

Sensibilidade do Modelo *Hydrus* aos Parâmetros Hidráulicos do Solo em Diferentes Texturas

Henrique Marinho Leite Chaves

EFL-Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília-UnB

hlchaves@terra.com.br

Recebido: 11/09/07 – revisado: 05/11/07 – aceito: 01/06/09

RESUMO

O modelo matemático *Hydrus* é um dos mais usados atualmente na estimativa do processo de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, em estudos de recarga e contaminação de aquíferos. Os parâmetros hidráulicos do modelo são θ_s , θ_r , n , α , K_s , e I . Apesar de estudos anteriores já terem identificado que o modelo *Hydrus* apresenta maior sensibilidade a alguns dos parâmetros acima, eles não a quantificaram numericamente, nem avaliaram o efeito de diferentes tipos ou texturas de solo na sensibilidade do modelo. O objetivo do presente estudo foi o de calcular a sensibilidade relativa (S_r) de 5 variáveis de saída do modelo *Hydrus* aos 6 parâmetros supra mencionados, simulando a percolação de água em uma coluna de 61 cm de solo, com tensão inicial (uniforme) de $H=-150$ cm, lâmina de água de 2 cm na superfície, e drenagem livre no fundo. As variáveis de saída analisadas foram: a) o fluxo de água no fundo da coluna, b) o fluxo de água acumulado no fundo, c) o tempo necessário para a saturação do fundo da coluna, d) o volume de água armazenado na coluna, e e) a umidade no fundo da coluna ao fim da simulação. Para avaliar o efeito da textura na sensibilidade do modelo, 3 solos do Cerrado foram usados nas simulações: 1) um Neossolo quartzarênico (arenoso), 2) um Latossolo Vermelho-amarelo (textura média), e 3) um Latossolo Vermelho-amarelo (argiloso). Concluiu-se que o modelo *Hydrus* foi mais sensível ao parâmetro n ($S_r=2,79$), seguido dos parâmetros θ_s ($S_r=1,01$) e α ($S_r=0,85$). O modelo foi praticamente insensível ao parâmetro I ($S_r=0,04$). Em média, o modelo apresentou uma maior sensibilidade sob o solo argiloso ($S_r=1,22$), seguido do de textura média ($S_r=0,98$), com o arenoso apresentando a menor sensibilidade relativa ($S_r=0,73$). O fluxo de água acumulado foi a variável de saída do modelo mais sensível aos 6 parâmetros estudados ($S_r=2,34$).

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, percolação, modelo *Hydrus*.

INTRODUÇÃO

O modelo *Hydrus 1-D* (Simunek et al., 2005) é um dos mais usados atualmente para a estimativa do movimento de água e de compostos químicos na zona vadosa do solo, em estudos de recarga e poluição de aquíferos. O movimento de água no solo é calculado através da solução numérica da equação de Richards, pelo método das diferenças finitas (Celia et al., 1990). A equação de Richards em 1 dimensão é expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Onde θ é o conteúdo de água no solo (a-dim.), h (cm) é a tensão de água no solo, t (h) é o tempo, x (cm) é a coordenada vertical (positiva para

cima), e K (cm h⁻¹) é a condutividade hidráulica do solo.

Dentre as equações usadas pelo modelo *Hydrus* para a relação entre condutividade não saturada, o conteúdo e a tensão de água no solo, está a de van Genuchten-Mualen (van Genuchten, 1980):

$$K_r(h) = \Theta^l [1 - (1 - \Theta^{\lambda/m})^m]^2 \quad (m = 1 - 1/n) \quad (2)$$

e

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = [1 / (1 + (\alpha h)^n)]^m \quad (3)$$

Onde K_r (adim.) é a condutividade de água relativa do solo, Θ (adim.) é a saturação efetiva do solo, θ_s (adim.) é conteúdo de água no solo saturado, θ_r (adim.) é o conteúdo de água residual do solo, K_s (cm h⁻¹) é a condutividade saturada ($K_s = K / K_r$), λ (adim.) é a tortuosidade do solo, e n e α são parâmetros de ajuste.

Considerando a alta não-linearidade das equações acima, espera-se que o modelo apresente sensibilidades diferentes aos parâmetros hidráulicos, exigindo maiores cuidados dos usuários na obtenção daqueles mais importantes (Beck, 1983).

De fato, estudos anteriores realizados em solos temperados identificaram que o conteúdo de água no solo no modelo *Hydrus* foi mais sensível ao parâmetro n , seguido de θ_s (Abbasi et al., 2003; Rocha et al., 2006). Entretanto, as sensibilidades relativas do modelo a cada um dos parâmetros, e o efeito da textura do solo, não foram avaliados.

A sensibilidade relativa (S_r), que permite a comparação entre as sensibilidades do modelo a cada parâmetro, é definida como a razão entre a taxa de variação da resposta do modelo (ΔO) a uma pequena variação na entrada (ΔF), normalizadas pelos valores iniciais da saída (O_0) e da entrada (F_i), respectivamente (McCuen & Snyder, 1986):

$$S_r = (\Delta O / O_0) / (\Delta F / F_i) \quad (4)$$

Se $|S_r| > 1,5$ o modelo apresenta alta sensibilidade ao parâmetro. Se $|S_r| < 0,5$, a sensibilidade é baixa, sendo intermediária para $0,5 < |S_r| < 1,5$ (Chaves, 1991). Valores negativos de S_r indicam que o modelo é negativamente correlacionado com o parâmetro, enquanto valores próximos a zero indicam que o modelo é relativamente insensível ao parâmetro (McCuen & Snyder, 1986).

Em função do exposto, os objetivos do presente trabalho foram:

- i) Determinar a sensibilidade relativa das variáveis hídricas do modelo *Hydrus 1-D* (Simunek et al, 2005) a cada um dos parâmetros hidráulicos do modelo, e
- ii) Verificar se a textura do solo afeta a sensibilidade do modelo aos seus parâmetros hidráulicos, através da simulação com 3 solos do Cerrado de texturas diferentes.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho constituiu de simulações do movimento de água no solo com o modelo *Hydrus 1-D*, versão 3.3 (Simunek et al, 2005), em um micro-computador. O caso simulado foi o de uma coluna de solo de 61 cm de altura, com drenagem livre no fundo, tensão inicial uniforme de $h = -150$ cm, e uma

lâmina d'água de 2 cm na superfície, de acordo com o descrito por Skaggs et al. (1970).

As variáveis de saída do modelo analisadas foram: a) o fluxo de água no fundo da coluna (F_r , em cm h^{-1}), b) o fluxo de água acumulado no fundo ($F_{ac\ f}$, em cm), c) o tempo necessário para a saturação do fundo da coluna ($T_{h=0}$, em h), d) o volume de água armazenado na coluna (V_{arm} , em cm), e e) a umidade no fundo da coluna ao fim da simulação (θ_{emT} , adim.).

Parâmetros de van Genuchten (1980) de 3 solos do Cerrado foram usados:

1. os de um Neossolo quartzarênico (arenoso, RQ2),
2. os relativos a um Latossolo Vermelho-amarelo textura média (LVAd1), e
3. os de um Latossolo Vermelho-amarelo argiloso (LVd2), conforme obtidos por Silva et al., (2006).

Além dos parâmetros θ_s , θ_r , α e n , obtidos por esses autores através do método da centrífuga e da regressão linear com o modelo de van Genuchten, o parâmetro K_s foi obtido para cada solo pela sub-rotina de redes neurais do modelo *Hydrus*, usando-se como entradas as frações de argila, areia e silte do solo.

No caso do fator de tortuosidade do solo (I), usou-se o valor inicial de $\lambda = 0,5$, conforme sugerido por Mualem (1976).

A tabela 1 anexa apresenta a textura dos 3 solos do Distrito Federal, usados nas simulações.

Tabela 1 - Percentuais de argila, areia e silte para cada um dos solos usados nas simulações (Fonte: Silva et al, 2006).

Solo	% Argila	% Silte	% Areia
RQ2	11,2	0,4	88,4
LVAd1	32,8	0,3	66,9
LVd2	55,9	16,9	27,2

Como se observa da Tabela 1, os solos analisados compreendem as texturas arenosa (RQ2), média (LVAd1) e argilosa (LVd2).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros iniciais do modelo *Hydrus* usados nas simulações em cada um dos 3 solos.

Tabela 2 - Valores iniciais dos parâmetros usados nas simulações com o modelo *Hydrus*, em cada um dos solos.

Parâmetro	Classe de Solo		
	RQ2	LVAd1	LVd2
θ_s	0,462	0,453	0,516
θ_r	0,127	0,163	0,247
n	1,926	1,447	1,369
α	0,356	0,346	0,382
K_s	302,1	56,1	46,6
λ	0,5	0,5	0,5

O modelo *Hydrus* foi executado para cada um dos solos nas condições iniciais e de contorno supra citadas, com um tempo total de simulação $T=0,3h$, $T=3,0h$, e $T=4,0h$ para os solos RQ2, LVAd1, e LVd2, respectivamente, em função de seus distintos tempos de drenagem. Os valores das saídas do modelo (O_0) nessas simulações foram registrados.

Em seguida, cada um dos 6 parâmetros do modelo teve seu valor acrescido de $\Delta F = + 0,1 F_i$, onde F_i é o valor inicial do parâmetro, conforme definido na equação [4], e uma nova simulação foi realizada. O valor de ΔO da simulação é simplesmente a diferença entre os valores de saída das simulações final (com perturbação) e inicial ($\Delta O = O_1 - O_0$).

A sensibilidade relativa (S_r do modelo ao parâmetro perturbado), conforme a equação [4], foi então obtida para cada uma das 5 saídas do modelo *Hydrus*, em cada um dos solos estudados. As médias de S_r consideraram o módulo dos valores individuais de S_r , pois os valores absolutos é que importam.

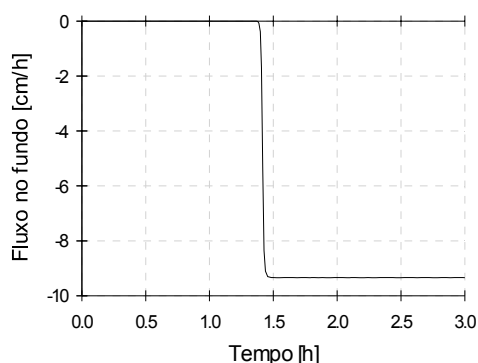


Figura 1 - Fluxo no fundo da coluna de solo, durante o período de simulação, para o solo LVAd1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exemplificar os resultados gerados pelo modelo *Hydrus*, a Figuras 1 e 2 abaixo apresentam o fluxo de água no fundo da coluna (F_r , em $cm\ h^{-1}$) e o volume armazenado (V_{arm} , em cm) no solo LVAd1, respectivamente. Nessas Figuras, os parâmetros usados foram os da Tabela 2, sem perturbação.

Conforme o esperado, o fluxo de água no fundo e o volume de água armazenado aumentam com o tempo, atingindo um valor constante em $T \approx 1,5\ h$. Os valores negativos de fluxo se referem à sua direção (para baixo).

A Tabela 3 apresenta os valores de sensibilidade relativa absoluta média do modelo *Hydrus* a cada um dos parâmetros hidráulicos do modelo, para todas as 5 variáveis de saída, em cada um dos solos analisados. Os coeficientes de variação (C.V.) são também apresentados.

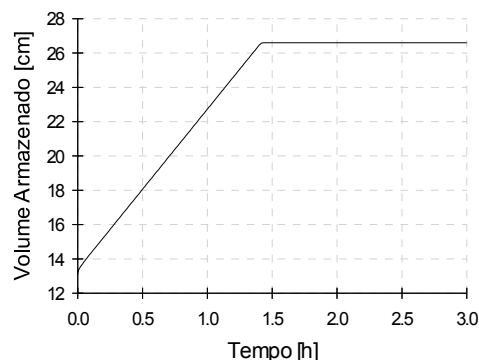


Figura 2 - Volume de água armazenado na coluna de solo durante a simulação (solo LVAd1).

Tabela 3 - Médias e coeficientes de variação da sensibilidade relativa do modelo *Hydrus* aos parâmetros, em cada um dos solos analisados.

Parâm.	Sensib. Relativa Média Sr			
	RQ2	LVAd1	LVd2	Média
θ_s	0,92	0,92	1,20	1,01
θ_r	0,19	0,29	0,43	0,30
n	1,61	2,99	3,76	2,79
α	0,78	0,82	0,96	0,85
K_s	0,84	0,83	0,83	0,83
λ	0,02	0,00	0,11	0,04
Média	0,73	0,98	1,22	
C.V.	0,78	1,08	1,07	

Tabela 4 - Sensibilidade relativa média de cada uma das saídas do modelo *Hydrus* aos parâmetros hidráulicos, em cada um dos solos analisados.

Saída	Sensib. Relativa Sr			
	RQ2	LVAd1	LVd2	Média
F_f	0,68	1,08	1,27	1,01
$F_{ac\ f}$	1,70	2,30	3,03	2,34
$T_{h=0}$	0,94	1,19	1,40	1,18
V_{arm}	0,15	0,16	0,19	0,17
$\theta_{em\ T}$	0,15	0,15	0,18	0,16

Pela Tabela 3, observa-se que, considerando-se a média dos 3 solos, o modelo *Hydrus* apresentou uma alta sensibilidade ao parâmetro n ($|S_r|=2,79$), sensibilidade intermediária aos parâmetros θ_s , α e K_s , e baixa sensibilidade aos parâmetros θ_s e I , sendo quase insensível a este último. No caso do parâmetro n , o valor de $S_r=2,79$ significa que, em média, um erro de 10% na estimativa de n resultaria em um erro de 27,9% nas saídas do modelo, ou seja, uma propagação de erro de 179%.

Ainda pela Tabela 3, observa-se que, em média, o modelo *Hydrus* foi mais sensível aos parâmetros sob a condição de solo argiloso ($|S_r|=1,22$), seguido do solo de textura média ($|S_r|=0,98$), com o solo arenoso apresentando a menor sensibilidade média ($|S_r|=0,73$).

A Tabela 4 apresenta as sensibilidades relativas médias de cada uma das saídas do modelo aos seis parâmetros analisados.

De acordo com a Tabela 4, a maior sensibilidade relativa foi a da variável fluxo acumulado no fundo ($F_{ac\ f}$), seguido do tempo para saturação do fundo ($T_{h=0}$). As variáveis volume de água armazenado no solo (V_{arm}) e umidade no tempo T ($\theta_{em\ T}$) foram quase insensíveis à perturbação nos parâmetros hidráulicos.

CONCLUSÕES

As principais conclusões desse trabalho, que teve como objetivo analisar a sensibilidade das variáveis hídricas do modelo *Hydrus* aos parâmetros hidráulicos do solo, foram as seguintes:

1. O modelo *Hydrus* foi, em média, mais sensível ao parâmetro n ($S_r=2,79$), seguido do parâmetro θ_s ($S_r=1,01$);
2. O modelo *Hydrus* foi, em média, mais sensível aos seus parâmetros hidráulicos sob a condição de solo argiloso ($S_r=1,22$), seguido pelo solo de textura média ($S_r=0,98$), e pelo solo arenoso ($S_r=0,73$), indicando que a textura do solo afeta de forma significativa a sensibilidade do modelo;
3. As variáveis de saída mais sensíveis aos parâmetros do modelo foram o fluxo acumulado no fundo ($S_r=2,34$), e o tempo necessário para a saturação do fundo ($S_r=1,01$);
4. O modelo foi pouco sensível aos parâmetros θ_r e I ($S_r<0,5$).

REFERÊNCIAS

- ABASSI, F., JACQUES, D., SIMUNEK, J., FEYEN, J. & VAN GENUCHTEN, M.T. 2003. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. *Transactions of the ASAE*, vol 46(4):1097-1111.
- BECK, M.B. 1983. A procedure for modeling. In ORLOG, GT (ed.): *Mathematical modeling of water quality: Streams, lakes, and reservoirs*. John Wiley, NY, p. 11-41.
- CELIA, M.A., BOUOUTAS, E.T., & ZARBA, R.L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.*, 26:1483-1496.
- CHAVES, HML. 1991. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da MUSLE. *Rev. Bras. Ci. Solo* 15:345-350, Campinas.
- MCUCEN, R.R. & SNYDER, W.M. 1986. *Hydrologic modeling: Statistical methods and applications*. Prentice-Hall, NY, 600 p.
- MUALEM, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3):513-522.
- ROCHA, D., ABASSI, F. & FEYEN, J. 2006. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows. *J. of Irrig. And Drain. Engrg (ASCE)*, vol. 132(4):418-424.
- SILVA, E.M., LIMA, J.E.F.W., AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES, L.N. 2006. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. *Pesq. Agrop. Bras.*, v. 41(2):323-330.
- SIMUNEK, M., VAN GENUCHTEN, M.T., & SEJNA, M. 2005. *THE Hydrus 1-D Software Package Manual*, v. 3.0., Riverside, 240 p.
- SKAGGS, R.W., MONKE, E.J., & HUGGINS, L.F. 1970. An approximate method for determining the hydraulic conductivity function of an unsaturated soil. *Tech.*

Rep. N. 11, Water Resour. Res. Center, Purdue Univ., Lafayette.
 van GENUCHTEN. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. vol 44:892-898.

Sensitivity of the Hydrus Model to the Soil Hydraulic Parameters at Different Textures

ABSTRACT

Hydrus is one of the most used models to estimate the water drainage and leaching of chemical compounds in the vadose zone. Its hydraulic parameters are θ_s , θ_r , n , α , K_s , and I . Although previous studies have found that the model is more sensitive to some of the above parameters, they have not quantified the sensitivity nor evaluated it at different soil textures. The objective of the present study was to estimate the relative sensitivity (Sr) of 5 Hydrus outputs to the 6 abovementioned parameters, simulating water drainage in a 61 cm-long soil column, at an initial tension of $H=-150$ cm, with a ponding of 2 cm on the surface, and free bottom drainage. The model outputs analyzed were: a) the bottom flux, b) the accumulated bottom flux; c) the time to saturation of the column bottom, d) the water volume stored in the column, and e) the soil water content at the bottom of the column at the end of the simulation. In order to evaluate the effect of soil texture on model sensitivity, 3 soils of the Brazilian Cerrado were analyzed: 1) Neossolo quartzarenico (sandy); 2) Latossolo Vermelho-amarelo (medium textured), and 3) Latossolo Vermelho-amarelo (clayey). We concluded that the Hydrus model was more sensitive to the n parameter ($Sr=2.79$), followed by θ_s ($Sr=1.01$) and α ($Sr=0.85$). The model was almost insensitive to parameter I ($Sr=0.04$). On average, the model was more sensitive to the hydraulic parameters when fine-textured soils were used ($Sr=1.22$), than coarse textured soils ($Sr=0.73$). The accumulated bottom flux was the model output most sensitive to soil parameter variation ($Sr=2.34$).

Keywords: Hydrus model, sensitivity analysis, water drainage.