

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS TERRA ROXA ESTRUTURADA E LATOSSOLO ROXO ATRAVÉS DA INFILTRAÇÃO VERTICAL^a

CR. APPOLONI^b
J.C.M. DE OLIVEIRA^c
L. FANTE JR.^d
A.D.B. DESOUZA^e
J.M. DE OLIVEIRA JR.^f

RESUMO

Foram calculadas as funções condutividade e difusividade hidráulica em amostras de solo (horizontes A e B), de um latossolo roxo (LRJ) e uma terra roxa estruturada (TE) da região de Londrina-PR, a partir do perfil de umidade e de dados da propagação da frente de molhamento, obtidos através da medida da infiltração de água em coluna de solo e de um equacionamento variacional do escoamento vertical. Nas medidas da frente de molhamento utilizou-se um tubo de acrílico, contendo a amostra de solo, acoplado a uma placa porosa em sua base, permitindo a infiltração da água em sentido contrário ao campo gravitacional, com uma velocidade de 0,12 cm/min. Os perfis de umidade foram obtidos pela técnica de atenuação de raios gama provenientes de uma fonte de Co^{60} , medidos por um detector de cintilação NaI (TL). O conjunto fonte-detector foi montado numa mesa que permitia a movimentação vertical e horizontal da coluna.

PALAVRAS-CHAVE: *infiltração vertical, atenuação de raios gama, condutividade e difusividade hidráulica.*

1 - INTRODUÇÃO

O uso, aplicação e manejo de água no solo, tem sido estudados através de diferentes pesquisas hidrológicas realizadas em todo mundo, e envolvem o conhecimento de uma série de propriedades físico-hídricas do solo.

Ao estudar o ciclo da água na agricultura nos deparamos com o processo de infiltração, cuja compreensão é fundamental para o planejamento de projetos de irrigação e para estabelecer medidas para o controle de erosão através da diminuição do deflúvio superficial.

A medida da condutividade hidráulica é essencial para a caracterização físico-hídrica do solo e a quantificação do movimento da água, permitindo o cálculo dos fluxos. Como existem uma alta dependência entre o conteúdo de água no solo e as funções condutividade hidráulica $[K(q)]$ e difusividade $[D(q)]$ da água, estas tornam-se de difícil determinação.

Desta maneira o objetivo do presente trabalho foi determinar o perfil de umidade em função do tempo, numa coluna de solo e posteriormente, a partir destes dados obter as funções $K(q)$ e $D(q)$ da amostra de solo estudado.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Arranjo Experimental — Neste experimento um item de fundamental importância é a criação de um dispositivo

de fornecimento de água à coluna de solo, de maneira a produzir-se uma infiltração com velocidade e uniformidade adequadas.

O arranjo experimental constitui-se de uma fonte de Co^{60} , detector de NaI (TL), mono-canal, pré-amplificador, contador, cronômetro e uma mesa (Figura 1). A linha gama usada foi a de 1,17 MeV do Co^{60} , para trabalharmos com feixe monoenergético.

A interface água-amostra de solo consistiu de uma placa de acrílico (15,0 cm de diâmetro) com orifícios de 1mm de diâmetro. Junto com a placa de acrílico foram colocadas camadas de tecido (Nylon) e uma fita de zinco com borracha, visando conferir coesão com a base do cilindro de acrílico (14,5 cm de diâmetro x 30 cm de altura). A infiltração revelou-se uniforme, com uma velocidade adequada (0,12 cm/min).

Este conjunto foi acoplado a um suporte que mantém a placa porosa em contato com a água.

Após uma prévia secagem ao ar o solo foi peneirado (peneira com malha 2mm) e colocado no tubo, sem compactação.

A manipulação da amostra de solo foi feita com o auxílio de uma mesa com um dispositivo que permite movimentação horizontal e vertical. Dessa maneira foi possível irradiar o solo em incrementos de 2 cm, até 20 cm da coluna de solo.

a - Trabalho realizado no Departamento de Física/CCE - Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR.

b - Professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, Caixa Postal 6001, CEP 86051, Londrina-PR.

c - Bolsista do CNPq, categoria aperfeiçoamento.

d - Físico, pós-graduando no Departamento de Física Nuclear, Instituto de Física, USP (SP); bolsista do CNPq.

e - Aluno de Graduação do Curso de Física da Universidade Estadual de Londrina.

f - Físico, pós-graduando no Departamento de Física Nuclear, Instituto de Física, USP (SP); bolsista do CNPq.

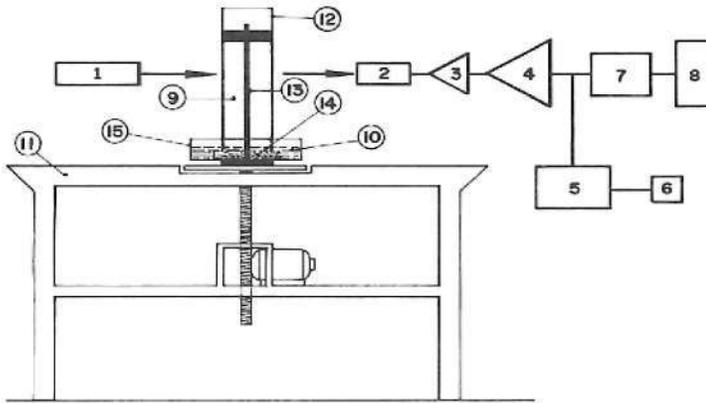


FIGURA 1 — Sistema de infiltração vertical de água no solo, acoplado à aparelhagem padrão.

1. Fonte de ⁶⁰Co
2. Detector de cintilação NaI (TL)
3. Pré-amplificador
4. Amplificador
5. Analisador multi-canal
6. Osciloscópio
7. Analisador mono-canal
8. Contador
9. Solo
10. Água
11. Mesa de medidas
12. Cilindro de acrílico
13. Suporte
14. Placa porosa
15. Reservatório

Obtenção dos Dados — Na fase de obtenção dos dados, mediu-se a intensidade (I_0) sem absorvedor. Em seguir da varreu-se o tubo de acrílico sem a amostra de solo, determinando-se assim, a intensidade do feixe transmitido através do tubo vazio (I_v) para cada posição, a qual foi variada em incrementos de 2 cm. A intensidade I_0 foi novamente medida e em seguida colocou-se a amostra de solo (preparada conforme o item interior) no tubo, medindo-se então a intensidade (I_s) para cada posição.

As intensidades para cada posição foram medidas durante aproximadamente 3 min. e ao final de cada seqüência de 10 posições era novamente obtida a intensidade sem absorvedor. Este procedimento foi feito até que a última posição estivesse saturada.

A umidade do solo (q_0) foi previamente determinada pelo método gravimétrico.

A densidade global da amostra foi calculada pela razão entre a massa e o volume da amostra.

Análise dos Dados - Através da varredura da amostra com o feixe de raios gama, calculou-se o coeficiente de atenuação de massa do solo ($\mu_s \rho_s$) dado por:

$$\mu_s \rho_s = \frac{1}{x} \ln \left[\frac{I_{O1} \cdot I_v}{I_0 \cdot I_s} \right] - \mu_{\omega} \rho_{\omega} \cdot \theta_0 \quad (1)$$

onde: x - espessura da amostra

I_{O1} - intensidade sem absorvedor no final da mesma seqüência

$\mu_{\omega} \rho_{\omega}$ - coeficiente de atenuação de massa da água (obtido da literatura - Ferraz, 1974)

A partir destes dados calculou-se $\theta(z, t)$ utilizando-se a expressão abaixo:

$$\theta(z, t) = \left[\frac{1}{x} \ln \left[\frac{I_{O11} \cdot I_v}{I_{O1} \cdot I} \right] - \mu_s \rho_s \right] \frac{1}{\mu_{\omega} \rho_{\omega}} \quad (2)$$

onde: I_{O11} - intensidade do feixe que emerge da amostra para o detector e as demais variáveis são as mesmas detalhadas no índice da equação (1).

O desvio nos valores experimentais de $\mu_s \rho_s$ e $\theta(z, t)$ foi calculado através da propagação de erros nas equações (1) e (2). Através do gráfico de $\theta(z, t)$ versus tempo, para cada posição, determinou-se a umidade de saturação (θ_s) e o tempo de saturação (t_s) para cada posição (X_s).

Para a determinação dos parâmetros de difusividade e condutividade hidráulicas utilizou-se uma solução da equação de Darcy para meios homogêneos (Reichardt, 1985).

Através da relação entre $X_s / \sqrt{t_s}$ e $\sqrt{t_s}$ foi obtida a seguinte equação:

$$\frac{X_s}{\sqrt{t_s}} = b_1 \sqrt{t_s} + a_1 \quad (3)$$

A partir de um determinado tempo de referência, foram obtidos do gráfico $\theta(z, t)$ versus o tempo os seguintes elementos: a umidade inicial ($\theta_{O\gamma}$), a umidade θ , o parâmetro $\eta = z/q$ (onde: z é a posição (cm) de cada nível e q é a posição (cm) da frente de molhamento) e $\omega = (\theta - \theta_{O\gamma}) / (\theta_s - \theta_{O\gamma})$ é um parâmetro adimensional (derivado da umidade) para cada posição no referido tempo.

A partir do gráfico da função $\ln(1 - \eta) \times \omega$ estabeleceu-se a equação:

$$\ln(1 - \eta) = b_2 \omega + a_2 \quad (4)$$

Desta forma, Coutinho Jr. et al., 1977, utilizando-se das equações (3) e (4) e as equações abaixo:

$$F(\beta) = e^{\beta} (\beta - 7/3) - 2e^{\beta/2} \arctg e^{\beta/2}$$

$$\gamma(\beta) = \beta^2 - 6\beta + 34/3 \quad (5)$$

$$C(\beta) = \left(\frac{6\beta - 13}{18} \right) e^{\beta} + \frac{\pi}{3} e^{\beta/2}$$

onde:

$$\beta = a_2 + b_2$$

calcularam respectivamente a difusividade e condutividade hidráulica do solo pelas equações:

$$D(\omega) = D_0 e^{\beta \omega} \quad (6)$$

$$K(\omega) = K_0 e^{\beta\omega} \tag{7}$$

onde:

$$D_0 = \frac{a_1^2 \gamma(\beta)}{2 F(\beta)}$$

$$K_0 = \frac{3b_1 \gamma(\beta)}{2 C(\beta)}$$

Para transformar $D(\omega)$ em $D(\theta)$ é necessário fazer a seguinte transformação:

$$D(\omega) = D_0 e^{\beta\omega}$$

$$D(\omega) = D_0 \text{ EXP} \left[\beta \left[\begin{matrix} \theta - \theta_{0\gamma} \\ \theta_s - \theta_{0\gamma} \end{matrix} \right] \right]$$

chamando

$$\gamma = \frac{\beta}{\theta_s - \theta_{0\gamma}}$$

$$D(\theta) = D_0 e^{\gamma(\theta - \theta_{0\gamma})}$$

$$D(\theta) = D_0 e^{\beta \cdot e\gamma(\theta - \theta_s)}$$

$$D(\theta) = D_0^1 e^{\gamma(\theta - \theta_s)} \text{ cm}^2/\text{min}$$

com $D_0^1 = D_0 e^{\beta}$

Analogicamente para $K(\omega)$ teremos a expressão

$$K(\theta) = K_0^1 e^{\gamma(\theta - \theta_s)} \text{ cm/min}$$

com

$$K_0^1 = K_0 e^{\beta}$$

Os cálculos foram realizados multiplicando as equações acima por 1440 para obtermos $D(\theta)$ e $K(\theta)$ em cm^2/dia e cm/dia respectivamente.

QUADRO 2 - VALORES MÉDIOS PARA CONDUTIVIDADE [$K(\omega)$] E DIFUSIVIDADE [$D(\omega)$] HIDRÁULICA PARA OS SOLOS ESTUDADOS.

Solo	Horizonte	Condutividade $K(\omega)$	Difusividade $D(\omega)$
		cm/minuto	cm ² /minuto
LR	A	$K(\omega) = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ EXP } 7,22\omega$	$D(\omega) = 2,27 \cdot 10^{-2} \text{ EXP } 7,22\omega$
LR	B	$K(\omega) = 1,60 \cdot 10^{-2} \text{ EXP } 5,53\omega$	$D(\omega) = 3,75 \cdot 10^{-2} \text{ EXP } 5,53\omega$
TE	A	$K(\omega) = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ EXP } 4,96\omega$	$D(\omega) = 5,14 \cdot 10^{-3} \text{ EXP } 4,96\omega$
TE	B	$K(\omega) = 7,00 \cdot 10^{-3} \text{ EXP } 4,37\omega$	$D(\omega) = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ EXP } 4,37\omega$

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

No quadro 1 são apresentados os valores médios de $\mu_s \rho_s$ para cada horizonte dos solos estudados. A densidade destes variou de 1,03 a 1,05 g/cm³. Com esses dados foi possível traçar as curvas de molhamento $\theta(z, t)$ versus t, z . A partir da análise das curvas de molhamento (Figura 2), ajustou-se o modelo citado no item Análise de Dados e foram construídos os gráficos $X_s / \sqrt{t_s}$ versus $\sqrt{t_s}$ e $\ln(1 - \eta)$ versus ω para cada amostra de solo, como mostram as figuras 3 e 4, respectivamente.

Com base nas parametrizações destas retas foi possível o cálculo da difusividade [$D(\omega)$] e condutividade [$K(\omega)$], cujos valores médios são mostrados no quadro 2, sendo que as respectivas curvas de $D(\theta)$ e $K(\theta)$ são apresentadas nas figuras 5 e 6.

Lembrando-se que $D(\omega)$ e $K(\omega)$ são funções exponenciais de β , pode-se observar que para o solo LR-A, o parâmetro β (7,22) é 30 a 40% maior em relação ao LR-B ($\beta = 5,53$), bem como aos horizontes A e B do solo TR (respectivamente $\beta = 4,96$ e 4,37). Decorrendo assim que o horizonte A do latossolo Roxo tem $D(\theta)$ e $K(\theta)$ sensivelmente maiores que o horizonte B e também maior do que para o solo TE.

Para o solo TE observou-se pouca diferença no valor de β entre os horizontes A ($\beta = 4,96$) e B ($\beta = 4,37$), as-

QUADRO 1 - VALORES MÉDIOS DO COEFICIENTE DE MASSA DOS SOLOS ($\mu_s \rho_s$) E SEUS RESPECTIVOS DESVIOS ($\sigma \mu_s \rho_s$)

Solo	Horizonte	$\mu_s \rho_s$	$\sigma \mu_s \rho_s$
		cm ⁻¹	
LR	A	0.0502	0.0006
LR	B	0.0455	0.0015
TE	A	0.0497	0.0014
TE	B	0.0495	0.0020

sim sendo, a difusividade e condutividade hidráulica dos dois horizontes são semelhantes.

Deve-se lembrar que, para este trabalho, os solos foram peneirados e desta forma alterou-se a matriz original do solo, sendo que os horizontes, A e B, ficaram relativamente mais parecidos. Para se fazer uma melhor análise dever-se-ia conhecer alguns parâmetros dos solos, como granulometria e teor de matéria orgânica, o que neste caso não foi realizado.

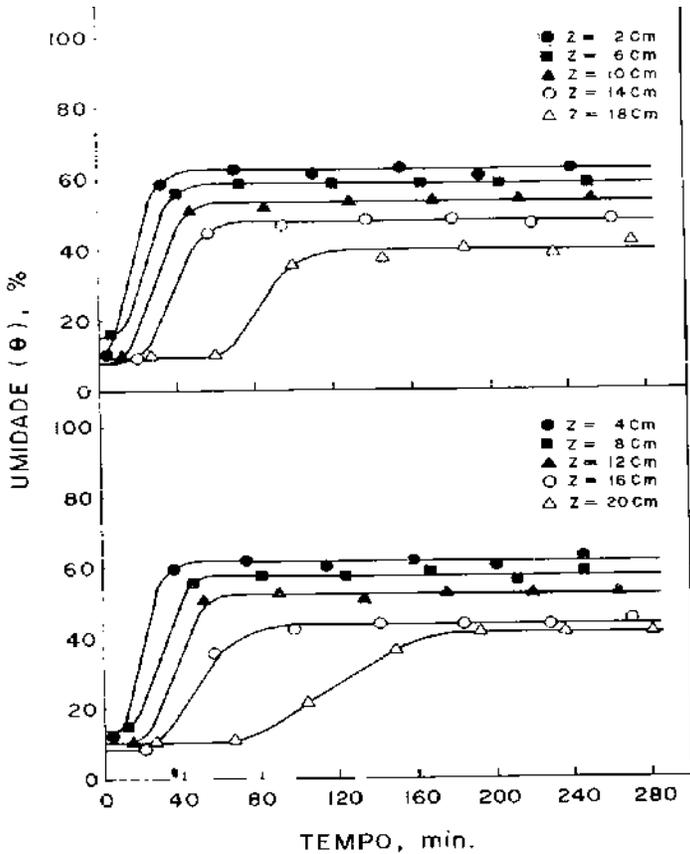


FIGURA 2 - Curvas de umidade θ , obtidas para o latossolo roxo (horizonte B), posições: 1 (Z = 2 cm); 3 (Z = 6 cm); 5 (Z = 10 cm); 7 (Z = 14 cm); 9 (Z = 18 cm) e 2 (Z = 4 cm); 4 (Z = 8 cm); 6 (Z = 12 cm); 8 (Z = 16 cm); 10 (Z = 20 cm).

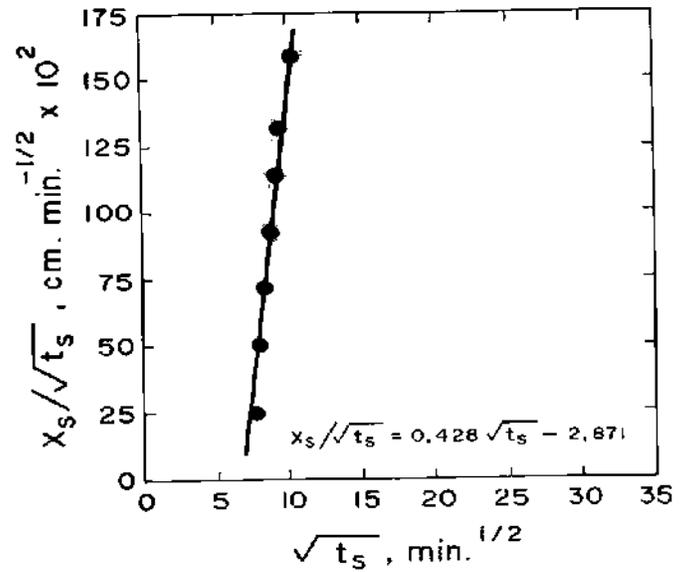


FIGURA 3 - Parametrização da evolução da frente de molhamento, apresentada pela função $X_s / \sqrt{t_s}$ (cm x $\text{min.}^{-1/2}$) x $\sqrt{t_s}$ ($\text{min.}^{-1/2}$), obtida para o latossolo roxo (horizonte B).

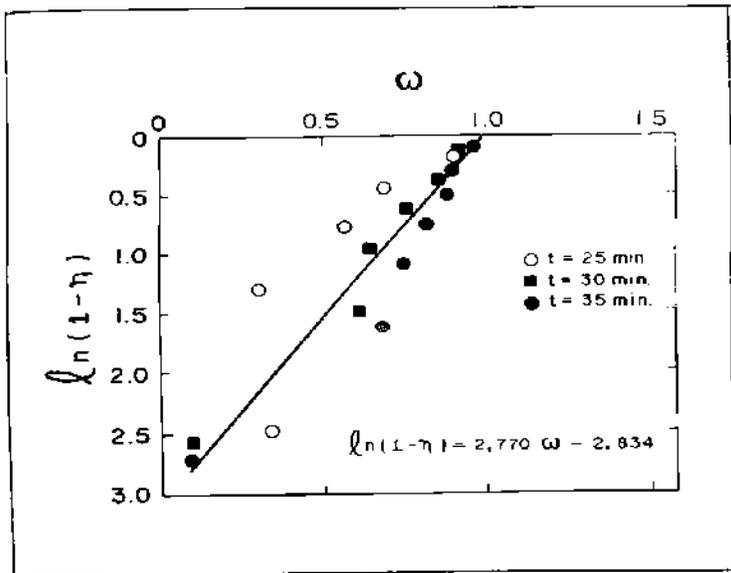


FIGURA 4 - Parametrização da função $\ln(1-\eta)$ versus ω para o latossolo roxo (horizonte B). Os pontos são representados por símbolos. Os conjuntos de pontos de mesmo símbolo representam grupos de medidas no mesmo tempo escolhido.

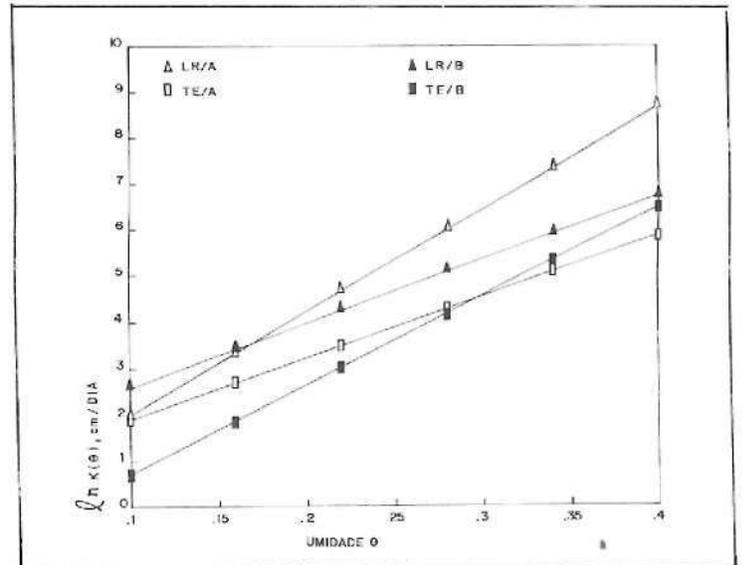


FIGURA 5 - Curvas médias da condutividade em função da umidade para os diferentes tipos de solos e horizontes estudados.

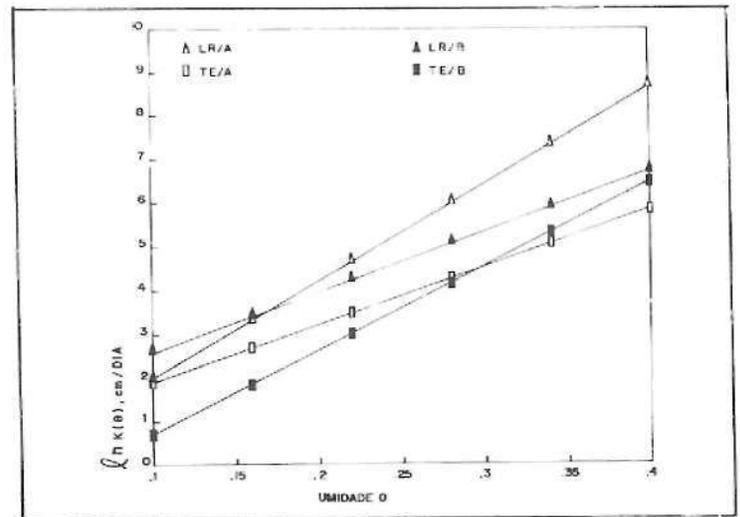


FIGURA 6 - Curvas médias da difusividade em função da umidade para os diferentes tipos de solos e horizontes estudados.

ABSTRACT

The hydraulic diffusivity and conductivity functions of LR and TE (levels A and B) soil samples from the Londrina-PR region were calculated by means of the moisture profile and data from the time evolution of the wet front, taken through measurements of the water infiltration in a soil column and a variational formulation of the vertical flow. The wet front data were taken in a acrylic column coupled in its base with a porous plate that permitted the water flow against the gravitational field with a suitable velocity of 0.12 cm/min. The moisture profile data were obtained by the gamma ray attenuation method, with a ⁶⁰Co source and a NaI (TL) scintillation detector. With a vertical and horizontal measurement table the moisture profile data $\theta(z, t)$ were taken in many points of the soil column.

KEY-WORDS: vertical infiltration, gamma ray attenuation, hydraulic diffusivity and conductivity

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - COUTINHO Jr, G., MANIAKAS, S., DOMINGOS, R.N. & TOBLINOVA, S. Determinação da difusividade e da condutividade de solo não saturado através de dados de infiltração vertical. *Científica*, Jaboticabal, v.1, p. 79-85, 1977.

2 - FERRAZ, E.S.B. Determinação simultânea da densidade global e umidade do solo por atenuação de raios gama do ¹³⁷Cs e

²⁴¹Am. Livre Docência. ESALQ/USP. Piracicaba, SP, 1974.

3 - REICHARDT, K. *Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 4 ed. Campinas: Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP. Fundação Cargil, 1985. Vii 466p.

Recebido para publicação 11/5/90