

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO NUMÉRICO PARA O PROCESSO DE REDISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO⁽¹⁾

P. C. POLISELI⁽²⁾ & C. L. PREVEDELLO⁽³⁾

RESUMO

Para testar o desempenho de um modelo numérico em prever a variação em umidade (θ) e tensão da água ($|\psi_m|$) no tempo e no espaço, foram escolhidos dados da literatura de dois materiais porosos com diferentes propriedades hidráulicas: uma areia marinha (Tottori, Japão) e um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média (Piracicaba, SP). Os resultados encontrados levaram às seguintes conclusões: (a) em ambos os materiais porosos estudados, o desempenho do modelo foi altamente significativo, onde os perfis de umidade trasladaram-se satisfatoriamente no tempo; (b) o modelo também foi capaz de prever muito bem o comportamento da densidade de fluxo em função do tempo; (c) os maiores desvios do modelo em relação aos dados de campo foram encontrados nos tempos iniciais do processo de redistribuição da água, muito embora esses desvios tenham ocorrido em apenas 0,2% do tempo total estudado no experimento em areia marinha e 2,0% para o Latossolo; (d) o desempenho do modelo foi ligeiramente superior para a areia marinha em relação ao Latossolo, devido, provavelmente, à maior homogeneidade nas propriedades hidráulicas da areia. Este trabalho foi realizado, no segundo semestre de 1996, na Universidade Federal do Paraná.

Termos de indexação: equação de Richards, modelagem numérica.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal do Paraná - UFPR para obtenção do título em Agronomia, Área de Concentração "Ciência do Solo". Recebido para publicação em abril de 1997 e aprovado em novembro de 1998.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo. Rua Cel. Francisco de Paula Moura Brito 187 Ap^{to} 03, Bacacheri, CEP 82520-570 Curitiba (PR). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Engenharia e Tecnologias Rurais, Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Caixa Postal 2959, CEP 80001-970 Curitiba (PR).

SUMMARY: *EXPERIMENTAL EVALUATION OF A NUMERICAL MODEL FOR A SOIL-WATER REDISTRIBUTION PROCESS*

To test the performance of a numeric model in prediction of water content (θ) and tension ($|\psi_m|$) in time and space, data were chosen from the literature on two porous materials with different hydraulic properties: a marine sand (quartzsammment) of Tottori, Japan and a sandy phase Red-Yellow Latosol (Haplustox) of Piracicaba, SP. The results led to the following conclusions: (a) in both porous materials studied, the behaviour of the model was highly significant, with the profiles of humidity aligning satisfactorily in time; (b) the model was also able to predict very well the behaviour of the flux density in relation to time; (c) the largest deviations of the model in relation to those of the field data were found at the initial times of the water redistribution process, although these deviations had occurred in just 0.2% of the total time studied in the sand dune experiment, and 2.0% for Latosol; (d) the model performance was slightly superior for the marine sand in relation to that for the Latosol, probably due to the higher homogeneity of the hydraulic properties of the sand. This work was carried out during the second semester of 1996, at the Universidade Federal do Paraná.

Index terms: soil-water redistribution, Richard's equation, numerical model.

INTRODUÇÃO

Quando cessa a chuva ou irrigação e a reserva de água da superfície do solo esgota-se, o processo de infiltração chega ao fim. O movimento da água dentro do perfil, por outro lado, não cessa imediatamente e pode persistir por muito tempo. Esse movimento pós-infiltração é denominado drenagem interna ou redistribuição. Esse processo caracteriza-se em aumentar a umidade de camadas mais profundas pela água contida nas camadas superficiais inicialmente umedecidas.

A importância desse fenômeno reside no fato de tal processo determinar a quantidade de água retida a cada instante pelas diferentes camadas no perfil do solo, água esta que fica disponível às plantas. A velocidade e a duração do processo determinam a capacidade efetiva de armazenamento do solo, propriedade esta de vital importância na economia de água às plantas. A compreensão e a avaliação do processo de redistribuição da água no solo também são muito úteis nos estudos de irrigação, drenagem, erosão, biologia, lixiviação de elementos químicos e orgânicos, poluição do solo e da água, dentre outros.

A avaliação desse processo no campo demanda considerável tempo e apreciável custo, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e freqüentes alterações no tempo.

A utilização de modelagem matemática para avaliação desse processo permite obter informações rápidas sem demandar altos investimentos, podendo, ainda, ser poderoso instrumento de avaliação para técnicos de áreas afins ou interessados em estudos hidrológicos, mediante uso de programa de computação de fácil acesso e manuseio.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um modelo numérico desenvolvido por Prevedello (1996) para simular o processo de redistribuição da água no solo, por meio da comparação com dados de campo obtidos em estudos desse processo numa duna de areia e num Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, efetuados por Cho et al. (1977) e Libardi (1978), respectivamente.

Considerações teóricas

O desenvolvimento do modelo numérico de Prevedello (1996) baseou-se na teoria de Mualem (1976) e nas equações combinadas de Van Genuchten (1980) para as funções umidade (θ) e condutividade hidráulica (K), ambas em função do potencial mátrico (ψ_m). Prevedello (1996) ainda utilizou uma simplificação na função $\theta(\psi_m)$ de Van Genuchten (1980), eliminando o termo unitário no denominador dessa função, a fim de viabilizar a integração da equação de Buckingham-Darcy, já que, como argumentam Jury et al. (1991), a forma integrada dessa equação pode produzir uma expressão analítica para a densidade de fluxo mátrico. Então, a equação de Richards (1931), para valores de $|\psi_m| \gg 1/\alpha$ (decorrente da simplificação), sendo α um parâmetro (positivo) de ajuste da curva de retenção, pode ser escrita como (Prevedello, 1996):

$$\frac{(\theta_i^{j+1} - \theta_i^j)}{\Delta t} (z_i - z_{i-1}) = \frac{\left[\frac{K_{i+1}\psi_{mi+1}}{1 - EE_{i+1}} - \frac{K_i\psi_{mi}}{1 - EE_i} \right]}{(z_{i+1} - z_i)} - K_i - \left[\frac{\frac{K_i\psi_{mi}}{1 - EE_i} - \frac{K_{i-1}\psi_{mi-1}}{1 - EE_{i-1}}}{(z_i - z_{i-1})} \right] + K_{i-1} \quad (1)$$

Na equação (1), Δt é o intervalo de tempo em que ocorre a variação $\theta_i^{j+1} - \theta_i^j$, sendo θ_i^{j+1} e θ_i^j as

umidades volumétricas na profundidade i nos tempos $j + 1$ e j , respectivamente; z é a coordenada de posição vertical; $EE_i = 2 + 2,5 n_i m_i$, sendo n e m parâmetros de ajuste da curva de retenção, próprios da profundidade i . O primeiro membro da equação (1) representa a variação de armazenamento de água ocorrida na camada $z_i - z_{i-1}$ durante o intervalo de tempo Δt ; o segundo membro considera, para essa camada e período de tempo, que a densidade de fluxo mátrico é constante. Num perfil de solo, com i profundidades, é necessário encontrar os valores de Ψ_m que satisfaçam a igualdade da equação (1) para assegurar o princípio da conservação da matéria em todas essas profundidades, desde $i = 1$ até N , em que N é o número total de profundidades consideradas. E esses valores de Ψ_m que asseguram a igualdade da equação (1) podem ser conhecidos, já que as funções $K(\Psi_m)$ e $\theta(\Psi_m)$ são conhecidas (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). Dessa forma, a equação de Richards, na qual a condutividade hidráulica é função da variável dependente (θ ou Ψ_m) passa a ser linearizada no espaço. Contudo, ela se apresenta não-linear no tempo. Neste caso, Prevedello (1996) utilizou o método das aproximações sucessivas ou iterativo de Newton-Raphson, que consiste, genericamente, em evoluir da aproximação x_k para a aproximação x_{k+1} usando a fórmula $x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$, com $k = 0, 1, 2, \dots$ (Boratto, 1987; Cunha, 1993; Prevedello, 1996).

Portanto, para aplicar o método iterativo de Newton-Raphson na equação (1), é necessário derivá-la com respeito à variável dependente Ψ_m . Antes disso, é conveniente expressá-la da seguinte forma:

$$F_i = 0 = \frac{(\theta_i^{j+1} - \theta_i^j)}{\Delta t} (z_i - z_{i-1}) - \frac{\left(\frac{K_{i+1}\Psi_{mi+1}}{1-EE_{i+1}} - \frac{K_i\Psi_{mi}}{1-EE_i} \right)}{(z_{i+1} - z_i)} + K_i + \frac{\left(\frac{K_i\Psi_{mi}}{1-EE_i} - \frac{K_{i-1}\Psi_{mi-1}}{1-EE_{i-1}} \right)}{(z_i - z_{i-1})} - K_{i-1} \quad (2)$$

Com isso, é necessário encontrar os valores de Ψ_m que tornem $F_i = 0$ em todas as profundidades i de interesse no solo. Assim, derivando a equação (2) com relação a Ψ_{mi} , chega-se a:

$$\frac{\partial F_i}{\partial \Psi_{mi}} = - \frac{\alpha m (\theta_s - \theta_r) \Theta^{1/m} (1 - \Theta^{1/m})^m}{(1 - m) \Delta t} (z_i - z_{i-1}) + \frac{K_i}{z_{i+1} - z_i} - \frac{EE_i K_i}{\Psi_{mi}} + \frac{K_i}{z_i - z_{i-1}} = 0 \quad (3)$$

em que $\Theta = 1 / \left[1 + (\alpha |\phi_m|)^n \right]^{1/m}$; $n = 1 - 1/m$; e θ_s e θ_r são, respectivamente, as umidades de saturação e residual, ambas consideradas como parâmetros independentes na equação de Van Genuchten (1980).

As equações (2) e (3), juntamente com as condições de fronteira (Prevedello, 1996), devem ser resolvidas para se encontrar Ψ_m e θ no final de cada tempo e profundidade de interesse, para simular o processo de redistribuição da água do solo. E elas deverão ser novamente utilizadas, para reavaliar esses termos quantas vezes forem necessárias (iterações), até que ocorra a convergência, ou seja, quando F de cada profundidade se torne suficientemente próximo de zero, como se impõe na equação (2).

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar o desempenho do modelo numérico desenvolvido por Prevedello (1996), foram utilizados dados da literatura de dois materiais porosos com diferentes propriedades hidráulicas, ambos submetidos ao processo de redistribuição da água. Dessa maneira, foram escolhidos uma areia marinha e um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, estudados por Cho et al. (1977) (Tottori, Japão) e por Libardi (1978) (Piracicaba, SP), respectivamente. Todos os detalhes da instalação, caracterização do material poroso e desenvolvimento experimental encontram-se nesses trabalhos, de modo que aqui somente serão fornecidas algumas informações julgadas indispensáveis. Nesses trabalhos, tanto a areia quanto o Latossolo foram submetidos às mesmas condições iniciais e de contorno, ou seja, após a saturação do perfil, foram cobertos na sua superfície com lona plástica, o que permitiu evitar qualquer fluxo na superfície, seja por evaporação ou infiltração. Dessa forma, em ambos os casos, a histerese pôde ser desprezada, considerando-se somente a ocorrência do processo de desorção. Os experimentos foram desenvolvidos na ausência da influência do lençol freático, dada sua grande profundidade.

Por questão de disponibilidade de dados, foi considerado que os valores dos parâmetros hidráulicos requisitados no modelo para $z = 0$ eram os mesmos da profundidade mais superficial estudada por Cho et al. (1977) e Libardi (1978), ou seja, 0,05 para a areia e 0,15 m para o Latossolo.

Para achar os valores de Ψ_m , em ambos os experimentos, esses autores utilizaram tensiômetros. Para calcular os valores de θ , foram usadas sonda de nêutrons, para a areia, e curva de retenção, para o Latossolo. A condutividade hidráulica saturada, para a areia, foi obtida por Cho et al. (1977) sob condições de infiltração permanente, correspondendo com a umidade na saturação. Para o experimento em Latossolo, a condutividade hidráulica saturada foi medida por meio de um permeâmetro de carga constante, no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, em 1995, utilizando amostras indeformadas e coletadas em anéis volumétricos de 67,6 cm³ em área próxima (50 m) do experimento de Libardi (1978).

Os parâmetros independentes da equação de Van Genuchten (1980), ou seja, umidade residual (θ_r), α e m (em que $m = 1 - 1/n$), foram estimados a partir dos dados da curva de retenção, isto é, do potencial mátrico (ψ_m) e umidade volumétrica (θ), para cada profundidade de interesse, a partir dos dados de campo de Cho et al. (1977) e de Libardi (1978), mediante o uso de um programa de regressão não-linear que emprega a técnica dos mínimos quadrados, conforme Boratto (1987).

Prevedello (1996) transcreveu seu modelo numérico na linguagem BASIC de programação. O programa fornece os valores de potencial mátrico e de umidade volumétrica para as diferentes profundidades de interesse, no tempo solicitado, além dos dados de densidade de fluxo total (mátrico mais gravitacional).

Os dados fornecidos pelo modelo numérico de Prevedello (1996) foram comparados estatisticamente com os resultados experimentais obtidos por Cho et

al. (1977) e Libardi (1978), por meio do teste de significância para médias de amostras independentes, baseando-se na distribuição t , conforme Zar (1974).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento em areia marinha

Com os dados de campo obtidos por Cho et al. (1977), da umidade em função do tempo, para as diferentes profundidades, juntamente com os dados obtidos via modelo de Prevedello (1996), foi elaborado o gráfico da umidade em função do tempo de redistribuição da água na areia, utilizando as profundidades de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 e 1,00 m (Figura 1). A análise estatística desses dados revelou não haver diferença entre os dados de campo e do modelo, a 5% de significância.

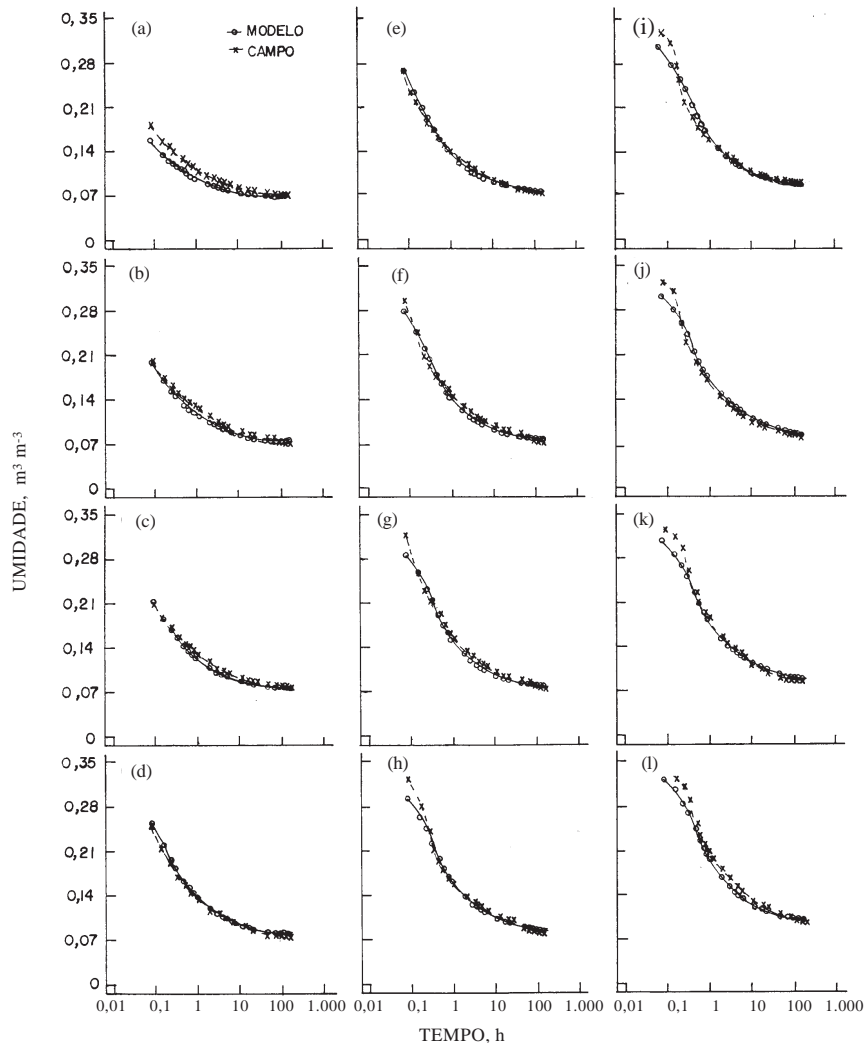


Figura 1. Umidade em função do tempo para o experimento em areia marinha, obtida mediante modelo numérico de Prevedello (1996) e dados de campo de Cho et al. (1977). (As letras a, b, ..., l indicam as profundidades de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; e 1,00 m, respectivamente).

Observa-se que os valores de umidades calculadas e medidas, na maioria das profundidades, chegaram a sobrepor-se em boa parte do tempo. Contudo, podem ser observadas pequenas diferenças entre eles, para tempos iniciais, principalmente nas profundidades de 0,05; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 e 1,00 m, sendo mais pronunciadas na profundidade de 0,05 m. Esse fato deve-se, provavelmente, à limitação referente à necessidade de $|\psi_m|$ ser maior do que $1/\alpha$, imposição essa resultante da simplificação utilizada por Prevedello (1996) na equação de Van Genuchten (1980). Observou-se a ocorrência dessa limitação para a maioria das profundidades, pelo menos até o vigésimo minuto. Esse tempo, contudo, representa somente cerca de 0,2% do tempo total estudado no experimento desenvolvido por Cho et al. (1977). Além disso, a maior diferença relativa observada entre os valores medidos e calculados não ultrapassa 10%.

A figura 2 mostra os perfis de umidade obtidos experimentalmente e por meio de simulação para os tempos de 5 e 30 min, e de 1, 6 e 168 h. Para cada

um desses tempos de redistribuição, os resultados obtidos pelo modelo não se mostraram, a 5% de significância, diferentes dos resultados obtidos experimentalmente.

Como o modelo de Prevedello (1996) também fornece dados relativos à densidade de fluxo, esses foram comparados com os obtidos no trabalho de Cho et al. (1977) e, neste caso, também não houve diferenças entre eles, a 5% de significância, para todas as profundidades (Figura 3). Os maiores desvios encontram-se nas profundidades de 0,05, 0,10, 0,15 e 0,20 m, somente para os tempos iniciais, conforme comentado anteriormente.

Experimento em Latossolo

Na figura 4, encontram-se os valores de umidade em função do tempo, para as profundidades de 0,15, 0,30, 0,45, 0,60, 0,75, 0,90, 1,05, 1,20 e 1,35 m, no Latossolo, elaborados a partir de dados de campo obtidos por Libardi (1978) e dos dados gerados via modelo de Prevedello (1996). A análise estatística desses dados demonstrou não haver diferença entre

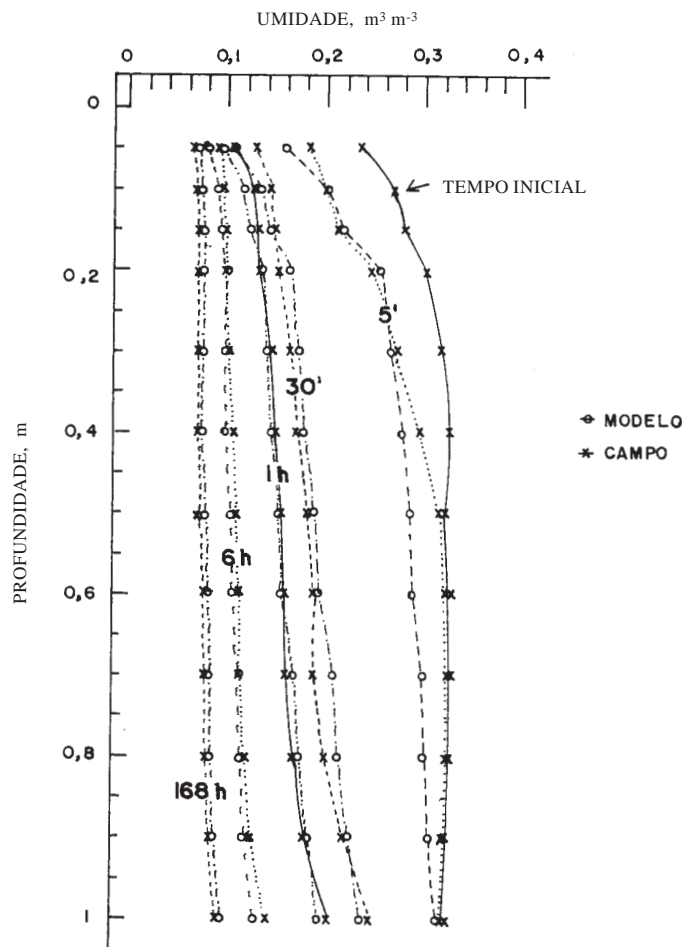


Figura 2. Umidade em função da profundidade para o experimento em areia marinha, obtida mediante modelo numérico de Prevedello (1996) e dados de campo de Cho et al. (1977), para os tempos de 5 e 30 minutos e de 1, 6 e 168 horas.

eles a 5% de significância. Observa-se que, a exemplo da areia, as curvas do modelo acompanham a mesma tendência na redução da umidade com o tempo, chegando mesmo a sobrepor-se nos intervalos de tempo finais, para todas as profundidades estudadas. As maiores diferenças nos valores do modelo em relação aos de campo, de modo geral, ocorreram até a décima hora, o que corresponde a aproximadamente 2% do tempo total estudado no experimento realizado por Libardi (1978). Essas diferenças devem-se, provavelmente, ao mesmo motivo relatado anteriormente, pois, do mesmo modo que ocorreu no experimento em areia marinha, observou-se que, nos

tempos iniciais do experimento em Latossolo, os valores de $|\psi_m|$ foram menores do que $1/\alpha$, para a maioria das profundidades, até a décima hora, aproximadamente. Mesmo assim, a maior diferença relativa observada ocorreu na profundidade de 1,20 m, no tempo de 3 h, aproximando-se de 13%.

Nas figuras 1 e 4, percebeu-se que o desempenho do modelo foi ligeiramente superior para os dados do experimento em areia marinha. Isso, provavelmente, é devido ao fato de o material estudado por Cho et al. (1977) aproximar-se mais da condição de homogeneidade hidráulica em relação ao material estudado por Libardi (1978).

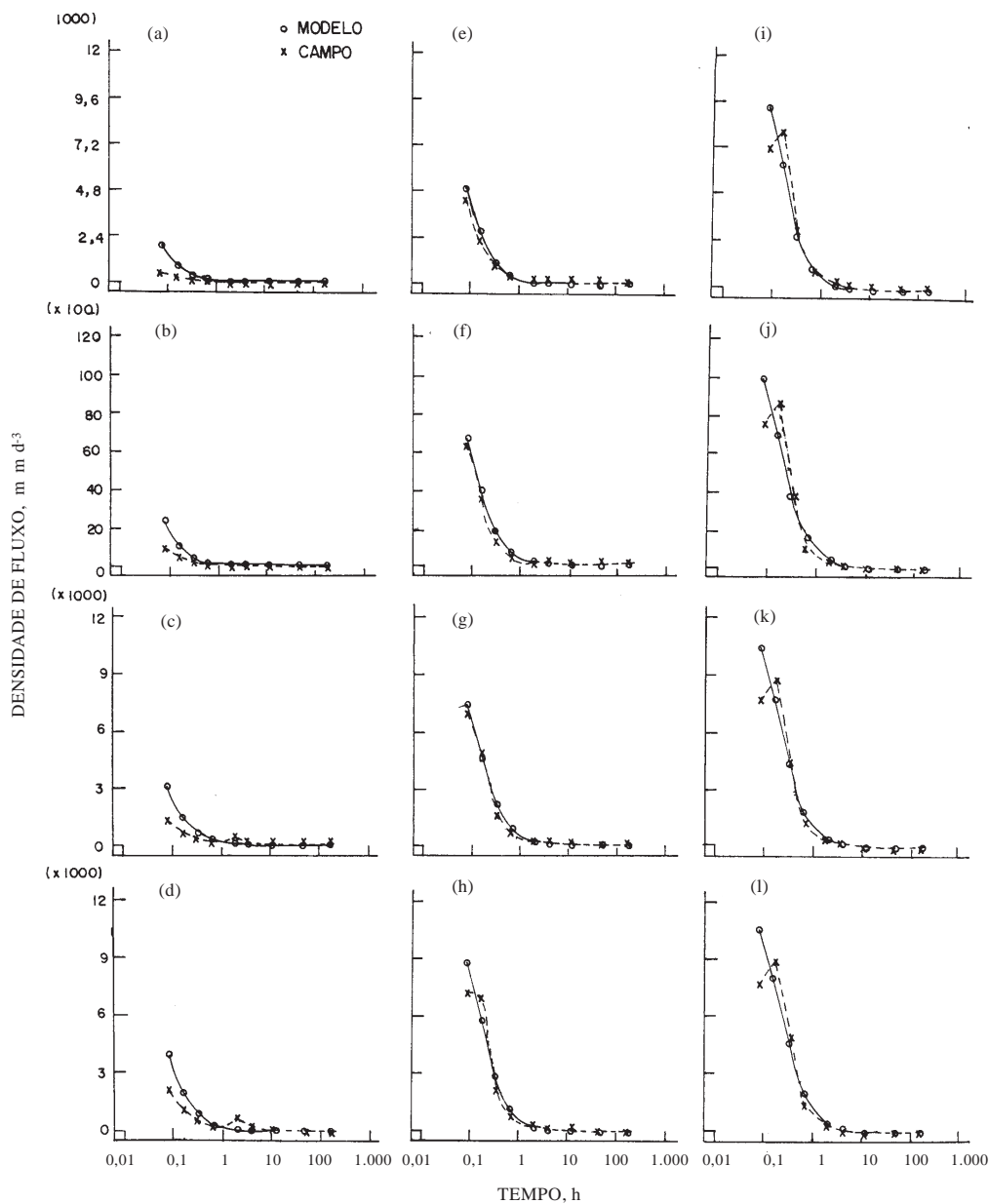


Figura 3. Densidade de fluxo em função do tempo, obtida mediante modelo numérico de Prevedello (1996) e dados de Cho et al. (1977). (As letras a, b, ..., l indicam as profundidades de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; e 1,00 m, respectivamente).

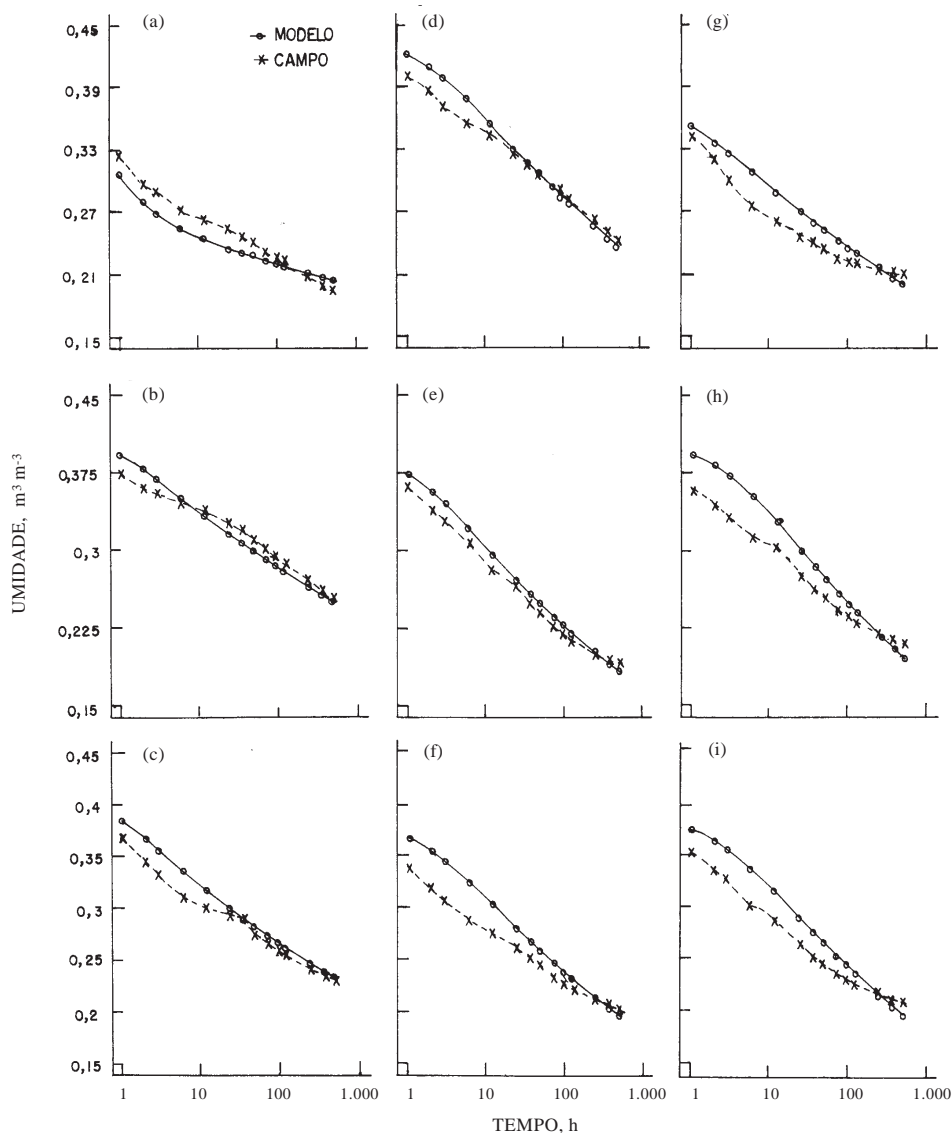


Figura 4. Perfis de umidade em função do tempo para o experimento em Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, obtidos mediante modelo numérico de Prevedello (1996) e dados de campo de Libardi (1978). (As letras a, b, ..., i indicam as profundidades de 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 0,90; 1,05; 1,20; e 1,35 m, respectivamente).

CONCLUSÕES

1. O desempenho do modelo numérico de Prevedello (1996), para simulação do processo da redistribuição da água no solo, foi altamente satisfatório para ambos os materiais porosos estudados, mesmo para camadas dotadas de propriedades hidráulicas relativamente distintas.

2. O modelo também descreveu adequadamente a variação da densidade de fluxo no tempo para a areia marinha, em todas as profundidades.

3. Os maiores desvios do modelo frente aos dados experimentais ocorreram nos tempos iniciais,

provavelmente devidos à limitação da teoria para os valores de $|\psi_m|$ menores do que $1/\alpha$. Mesmo assim, em termos percentuais, esses desvios, para a umidade, não foram superiores a 10%, para a areia, e 13%, para o Latossolo. O desempenho do modelo foi ligeiramente superior para a areia marinha, tendo em vista, provavelmente, sua maior homogeneidade nas propriedades hidráulicas.

LITERATURA CITADA

BORATTO, F. BASIC para engenheiros e cientistas. 3.ed. Rio de Janeiro, Livros técnicos Científicos,1987. 135p.

- CHO, T.; NOMURA, Y.; YANO, T.; SKIKASHO, S. & INOUE, M. The use of neutron moisture meter in studies of soil water regimes - water management in a sand dune area. Tottori, Faculty of Agriculture, Tottori University, 1977. 48p.
- CUNHA, C. Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas. Campinas, UNICAMP, 1993. 265p.
- JURY, W.A.; GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H. Soil physics. 5.ed. New York, John Wiley & Sons, 1991. 328p.
- LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica do solo em condições de campo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1978. 112p. (Tese de Doutorado)
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Res. Res., 12:513-522, 1976.
- PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba, Salesward-Discovery, 1996. 446p.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics, 1:318- 333, 1931.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.
- ZAR, J.H. Biostatistical analysis. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1974. 620p.