluna era constituída de 4 anéis, unidos entre si através de fita adesiva, de modo a formar uma coluna com 40 cm de altura.

Na amostragem das colunas empregou-se como material um sedimento aluvionar com 90,79% de areia, 2,37% de limo e 6,84% de argila.

Inicialmente, o sedimento aluvionar utilizado foi seco ao ar, desagregado, homogeneizado, passado por peneira de 2 mm e levado à estufa a 105-110°C,

até peso constante. O seu acondicionamento nas colunas, era acompanhado de vibrações para obter-se uma compactação uniforme, e colunas de solo homogêneas, quanto a estrutura e textura. O grau de uniformidade era medido através da determinação da densidade aparente para cada secção, ou seja, para cada anel da coluna, e o seu valor variou de 1,62 a 1,66g de solo/cm³.

O lençol freático, alimentado por um reservatório à pressão atmosférica, foi mantido a uma profundidade constante de 40 cm, com um suprimento de água também constante. (Fig. 1).

O sistema descrito, colunas e reservatórios, foram levados para uma casa de vegetação, onde ficaram submetidos à perda de água por evaporação. Diariamente, fazia-se o controle da quantidade de água evaporada, bem como o reabastecimento dos reservatórios, além do controle da temperatura e umidade relativa, através de um termohigrógrafo.

2.2. Amostragem e extração da água do solo

As amostras de solo para análise da água retida, foram obtidas em intervalos de cada 7 dias, num período de 35 dias.

De cada coluna, escolhida ao acaso, por ocasião da amostragem, obtinha-se 4 amostras correspondentes aos perfis 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm de profundidade. Em todo experimento, obteve-se um total de 20 amostras, uma vez que foram utilizadas 5 colunas. Essas amostras eram acondicionadas em tubos de vidro, tipo tubo de ensaio, bem vedados.

Além das amostras de solo, coletou-se também, no início duas amostras de água utilizada no suprimento das colunas.

A extração da água das amostras de solo foi feita aplicando-se o método desenvolvido por LEOPOLDO et alii (1973), variando-se apenas a fonte de aquecimento das amostras. O método em questão tem por princípio o aquecimento da amostra a 105-110°C e condensação da água extraída em um sistema operado à baixa pressão. O tempo de operação do sistema variou de 3 a 4 horas, de acordo com o teor de umidade retido pelo solo. Na Figura 2 apresenta-se, em esquema, o sistema de extração da água do solo, utilizado no presente caso.

2.3. Preparo da água extraída para análise do conteúdo de deutério.

A água extraída era colocada em capilares, contendo cerca de 7 ul de água cada um. Esses capilares eram posteriormente utilizados em um siste-

ma de decomposição da água pelo método do urânio metálico, através do qual se obtém todo hidrogênio da amostra de água, na forma de gás. Na operação e uso do referido sistema, seguiu-se as indicações contidas em MATSUI et alii (1971).

2.4. Preparo da água extraída para análise de conteúdo de oxigênio¹⁸

No preparo das amostras de água para análise do oxigênio¹⁸ utilizou-se de um sistema de admissão e extração de CO₂, conforme o método proposto por EPSTEIN e MAYEDA (1953).

2.5. Análise da relação D/H e ¹⁸O/¹⁶O

Na análise do conteúdo de D na amostra de hidrogênio, empregou-se o espectrômetro de massa da Varian-Mat modelo GD-150, existente nos laboratórios do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) em Piracicaba, cujo desvio padrão na medida é da ordem de 1,5%.

A detecção da relação isotópica D/H através do referido espectrômetro foi feita empregando-se o método nulo, proposto por McKinney et alii (1950).

Na análise da relação ¹⁸O/¹⁶O empregou-se o espectrômetro de massa MAT-230 da Varian-Mat, cujo erro padrão das medidas é da ordem de 0,2%. A detecção da relação ¹⁸O/¹⁶O foi feita de modo semelhante ao empregado para a relação D/H, ou seja pelo método nulo proposto por McKinney et alii (1950).

No presente experimento, os resultados das análises do teor de deutério e oxigênio¹⁸ são expressos na forma de δD e $\delta^{18}O$, em relação ao padrão internacional SMOW (Standard Mean Ocean Water):

$$\delta D = \frac{\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{amostra}} - \left(\frac{D}{H} \right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{SMOW}}} \cdot 10^3$$

$$\delta^{18}O = \frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{amostra}} - \left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{SMOW}}} \cdot 10^3$$

2.6 Amostras de solo do Nordeste

Paralelamente, às análises feitas para a água do solo de acordo com o já exposto, foi coletada e analisada a água retida por solo da região nordestina. Essas amostras de solo, num total de 13, foram retiradas do leito seco do riacho do Navio sendo que na ocasião o lençol freático encontrava-se a cerca de 40 cm a 50 cm de profundidade de acordo com a topografia do terreno. No sentido transversal ao leito retirou-se amostras de 5 pontos distintos, distanciados de cerca de 5 metros um do outro.

No primeiro e segundo pontos obteve-se amostras das camadas de 10 a 20 e de 30 a 40 cm de profundidade, altura esta em que se encontrava o lençol freático, em relação à superfície do solo e para os pontos 3, 4 e 5 além das camadas citadas, retirou-se também para a camada de 50 a 60 cm. Para estes últimos pontos, o lenço freático situava-se a 60 cm de profundidade em relação à superfície do solo. Na figura 3, apresenta-se a planta e, em corte a secção transversal do local, onde coletou-se as amostras descritas.

Na extração da água do solo, preparo para análise e análise do teor de deutério e oxigênio¹⁸ seguiu-se a mesma metodologia descrita para o caso do experimento realizado com as colunas de solo.

3. RESULTADOS

No Quadro I estão apresentados os resultados da variação do δD e $\delta^{18}O$ da água extraída das colunas de solo, em função da profundidade e tempo de evaporação.

A água utilizada na suprimimento dessas colunas apresentou um valor de -46,0‰ para δD , valor médio de duas amostragens feitas no início do experimento.

O Quadro II apresenta os resultados preliminares das variações de δD e $\delta^{18}O$ da água retida pelo solo da região nordestina, no leito seco do riacho Navio, conforme descrição feita em Material e Método.

O desvio dos dados apresentados no Quadro I é da ordem de $\pm 2,3\%$ e $\pm 0,5\%$ e para o Quadro II, igual a $\pm 6,2\%$ e $\pm 1,9\%$, respectivamente para os dados de δD e $\delta^{18}O$.

No Quadro III estão observadas, para as colunas de solo as respectivas variações do teor de umidade, à base de peso seco, em função da profundidade e tempo.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O experimento conduzido por LEOPOLDO et alii (1974) refere-se a colunas de solo saturadas uma única vez e colocadas sob condições naturais de evaporação até que o teor de umidade se tornasse constante.

No presente experimento, semelhantes colunas foram submetidas ao processo de perda de água, sob condições de fornecimento contínuo de água durante todo o período, através de um lençol freático mantido a uma profundidade constante, sem variação da umidade do solo durante o período, conforme mostra os dados do Quadro III.

Pelos dados obtidos, relacionados no Quadro I pode-se observar que os resultados se assemelham àqueles obtidos por LEOPOLDO et alii (1973) ou seja, que a água do solo retida a baixos potenciais não são passíveis de sofrerem fracionamento isotópico, quanto ao teor de deutério e oxigênio¹⁸.

Desse modo, a passagem da água pelo solo, ou seja, o fluxo das camadas inferiores para as superiores e consequente perda para a atmosfera é feita sem que haja, praticamente, alterações em seu conteúdo isotópico.

Observa-se, no entanto, que a camada superior (Quadro I), tem seus valores diferindo, em parte, da água de saturação (δD -46‰), apresentando um pequeno enriquecimento no conteúdo de deutério, o qual segundo ZIMMERMANN et alii (1966), deve ser tão maior quanto menor for a camada superficial observada.

No caso de plantas, o fato se dá de maneira semelhante. Segundo observações feitas por GONFIANTINI et alii (1963) e ZIMMERMANN et alii (1966) a água da planta se move através de vasos capilares sem que haja fracionamento isotópico da mesma. Para a água das folhas, no entanto, ocorre um enriquecimento no conteúdo de deutério, por ocasião de sua perda por transpiração, para a atmosfera, conforme apresentação feita por LEOPOLDO (1973).

Desse modo, a água que se move, no solo, através do sistema horizontes profundos - horizontes superficiais - ar comporta-se de maneira semelhante à água envolvida no sistema solo-tronco-folhas-ar, havendo um enriquecimento onde há evaporação direta do ar atmosférico, dando-se o transporte de água até a interface solo-ar ou folha-ar por capilaridade.

O presente experimento foi conduzido de modo a simular determinadas condições semelhantes às de regiões semi-áridas do Nordeste Brasileiro, onde secam os rios, formando um leito seco, com o lençol freático a pequena profundidade. Esse lençol freático é aproveitado através da abertura das chamadas "cacimbas", das quais se aproveita a água para uso doméstico e outros como no provimento de animais. No entanto, essa água apresenta-se em alguns casos salina, e consequentemente imprópria para tais usos.

O mecanismo de salinização das águas subterrâneas da região nodestina tem sido estudado por inúmeros pesquisadores, entre os quais SALATI et alii (1970), que apontam a possibilidade de utilização de isótopos estáveis, na pesquisa de tais problemas.

SALATI et alii (1971) fizeram um levantamento das concentrações de $\delta^{18}O$ e δD em águas subterrâneas e pluviais de regiões do Nordeste e admitiram que a

salinização das águas do Nordeste parece estar relacionado com o mecanismo da evapotranspiração antes da recarga dos aquíferos.

Como pode ser observado pelos experimentos já realizados, a água do solo deve ser evaporada, sem que haja profundas alterações no conteúdo isotópico da água residual.

No entanto, numa análise preliminar, pelos resultados apresentados no Quadro II, pode ser observado que ocorre um certo fracionamento isotópico com relação ao hidrogênio e oxigênio, até certo ponto bastante acentuado.

Observa-se ainda que o fracionamento ocorre tanto no sentido das laterais para o centro do rio, como também no sentido ascendente, ou seja, das camadas mais profundas para as camadas superficiais. A relação entre as concentrações de D e ^{18}O para a água subterrânea da região cristalina, conforme SALATI et alii (1971) é a seguinte:

$$\delta D = 6,6 \delta^{18}O + 3,8 \dots \dots \dots (1)$$

Para a água do solo da região nordestina tem-se a seguinte relação:

$$\delta D = 2,8 \delta^{18}O - 6,3 \text{ (solo do Nordeste)} \dots \dots \dots (2)$$

Pode-se observar, pelos coeficientes angulares das equações 1 a 2 que a água do solo em relação à água subterrânea sofreu uma intensa evaporação.

Os dados obtidos por LEOPOLDO (1973), para colunas de solo arenoso, saturadas e submetidas ao processo de evaporação apresentou a seguinte relação:

$$\delta D = 3,2 \delta^{18}O - 28,2 \dots \dots \dots (3)$$

Observa-se que os coeficientes angulares das equações 2 e 3 são ligeiramente semelhantes. Graficamente, tais correlações são apresentadas na figura 4, 5 e 6, respectivamente.

Os resultados do Quadro II, bem como as análises das relações δD - $\delta^{18}O$ indicam uma evaporação intensa e estão concordes com a apresentação feita por SALATI et alii (1971) para os aquíferos do cristalino, região da qual experimento. "Nos aquíferos do cristalino, as amostras analisadas apresentaram uma relação D - ^{18}O indicativa de que as águas dos mesmos sofreram evaporação".

Tais resultados, no entanto, e apesar de preliminares, dão boas razões para se continuar os estudos da água do solo na região, através da utilização de isótopos estáveis.

Evidentemente, melhores resultados poderão ser obtidos desde que se tome

em particular o estudo de uma bacia, através de maiores observações e correlações entre água do solo, água de chuva e água subterrânea, além da ob-

tenção de outros dados que possibilitem uma melhor compreensão dos resultados.

Um estudo dessa natureza poderá

trazer maiores esclarecimentos com relação à dinâmica das águas, salinização e o porque do presente fracionamento para a água do solo.

5. BIBLIOGRAFIA

GONFIANTINI, R., TOGLIANTTI, V e TONGIORGI, E. 1963, Some possible applications of isotopic analyses of water to hydrologic problems. Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Roma 71—80.

LEOPOLDO, P.R. 1973. Fracionamento isotópico da água do solo e da planta. Tese de Doutorado apresentada à FCMBB, Botucatu, 104 p.

_____, **SALATI, E e MATSUI, E.** 1973. Método de extração da água do solo para análise da relação D/H. Piracicaba, CENA, Boletim nº 9, 21p.

_____. 1974. Fracionamento isotópico da água do solo

durante o processo de evaporação. Ciência e Cultura, 26(7): 668—671.

MATSUI, E., SALATI E. e FERRAZ, E.S.B., 1971. Medida da variação natural da relação D/H em amostras de água. Piracicaba, CENA, Boletim nº 1, 31 p.

MICKINNEY, C.R., McCREA, J.M. EPS-TEIN, S., HALLEN, H.A. e UREY, H.C. 1950. Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios. The Review of scientific instruments, 21 (8): 724—730.

SALATI, E. MOURA NETO, M.R. CERVELLINI, A. 1970. Concentração de ^{18}O em

aguas subterrâneas do Nordeste Brasileiro. Relatório Preliminar — CENA-ESALQ—USP (não publicado).

SALATI, E. GUSMÃO, G.A., MATSUI, E. e CERVELLINI, A., 1970. Estudo das águas subterrâneas do Nordeste Brasileiro. Piracicaba, CENA, Boletim nº 2, 30p.

ZIMMERMAN, U., EHHALT, D. e MUNNICH, K.O. 1966. Soil water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic compositions of the water. In Symposium of Isotopes in Hydrology. I.E.A.A., Vienna, 14 a 18 de novembro de 1966, 567-585.

FIG. 1 - Coluna de solo e sistema de suprimento de água à carga constante.

FIG. 2 - Esquema do sistema de extração da água do solo (capacidade para 8 amostras simultâneas).

QUADRO I – Variação dos valores de $\delta_D\%$ e δ_{18} da água extraída das colunas de solo, com lençol freático constante a 40 cm de profundidade.

Profundidade	Coluna A (7 dias)	Coluna B (14 dias)	Coluna C (21 dias)	Coluna D (28 dias)	Coluna E (35 dias)
	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}
0 – 10	- 45,5 – 6,4	39,3 – 6,2	- 40,0 – 5,7	- 39,6 – 5,7	- 43,6 – 6,0
10 – 20	- 44,7 – 5,8	- 43,3 – 6,4	- 43,0 – 6,5	- 45,1 –	- 42,9 – 6,4
20 – 30	- 48,1 – 6,8	- 44,1 – 6,6	- 45,1 – 6,5	- 43,2 – 6,7	- 44,1 – 6,6
30 – 40	- 43,2 – 6,6	- 47,0 – 6,7	- 45,4 – 6,5	- 43,7 – 6,4	- 47,2 – 8,0

QUADRO II – Variação de $\delta_D\%$ e $\delta_{18}\%$, da água do solo, no leito seco do rio

Profundidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}	δ_D δ_{18}
10 – 20	- 12,9 – 2,1	+ 2,0 + 1,8	- 9,6 – 1,4	- 14,2 – 3,7	- 16,9 – 3,6
30 – 40	- 16,5 – 3,4	- 13,8 – 1,7	- 13,4	- 17,3 – 4,4	- 25,3 – 5,7
50 – 60	- -	- -	- 12,6 – 2,3	- 12,6 –	- 19,2 – 3,6

QUADRO III – Variação do teor de umidade do solo, em % à base de peso, seco das colunas

Profundidade	Coluna A	Coluna B	Coluna C	Coluna D	Coluna E
0 – 10	8,5	9,8	9,5	8,8	8,0
10 – 20	13,0	14,5	14,9	12,7	13,0
20 – 30	15,0	14,0	15,4	14,9	14,0
30 – 40	16,0	15,5	16,0	16,2	16,0

FIG.3 - Planta e corte transversal do rio, com leito seco, apresentando em esquema os pontos de coleta de amostra de solo.

FIG.4 - CORRELAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE D E ^{18}O EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS REGIÕES DE FORMAÇÃO CRISTALINA NO NORDESTE BRASILEIRO.

FIG.5 - CORRELAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE D E ^{18}O EM ÁGUA DO SOLO DA REGIÃO NORDESTINA (RIACHO DO NAVIO - LEITO SECO)

FIG.6 - CORRELAÇÃO DE D E ^{18}O EM ÁGUA EXTRAÍDA DE COLUNAS DE SOLO ARENOSO, SATURADAS E SUBMETIDAS AO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO.