



XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO POR MEIO DE MODELAGEM INVERSA UTILIZANDO O PROGRAMA “PEST”

Fábio Vale Scarpape⁽¹⁾; Quirijn de Jong van Lier⁽²⁾; Jos C. van Dam⁽³⁾; Alexandre Hugo Cezar Barros⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Eng. Agrônomo Pós-Graduando PPG Engenharia de Sistemas Agrícolas - ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11- CP.9 - Piracicaba/SP-CEP 13418-900, Fone: 3429-4123, E-mail: fvscarpa@esalq.usp.br ⁽²⁾ Professor Associado do Departamento de Engenharia de Biossistemas - ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11- CP.9 - Piracicaba/SP-CEP 13418-900, Fone: 3429-4123, E-mail: qdvlier@usp.br ⁽³⁾ Associate Professor, Soil physics, ecohydrology and groundwater management group, WUR, Wageningen, Holanda ⁽⁴⁾ Pesquisador, Embrapa Solos, Rua Antonio Falcão, 402 - Boa Viagem - Recife/PE - CEP³ 51020-240

Resumo – As informações dos parâmetros hidráulicos do solo constituem em dados importantes em estudos com modelagem do fluxo de água, transporte de solutos ou contaminantes bem como em simulação de crescimento vegetal. O objetivo desse estudo foi otimizar os parâmetros hidráulicos do solo pelo método de modelagem inversa. Os solos pertencem a duas áreas experimentais conduzidos em área comercial de cana-de-açúcar. O programa PEST (*Parameter ESTimation*) foi utilizado com o intuito de minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre o conteúdo de água no solo medido nos dois experimentos pelo método gravimétrico, com o conteúdo de água no solo simulada pelo modelo SWAP/WOFOST. A variação do índice estatístico *RMSE* entre o conteúdo de água no solo medida em campo com o simulado pelo modelo foi semelhante em ambos os locais e em média apresentou valor de 0,0281 e 0,0274 m³ m⁻³. O método de modelagem inversa realizado pelo programa PEST mostrou ser eficaz na otimização dos parâmetros hidráulicos do solo em ambos os locais de estudo.

Palavras-Chave: conteúdo de água no solo; modelo; SWAP/WOFOST.

INTRODUÇÃO

Os parâmetros hidráulicos do solo são parâmetros importantes em estudos com modelagem do fluxo de água, transporte de solutos ou contaminantes bem como em simulação de crescimento vegetal. A correta avaliação do balanço hídrico do solo depende fortemente da adequada caracterização das funções hidráulicas do solo. Medidas diretas das funções hidráulicas são em muitos casos impraticáveis devido à variabilidade natural dos solos especialmente para estudos de grande escala além de seu alto custo (Singh et al., 2010).

Sendo assim, as propriedades hidráulicas são freqüentemente estimadas por funções de pedotransferência ou de forma indireta. A técnica da modelagem inversa pode ser aplicada quando existem dados medidos de, por exemplo, o conteúdo de água no solo que servem como critérios de ajustes para estimar os parâmetros hidráulicos. Essa técnica tem sido utilizada com sucesso em estudo de fluxo em solo insaturado. Kool e Parker (1988), por exemplo,

utilizaram a técnica de modelagem inversa em estudo de fluxo em solo insaturado usando o algoritmo Levenberg-Marquardt. Utilizando o conteúdo de água no solo como critério de ajuste, a equação de Richards foi resolvida inversamente para a infiltração e redistribuição de água no perfil do solo para determinar as funções hidráulicas do solo.

O objetivo desse estudo foi otimizar os parâmetros hidráulicos do solo de dois experimentos conduzido com cana-de-açúcar pelo método de modelagem inversa utilizando o algoritmo Levenberg-Marquardt embutido no software “PEST”.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo foi proveniente de duas áreas experimentais [Projeto Temático da FAPESP (Proc. 02/10534-8)] em área comercial de cana-de-açúcar durante os ciclos agrícolas de 2005/2006. A primeira área localiza-se no município de Jaboticabal - SP (21°19'98''S, 48°19'03''W, 600 m). O solo é um Latossolo vermelho distrófico típico *Lvd* de textura média. O clima é do tipo *Cwa* segundo a classificação climática de Köppen. A segunda área encontra-se em Pirassununga - SP (21°55'54''S, 47°10'54''W, 650 m) em solo classificado como Latossolo vermelho amarelo eutrófico *LVAe* (Embrapa, 1999), de textura média em clima do tipo *Aw*.

A caracterização hidráulica do solo foi feita por meio de curvas de retenção da água no solo e pela condutividade hidráulica determinadas em cada horizonte pedológico. Para tanto 3 amostras indeformadas de cada horizonte com anéis volumétricos (0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro) foram retiradas. A condutividade hidráulica do solo foi determinada pelo método do perfil instantâneo, conforme Libardi et al. (1980).

O conteúdo de água no solo foi medido pelo método gravimétrico nas camadas: 0–0,15; 0,15–0,25; 0,25–0,35; 0,35–0,45; 0,45–0,55; 0,55–0,65; 0,65–0,75; 0,75–0,85; 0,85–0,95 m; com cinco medidas de repetição e interstícios que variaram de 14 a 28 dias, totalizando 14 amostragens para o experimento em Jaboticabal e 11 amostragens para o experimento em Pirassununga (Brito, 2006).

Para a simulação da dinâmica da água no solo durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar o modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST *versão 3.2.26* foi utilizado (van Dam et al., 2008). Nesse modelo as funções que relacionam h (cm), θ (cm³ cm⁻³) e K (cm d⁻¹), propostas

por van Genuchten (1980) são usadas para definir a curva de retenção de água no solo:

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) \times (1 + |\alpha \cdot h|^n)^{-m} \quad (1)$$

A condutividade hidráulica é descrita como:

$$K = K_{sat} \times Se^\lambda \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

onde θ_{res} é o teor residual de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sat} é o teor saturante de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Se é a saturação efetiva e α (cm^{-1}), λ , n e $m=1-1/n$ fatores empíricos da curva de retenção.

A otimização dos parâmetros hidráulicos do solo pelo método de modelagem inversa foi feita utilizando o programa “PEST” *Parameter ESTimation versão 12.0* (Doherty, 2002), minimizando a soma dos quadrados dos resíduos entre o conteúdo de água no solo medidos nos dois experimentos e o conteúdo de água no solo simulada pelo modelo SWAP/WOFOST. PEST é um código de calibração automático que tem a potencialidade de ajustar os parâmetros de determinado modelo de forma que os resultados gerados por este se aproximem o melhor possível dos valores reais do sistema, permitindo assim calibrar o modelo. O algoritmo (Levenberg–Marquardt) altera de forma iterativa o valor dos parâmetros a serem calibrados, até que estes produzam os valores simulados mais aproximados dos valores observados, que corresponde ao valor mínimo da função objetivo.

Arbitrariamente, a condição de umidade inicial do solo foi determinada executando o modelo SWAP/WOFOST usando os parâmetros hidráulicos obtidos determinados em laboratório.

Os parâmetros hidráulicos otimizados, provenientes das equações (1 e 3) foram: θ_{sat} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{res} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (cm^{-1}), n (-) e K_{sat} (cm d^{-1}).

Kool e Parker (1988) relatam que para a obtenção do sucesso da modelagem inversa é imprescindível a redução do número dos parâmetros de ajustes. Assim o número de camadas de solo descrita no modelo foi reduzido de 10 para 3, em ambos os locais, agrupando-se camadas com descrição morfológicas semelhantes.

Para certificar se o PEST era capaz de realizar a otimização dos parâmetros hidráulicos com sucesso, um teste inicial foi realizado consistindo em igualar os valores dos teores de água medidos em campo com os simulados pelo modelo e ao mesmo tempo fazer pequenas modificações nos parâmetros hidráulicos do solo a serem otimizados. Dessa forma, esperava-se que o programa PEST fosse capaz de retornar ao valor inicial igualando novamente os valores de umidade no perfil dos valores observados com os simulados pelo modelo SWAP/WOFOST. Essa etapa foi realizada com todos os parâmetros envolvidos na otimização.

Por meio desse teste ainda foi possível obter informações a respeito da sensibilidade dos parâmetros quanto à eficiência na otimização. Assim, para cada local, foi determinada a ordem de otimização dos parâmetros. No experimento conduzido em Jaboticabal

a ordem foi: K_{sat} , α , θ_{res} , n e θ_{sat} enquanto que em Pirassununga a ordem foi: θ_{res} , α , K_{sat} , n e θ_{sat} .

Com a finalidade de avaliar a eficácia da modelagem inversa dos parâmetros hidráulicos, os índices estatísticos: raiz quadrada do somatório do quadrado dos desvios *RMSE*, índice de concordância *d* (Willmott, 1982) e R^2 foram aplicados confrontando dados do conteúdo de água no solo medido a campo *versus* simulados pelo modelo SWAP/WOFOST.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros hidráulicos do solo θ_{sat} , θ_{res} , α , n e K_{sat} obtidos em laboratório e por meio da modelagem inversa realizada pelo programa PEST para os dois experimentos são apresentados na Tabela 1. As representações gráficas das curvas de retenção de água no solo de Jaboticabal estão na Figura 1.

Os valores do conteúdo de água no solo, ao longo de todo o período de experimento, simulados pelo modelo SWAP/WOFOST, antes e depois da otimização dos parâmetros foram confrontados com os valores do conteúdo de água no solo medidos em campo pelo método gravimétrico. A representação gráfica para todas as profundidades em Jaboticabal é representada na Figura 2.

A avaliação da eficácia da otimização dos parâmetros hidráulicos por meio da modelagem inversa está representada na Tabela 2.

A variação do *RMSE* foi semelhante em ambos os locais e em média apresentou valor de 0,0281 e 0,0274 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os solos de Jaboticabal e Pirassununga respectivamente. Estudos de otimização de parâmetros hidráulicos do solo com a utilização do programa PEST confrontando dados do conteúdo de água no solo medido *versus* simulados pelo modelo SWAP/WOFOST são encontrados na literatura. Vazifedoust (2007) otimizou os parâmetros hidráulicos (α e n) em experimentos de campos conduzidos com milho, feijão e soja no Iran obtendo como resultado *RMSE* entre conteúdo de água no solo simulado pelo modelo SWAP/WOFOST confrontado com dados do conteúdo de água medidos também pelo método gravimétrico variando de 0,02 a 0,052 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Singh et al. (2010) utilizaram imagens de satélites para estimar a evapotranspiração em experimentos conduzidos com trigo realizada na China e o relacionaram com o conteúdo de água no solo. Esses autores relataram valor de *RMSE* de 0,028 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ entre dados simulados pelo modelo SWAP/WOFOST e medidos.

Mesmo utilizando diferentes abordagens da medida do conteúdo de água no solo, os índices estatísticos evidenciam a eficácia do programa PEST em otimizar parâmetros hidráulicos do solo em simulação do fluxo de água pelo modelo SWAP/WOFOST. Convém ressaltar ainda que diferenças entre o conteúdo de água medido e simulado podem ter se ocasionado pela heterogeneidade espacial dos solos e a erros de medidas que são inevitáveis em condições de campo (Singh et al., 2006).

Embora os dois solos, na média, tenham apresentados *RMSE* similares, para os outros dois índices estatísticos usados nesse estudo o experimento conduzido em Jaboticabal apresentou melhor desempenho. Em média apresentou $d = 0,85$ contra 0,79 no experimento conduzido em Pirassununga. E pela análise de regressão linear da

variação temporal do conteúdo de água no perfil do solo (0 a 95 cm) o experimento conduzido em Jaboticabal obteve melhor resultado (Figura 3).

CONCLUSÃO

O método de modelagem inversa realizado pelo programa PEST mostrou ser eficaz na otimização dos parâmetros hidráulicos do solo em ambos os locais de estudo.

REFERÊNCIAS

BRITO, A.S. Balanço de água em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. 2006. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DOHERTY, J. PEST – Model Independent Parameter Estimation. Watermark Computing. Corinda, 2002. 279p.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.

KOOL, J.B.; PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.T. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory

and numerical studies. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1348–1354, 1985.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.P.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil Sci Soc Am J. 44:3-7. 1980.

SINGH, R.; VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India, Agric. Water Manage. 82:253-278, 2006.

SINGH, R.; REN, L.; KANG, S. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques Agric. Water Manage. 82:253-278, 2010.

VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; KROES, J.G. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone J. 7:640-653, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. Soil Sci. Am. J. 44: 892–898, 1980.

VAZIFEDOUST, M. Development of an agricultural drought assessment system: integration of agrohydrological modelling, remote sensing and geographical information. 2007. 171 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Wageningen University, Wageningen, 2007.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros hidráulicos do solo obtidos em laboratório e por meio da modelagem inversa realizada pelo programa PEST para os experimentos conduzidos em Jaboticabal e em Pirassununga

Origem dos dados	Locais	Camada (cm)	θ_{res} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{sat} (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_{sat} (cm d ⁻¹)
Laboratório	Jaboticabal	0-15	0,16510	0,48500	0,05309	2,09040	100,0
PEST	(LVd)	0-15	0,12235	0,45682	0,05409	2,00443	72,2
Laboratório		16-38	0,17750	0,43640	0,04920	2,23310	40,0
PEST		16-38	0,14560	0,42193	0,04913	2,22579	2,3
Laboratório		39-96	0,18700	0,43290	0,03815	2,04320	130,0
PEST		39-96	0,14814	0,42960	0,03839	2,01203	30,2
Laboratório	Pirassununga	0-20	0,15855	0,36135	0,25392	1,92730	9,6
PEST	(LVAe)	0-20	0,08869	0,36135	0,04745	2,90312	5,8
Laboratório		21-43	0,17885	0,34970	0,24847	2,01255	12,6
PEST		21-43	0,07590	0,34970	0,04786	2,06516	12,8
Laboratório		44-100	0,13962	0,41855	0,34903	1,87760	32,8
PEST		44-100	0,00329	0,41855	0,03923	1,88257	44,6

Tabela 2 – Valores dos índices estatísticos RMSE e índice de concordância d , obtidos entre o conteúdo de água no solo medido em campo pelo método gravimétrico com o conteúdo de água no solo simulado pelo modelo SWAP/WOFOST após a otimização dos parâmetros hidráulicos do solo realizados pelo programa PEST em Jaboticabal e Pirassununga

Camadas	Jaboticabal (LVd)		Pirassununga (LVAe)	
	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	d (-)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	d (-)
0-15	0,0372	0,8624	0,0461	0,7778
15-25	0,0255	0,9116	0,0343	0,7824
25-35	0,0252	0,8908	0,0233	0,8602
35-45	0,0208	0,9118	0,0234	0,7985
45-55	0,0238	0,8850	0,0245	0,8240
55-65	0,0616	0,6400	0,0202	0,8437
65-75	0,0191	0,8816	0,0236	0,7702
75-85	0,0192	0,8649	0,0250	0,7538
85-95	0,0206	0,8344	0,0262	0,7443

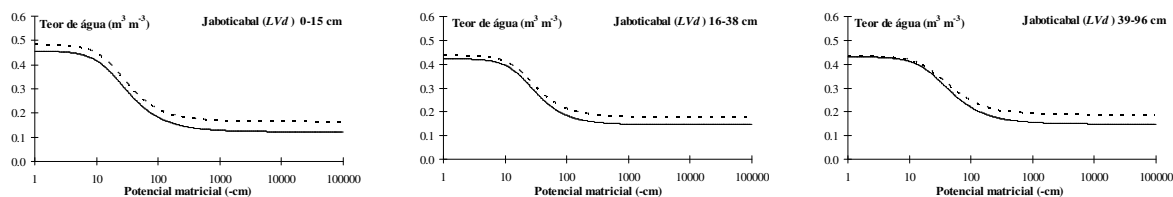


Figura 1 – Curvas de retenção de água no solo em três profundidades com parâmetros hidráulicos do solo obtidos em laboratório (linha tracejada) e por meio da modelagem inversa utilizando o programa PEST (linha contínua) em Jaboticabal

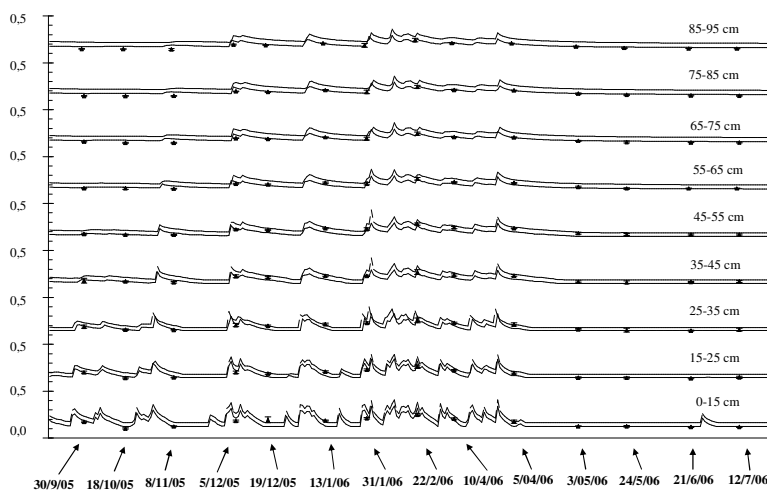


Figura 2 – Simulação do conteúdo de água no solo obtido pelo modelo SWAP na condição inicial (linha tracejada) e após a otimização realizada pelo programa PEST (linha contínua) e valores do conteúdo de água no solo obtido medidos pelo método gravimétrico (pontos) no local de experimento em Jaboticabal.

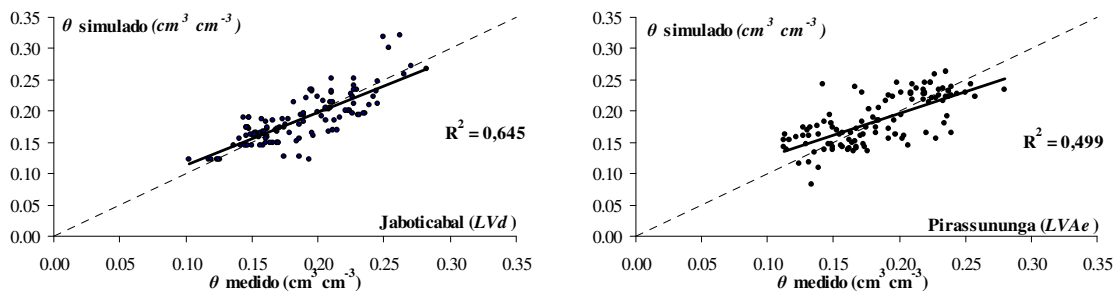


Figura 3 – Regressão linear da variação temporal do conteúdo de água no perfil solo (0 a 95 cm) no experimento conduzido em Jaboticabal (LVd) e em Pirassununga (LV Ae) dados medidos e simulados pelo modelo SWAP/WOFOST com a cultura da cana-de-açúcar