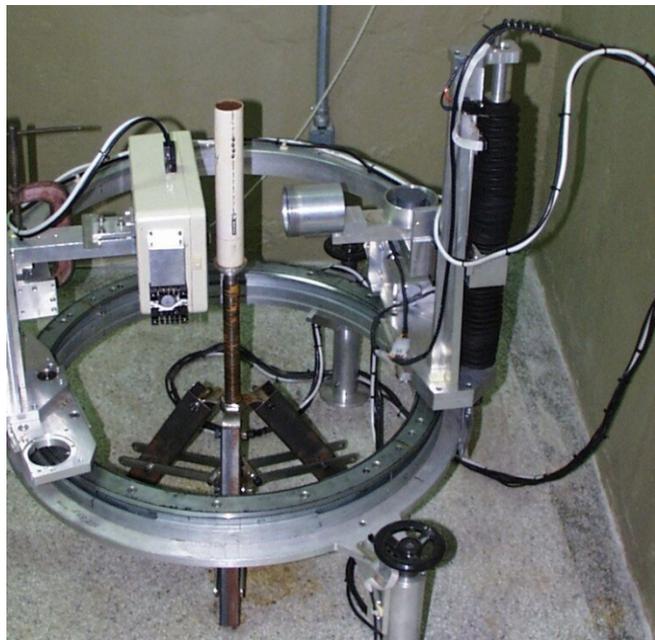


Foto: João M. Naime



Propriedades Hidráulicas do Solo Determinadas Através da Atenuação de Raios Gama

João de M. Naime¹,
Álvaro Macedo da Silva²,
Carlos Manoel Pedro Vaz³,
Silvio Crestana⁴

A previsão do movimento da água e de solutos na região não-saturada do solo é muito importante em ciência do solo, engenharia agrícola, engenharia ambiental e hidrologia de águas subterrâneas. Os modelos de previsão são dependentes do conhecimento das propriedades hidráulicas mais representativas como a curva de retenção da água no solo (CRAS), $h(\theta)$, e a condutividade hidráulica $k(\theta)$. θ representa a umidade e h representa o potencial matricial da água no solo (sucção). A CRAS e $k(\theta)$ influenciam diretamente a taxa de infiltração da água e solutos na região não-saturada do solo. Os métodos de determinação da CRAS e da $k(\theta)$ exigem a medida do teor de umidade e/ou da sucção. Para a medida da sucção ao longo do perfil, utiliza-se tensiômetros introduzidos em diversas profundidades. Dentre os diversos métodos de medida do teor de umidade, destaca-se a técnica de atenuação de raios gama por não interferir na estrutura da amostra (não invasivo), por permitir a seleção do volume onde a medida é realizada e por ter boa precisão.

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para a determinação da CRAS e da condutividade hidráulica do solo. Comparando-se com os métodos convencionais de determinação da CRAS que exigem medidas em amostras equilibradas e fluxo estacionário, o método da atenuação de raios gama apresenta as seguintes vantagens:

- tempo de análise é de 4 horas contra o mínimo de 48

horas e

- determinação da função completa, desde solo seco em estufa até ponto de saturação, contra alguns poucos pontos.

A metodologia desenvolvida baseia-se na determinação do perfil de umidade, em função do tempo, durante o processo de infiltração em uma coluna de solo estruturado, seco em estufa. Tomografias ou medidas de atenuação da radiação ao longo do perfil são utilizadas para determinar a umidade. Portanto, o instrumento de medida pode ser um tomógrafo como o desenvolvido por Naime et al. (2001a) ou o analisador granulométrico de solos (Naime et al., 2001b). O tomógrafo fornece imagens da seção transversal de diversas alturas da amostra e o analisador granulométrico faz medidas de atenuação da radiação ao longo do perfil da coluna de solo. É interessante utilizar a tomografia quando se deseja observar a distribuição de umidade na área da seção transversal ou mesmo a inspeção visual da frente de molhamento na imagem tridimensional.

O procedimento de medidas, tomografias ou apenas medidas de atenuação, se inicia com uma varredura ao longo da coluna de solo seco em uma série de seções transversais igualmente espaçadas. Em seguida, uma coluna d'água constante (10 mm) é aplicada sobre a

¹Engenheiro Eletrônico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP: 13560-970, São Carlos-SP - e-mail: naime@cnpdia.embrapa.br

²Engenheiro Eletricista, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP: 13560-970, São Carlos-SP - e-mail: alvaro@cnpdia.embrapa.br

³Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP: 13560-970, São Carlos-SP - e-mail: vaz@cnpdia.embrapa.br

⁴Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP: 13560-970, São Carlos-SP - e-mail: crestana@cnpdia.embrapa.br

amostra e repete-se a varredura no sentido descendente, nos mesmos níveis da seqüência anterior. A umidade é calculada subtraindo-se as medidas com o solo seco das medidas com o solo úmido. Portanto, obtém-se o perfil de umidade durante o processo de infiltração. O volume de água infiltrado é monitorado ao longo do tempo por meio da quantidade de água necessária para manter a altura da coluna constante.

As amostras de solo são colunas de solo parafinadas e introduzidas em tubo de PVC de 40 mm de diâmetro e 20 cm de altura. As medidas de umidade são longo do perfil da amostra.

O potencial matricial é ajustado às medidas de umidade através da solução numérica da equação de Richards. A equação de Richards é conveniente para ser aplicada em experimentos em que as medidas são feitas em diversas profundidades da coluna, porque a condição de contorno, fluxo de entrada, é conhecida. Além disto, a equação de Richards pode ser resolvida para quaisquer profundidades em tempos diferentes uma vez que nesta metodologia as medidas de umidade são feitas em diferentes instantes. Os resultados da solução numérica da equação de Richards são comparados com as medidas no perfil e os parâmetros do modelo "retenção-condutividade" são gradualmente ajustados para obter o melhor ajuste.

Na direção z do fluxo vertical da água, a solução numérica da equação de Richards parte da forma dada pela eq.(1) com as seguintes condições de contorno:

$$h = h_0, z = 0, t = 0, \quad q|_{z_b} = -k \frac{h}{z} \Big|_{z_b} = k|_{z_b}, \text{ para } \frac{h}{z} \Big|_{z_b} = 0 \quad (1)$$

h_0 é a sucção no topo da coluna, igual à altura da coluna d'água acima do solo tomada com sinal negativo; $q|_{z_b}$ é a densidade de fluxo descendente na base da coluna (z_b); a condição de contorno define drenagem livre. As condições iniciais foram representadas pelas umidades antes da aplicação da água. A equação de Richards foi resolvida pelo método de diferenças finitas com aproximação de conservação de massa no termo da umidade (Celia et al., 1990). A aproximação dos pontos internos é feita através da seguinte relação:

$$c_i^{(s-1)} \frac{h_i^{(s)} - h_i^{(s-1)}}{t^n} - \frac{c_i^{(s-1)} - c_i^{(s)}}{t^n} = \frac{1}{(\Delta z)^2} k_{i+1/2}^{(s-1)} (h_{i+1}^{(s-1)} - h_i^{(s-1)} - z) - k_{i-1/2}^{(s-1)} (h_i^{(s-1)} - h_{i-1}^{(s-1)} - z) - \frac{1}{(\Delta z)^2} k_{i+1/2}^{(s)} (h_{i+1}^{(s)} - h_i^{(s)} - z) + k_{i-1/2}^{(s)} (h_i^{(s)} - h_{i-1}^{(s)} - z) \quad (2)$$

O subscrito i denota os pontos internos $z_i, i=0,1,2,\dots,N, z_0=0, z_N=z_b, z=z_i+1-z_i$; nos cálculos foi adotado $N=100, s$ é o número de iterações para prosseguir do nível-instante n para o nível-instante n + 1; ϵ é o parâmetro de convergência foi utilizado $\epsilon=0,55$; c é a capacidade diferencial de água no solo - $c = \theta / h$. A condutividade hidráulica em pontos médios $k_{i+1/2}$ foi calculada como uma integral média utilizando-se aproximação discreta log-linear (Shcherbakov et al., 1986).

O critério de convergência utilizado para a iteração foi o seguinte:

$$\max \left| \frac{h^{(s)} - h^{(s-1)}}{h^{(s-1)}} \right|_1, h^{(s)} = 10 \quad (3)$$

$$\max \left| 1 - \frac{h^{(s)}}{h^{(s-1)}} \right|_2, h^{(s)} = 10$$

onde 1 e 2 são 0,1 e 0,001, respectivamente. O passo na escala de tempo varia; se o número de iterações for maior que 7, o passo decresce 1,2 vezes; se o número de iterações for maiorque 3, o passo aumenta 1,05 vezes mas não excede 0,001 dia (1,44 minutos).

A seguir será apresentado o modelo "retenção de água-condutividade hidráulica. Devido à amostra estar seca no início do experimento, o tradicional modelo retenção de água-condutividade hidráulica de Van Genuchten (1980) não pode ser utilizado. Utilizou-se o modelo proposto por Rossi & Nimmo (1994). Estes autores estenderam o modelo de Campbell (1974) numa faixa de umidade desde a saturação completa até a ausência de umidade.

O modelo de retenção da água é descrito por:

$$I = 1 - C \frac{h}{h_0}^2, \quad 0 < h < h_i$$

$$I = \frac{h_0}{h}, \quad h_i < h < h_j$$

$$I = \ln \frac{h_D}{h}, \quad h_j < h < h_D \quad (4)$$

h_0 e h_D são dois parâmetros do modelo, h_D é a sucção do solo seco, $h_D = 5.10^7$ cm, s é umidade saturada. Os parâmetros h_i, h_j, C e s são determinados analiticamente, como funções de h_0 e s , através das igualdades da eq.(5), que garantem a continuidade do modelo junção de dois parâmetros, desenvolvido por Rossi & Nimmo (1994).

$$I_i(h_i) = I_{II}(h_i) = \frac{I_I(h_i)}{h} = \frac{I_{II}(h_i)}{h} \quad (5)$$

$$I_{II}(h_j) = I_{III}(h_j) = \frac{I_{II}(h_j)}{h} = \frac{I_{III}(h_j)}{h}$$

Aplicando-se as igualdades da eq.(5) determina-se os parâmetros:

$$h_i = h_0 \frac{2}{2}^{1/s}; h_j = h_D \exp \left(-\frac{1}{h} \right); C = \frac{1 - \frac{h_0}{h_i}}{\frac{h_j}{h_0}}; \frac{h_0}{h_j} \quad (6)$$

A condutividade hidráulica neste modelo pode ser expressa como uma função dos mesmos dois parâmetros h_0 e s , tal como retenção de água:

$$k = K_s \sqrt{\frac{I^2(\cdot)}{I^2(\cdot_s)}} \quad (7)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica saturada,

$$I(\cdot) = I_{III}(\cdot) = 0 \quad j$$

$$I(\cdot) = I_{II}(\cdot) = j \quad i$$

$$I(\cdot) = I_I(\cdot) = i \quad s \quad (8)$$

e

$$I_{III} = \frac{h_D}{h_0} \exp \left[-\frac{1}{s} \left(\frac{h_D}{h_0} \right)^{1/s} \right]$$

$$I_{II} = I_{III}(h_j) = \frac{1}{h_0} \left[1 - \frac{1}{s} \left(\frac{h_j}{h_0} \right)^{1/s} \right]$$

$$I_I = I_{II}(h_i) = \frac{2\sqrt{C}}{h_0} \left[1 - \frac{1}{s} \left(\frac{h_i}{h_0} \right)^{1/s} \right]^{1/2}$$

(9)

Devido à condutividade hidráulica de saturação não ser conhecida nos experimentos, ela tem que ser calculada a partir dos dados experimentais com h_0 e s . Assume-se o valor de umidade de saturação calculando-se o média no topo do perfil.

Para estimar os parâmetros K_s , h_0 e s , aplica-se uma versão modificada do algoritmo Marquardt publicada por Van Genuchten (1981). O erro médio quadrático RMSE¹, entre os N parâmetros observados (h_{obs} e q_{obs}) e estimados (h_{est} e q_{est}), é minimizado tanto para a umidade como para a infiltração. Para permitir observações da infiltração acumulada, aproximadamente com o mesmo peso das medidas de umidade, os dados de umidade foram multiplicados por $10(N_{obs} - N_c)/N_c$, onde N_{obs} é o número total de observações englobando as medidas de infiltração e umidade, e N_c é o número de camadas onde foram medidas as umidades. A umidade média nas camadas é calculada antes de computar o RMSE. Para executar este modelo, é necessário fornecer estimativas iniciais de h_0 , s e K_s ; s e h_D .

As determinações dos perfis de umidade, durante o processo de infiltração, foram feitas com um tomógrafo de feixe em leque (Naime, 2001a). O tomógrafo (Fig. 1) permite analisar amostras com até 40 mm na seção transversal e até 20 cm de altura. As amostras de solo estruturado foram esculpidas a partir de blocos (Fig. 2).



Figura 1- Tomógrafo analisando amostra dentro de um tubo de PVC



Figura 2- Preparação de amostras cilíndricas para análise com tomografia

¹ RMSE: *Root Mean Square Error* $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (obs - est)^2}{N}}$

O solo utilizado neste trabalho é um latossolo roxo distrófico de um pasto da fazenda da Embrapa Pecuária Sudeste (São Carlos-SP). A classificação e a CRAS (panela de Richards) deste solo foram feitas por Primavesi et al. (1999). A textura do solo é 45% de argila, 15% de silte e 42% de areia. A argila deste solo é constituída de caulinita, mineral 1:1, portanto tem péssimas propriedades de retenção de água (Reichardt, 1996). As amostras foram secas em estufa, parafinadas e introduzidas em tubos de PVC com 40 mm de diâmetro e 20 cm de altura. No extremidade superior do tubo é reservado pelo menos 10 mm de altura para o preenchimento com água. Nesta análise foram feitas 31 tomografias espaçadas em 5 mm no sentido vertical, totalizando 150 mm de altura. Após a determinação dos valores médios de umidade de cada tomografia e dos valores de infiltração, foi o executado o programa de ajuste dos parâmetros h_0 , s e K_s através do algoritmo Marquardt.

A Tabela 1 mostra os valores de entrada e saída do programa. Na tabela, vêm-se também os parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994), calculados a partir dos resultados do programa. Os parâmetros de Rossi & Nimmo são utilizados para determinar a curva de retenção da água no solo, $k(\theta)$ e $D(\theta)$.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). em cm³.cm⁻³ e h em cm.

Entrada		Saída Marquardt			Rossi & Nimmo					
s	h_0	h_0	K_s	h_i	h_j	C	(h_i)	(h_j)		
0,45	$5 \cdot 10^7$	42,42	0,1015	0,1572	69,09	2631,52	0,0182	0,0668	0,4283	0,2960

Os valores de infiltração estimados pelo modelo e os valores medidos são mostrados na Fig. 3. A Tabela 2 mostra a correlação entre estes valores, as equações de ajuste da infiltração e densidade de fluxo, o R^2 e o RMSE da curva de infiltração.

Tabela 2 - Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R² e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q (cm.h ⁻¹)
Medida	0,999	$2,190 \cdot t^{0,5}$	1	0,0013	$1,095 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,040 \cdot t^{0,5}$			$1,020 \cdot t^{0,5}$

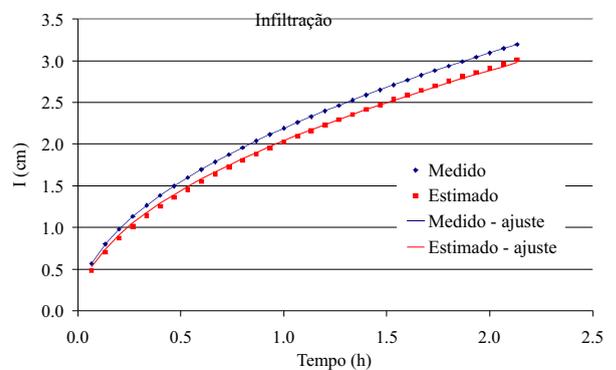


Figura 3 - Curvas de infiltração medida e estimada (pontos) a função ajustada é representada pelas linhas contínuas

Na Fig. 4a, apresenta-se a comparação entre os valores medidos e calculados do perfil de umidade da amostra, obtidos durante a primeira seqüência de tomografias.

Geralmente, a curva dos valores simulados apresenta queda mais acentuada que a medida devido a dois possíveis motivos: os modelos que utilizam a equação de Richards não consideram os fluxos preferenciais, causados pelo processo de preparação da amostra, que podem ocorrer na coluna; o segundo motivo pode ser variações na massa específica global ao longo da coluna. A diminuição da densidade no sentido descendente provoca um ligeiro aumento da condutividade hidráulica e retenção de água nas seções próximas à base da coluna. Inclusive, esta pode ser a razão da infiltração acumulada medida ser maior que a estimada.

A correspondência entre os dados medidos da retenção da água e da curva de retenção calculada com os parâmetros do modelo de Rossi-Nimmo é mostrada na Fig. 4b. Os dados experimentais da curva de retenção para este solo foram obtidos por Primavesi et al. (1999), através do método da panela de Richards. A boa correspondência indica que o número de seções medidas e os tempos envolvidos no experimento, produziram informações suficientes sobre a forma de frente de molhamento que por sua vez, indica a forma da curva de retenção.

Adicionalmente, utilizando-se as equações (6), (7) e (8), o modelo permite determinar a função condutividade hidráulica (Fig. 5a). Determinada esta função, calcula-se a difusividade hidráulica em função da umidade (Fig. 5b), por meio da eq.(10). Da curva de retenção obtém-se h/θ .

$$D = K \frac{h}{\theta} \quad (10)$$

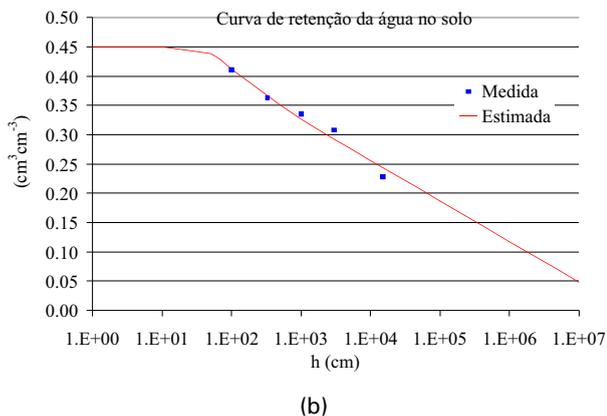
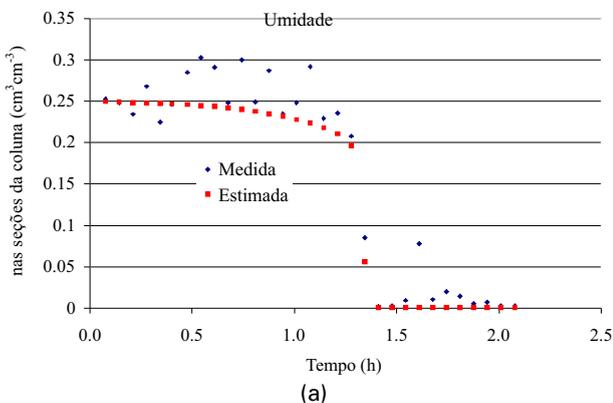


Figura 4 - Amostra PC2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b)

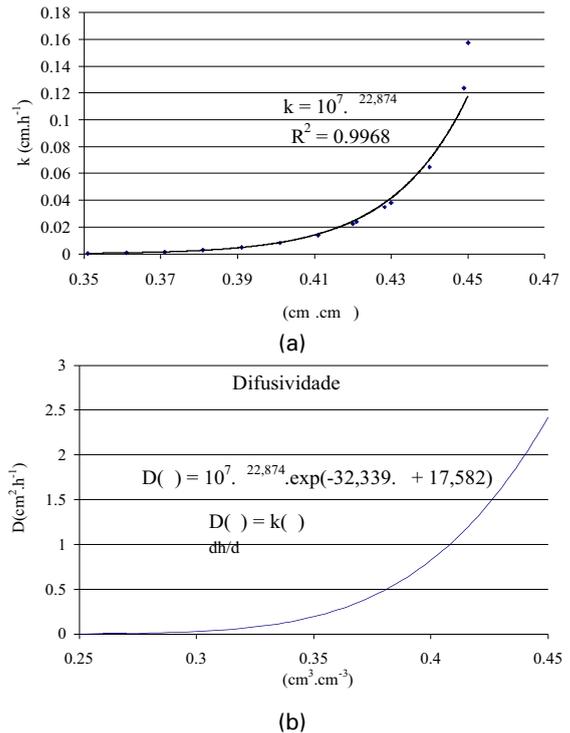


Figura 5 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo

Os resultados obtidos com 5 diferentes amostras da mesma área mostraram boa correlação ($R^2 = 0,97$) com aqueles obtidos por Primavesi et al. (1999). A utilização do tomógrafo para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, na configuração atual, está limitado a solos de textura fina. Em solos de textura grossa a infiltração é muito mais rápida, o perfil satura antes do término da varredura tomográfica. Para vencer esta limitação, propomos a utilização do analisador granulométrico de solos, onde o tempo de medida em cada seção transversal será de no máximo 1 minuto. No programa de controle do analisador está sendo implementada uma rotina para determinar o perfil de umidade. Alterações no tomógrafo também possibilitariam a análise de solos de textura grossa, mas estas alterações demandam algumas dezenas de milhares de dólares para aquisição de um outro sistema de detecção, mais rápido e eficiente, além da compra de uma fonte radioativa puntual com alta atividade.

Referências Bibliográficas

CAMPBELL, G. S. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, Baltimore, v.117, n. 6, p. 311-314, 1974.

CELIA, M. A.; BOULOTAS, E. T.; ZARBA, R. L. A general mass-conservative numerical solution for unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, v. 26, p.1483-1496, 1990.

NAIME, J. M.; MACEDO. A.; CRESTANA, S. Tomógrafo de campo dedicado a estudos de parâmetros físicos da infiltração da água no solo. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2001a. 7 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico, 42).

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001b.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. P. A.; PEDROSO, A. F.; CAMARGO, A. C.; RASSINI, J. B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G. P.; CORREA, L. A.; ARMELIN, M. J. A., VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. *Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim: um modelo real de laboratório ambiental*. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. 133 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Boletim de Pesquisa, 5).

REICHARDT, K. *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. 2. ed. Piracicaba: USP-ESALQ-Departamento de Física e Meteorologia, 1996. 513 p.

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. Modeling soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resources Research*, Washington, v. 30, p. 701-8(1994).

SHCHERBAKOV, R. A.; PACHEPSKY, Y. A.; KUZNETSOV, M. Y. Comparison of methods of calculating one-dimensional moisture transport in soils. *Water Resources Research*, Washington, v. 13, p. 11-20, 1986.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, p. 892-989, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T. Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. Riverside: U.S. Salinity Laboratory: USDA-SEA-ARS, 1981. (Research Report, 119).

Comunicado Técnico, 48

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: 16 274 2477
Fax: 16 272 5958
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br
www.cnpdia.embrapa.br

1a. edição
1a. impressão 2002: tiragem 300

Comitê de Publicações

Presidente: *Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso*
Secretária Executiva: *Janis Aparecida Baldovinotti*
Membros: *Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis,*
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Rubens Bernardes Filho,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo
Membro Suplente: *Débora Marcondes B. P. Milori*

Expediente

Supervisor editorial: *Dr. Odílio B. Garrido de Assis*
Revisão de texto: *Janis Aparecida Baldovinotti*
Tratamento das ilustrações: *Valentim Monzane*
Editoreção eletrônica: *Valentim Monzane*