

Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software hydrus-1d¹

Determination of hydraulic conductivity using the inverse problem of the hydrus-1d software

João José da Silva Junior^{2*}, Alberto Colombo³, Elio Lemos da Silva³, Myriane Stella Scalco⁴

Resumo- O conhecimento da condutividade hidráulica do solo é essencial para qualquer estudo que envolva o movimento da água no solo. A condutividade hidráulica do solo decresce acentuadamente com a diminuição da umidade volumétrica (θ), ou aumento do módulo do potencial mátrico (h), sendo estas relações representadas pela funções $K(\theta)$ e $K(h)$, respectivamente. Determinações dos parâmetros que descrevem estas funções, por métodos de laboratório ou de campo, são demoradas, de custo elevado e envolvem considerável incerteza. Uma alternativa para parametrização dessas funções é empregar o processo matemático inverso (problema inverso). No processo matemático inverso, as causas são determinadas em função dos seus efeitos. Objetivou-se com o presente trabalho determinar o parâmetro K_s das funções de $K(\theta)$ e $K(h)$, do modelo de van Genuchten, mediante a resolução de um problema inverso com auxílio do aplicativo Hydrus-1D, a partir de dados de infiltração acumulada coletados em campo. Verificou-se que existe grande variabilidade nos valores de K_s estimados. O problema inverso proposto permite determinar a condutividade hidráulica não saturada com base em dados coletados sob um amplo intervalo de valores de umidade volumétrica e módulo do potencial mátrico. O problema inverso foi adequadamente definido para as estimativas do K_s nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m, mas não permitiu uma estimativa confiável para a camada de 0,60-1,00 m.

Palavras-chave- Modelagem. Movimento água. Solo não saturado.

Abstract- Knowledge of soil hydraulic conductivity is essential for any study that involves the movement of water in soil. The hydraulic conductivity decreases considerably with decreases in the volumetric water content (θ), or increases in the matric potential modulus (h). The relationship among these variables may be represented by the functions $K(\theta)$ and $K(h)$. Field or laboratory methods for determining the values of the parameters that describe these functions are time consuming, costly and involve considerable uncertainty. An alternative method to determine these parameters is to employ the reverse process (inverse method). In the inverse method, the causes are determined based on their effects. This study aimed to determine the K_s parameter (saturated hydraulic conductivity) of functions $K(\theta)$ and $K(h)$, defined according to the van Genuchten model, by solving, with the use of the Hydrus-1D software, an inverse problem based on cumulative infiltration data collected in the field. It was found that there is great variability in the value of the K_s estimates. The proposed inverse problem method allows the unsaturated hydraulic conductivity to be determined based on data collected under a wide range of soil moisture values and matric potential moduli. The inverse problem was adequately defined for the estimates of K_s in the 0-0.20 and 0.20-0.60 m layers but did not allow for a reliable K_s estimate of the 0.60-1.00 m layer.

Key words - Modeling. Movement water. Unsaturated soil.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 16/12/2012 e aprovado em 05/11/2013

¹Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor

²Doutorando em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, bolsista Fapemig, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, jjsjunior1@posgrad.ufla.br

³Professor Adjunto departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, acolombo@deg.ufla.br, elemos@deg.ufla.br

⁴Pesquisadora do departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras, mscalco@dag.ufla.br

Introdução

O conhecimento da condutividade hidráulica do solo é essencial para qualquer estudo que envolva o movimento da água no solo (SILVA *et al.*, 2012). As propriedades físicas e hidráulicas do solo influenciam nos processos hidrológicos, incluindo a infiltração, a erosão, a redistribuição de umidade e o transporte de solutos através do perfil. Para a determinação do fluxo de água em solos não saturados é necessário o conhecimento das curvas de retenção e condutividade hidráulica não saturada (GHIBERTO; MORAES, 2011).

A condutividade hidráulica (K) é uma característica do solo e traduz a intensidade com que este solo conduz a água (LIBARDI, 2005). Segundo Hurtado *et al.* (2005), esta característica tem seu valor máximo no solo saturado e é altamente dependente da umidade θ . O valor de K decresce acentuadamente com a diminuição de θ , podendo-se expressar K em função de θ ou em função do potencial matricial h (funções K(θ) e K(h), respectivamente). Há vários métodos de determinação de K, no campo ou no laboratório, e sua alta variabilidade entre repetições é frequentemente apontada como um problema experimental. Carvalho *et al.* (2007) afirmam que a determinação da condutividade hidráulica em campo apresenta maior precisão quando comparada com a de laboratório. Mubarak *et al.* (2010), afirmam que as determinações no campo podem ser mais difíceis de controlar, mas têm a vantagem de estimar as propriedades hidráulicas *in situ*, o que é de considerável valor no uso da informação hidráulica.

Os métodos existentes para a determinação das propriedades físico-hídricas dos solos são demorados caros e possuem elevada complexidade técnica assim dificultando o seu uso de forma corriqueira (MESQUITA; MORAES, 2004). Avanços nos estudos de métodos para a determinação da função K(θ) têm surgido, principalmente para aqueles baseados em outras características físicas, particularmente os que utilizam dados obtidos a partir da curva de retenção de água no solo (TEIXEIRA *et al.*, 2005).

Uma alternativa à determinação direta destas propriedades é empregar o método de estimativa de parâmetros usando o processo inverso (método inverso), vários pesquisadores vêm utilizando o método inverso (SIMUNEK ; VAN GENUCHTEN, 1996; FINSTERLE ; FAYBISHENKO, 1999; KOSUGI *et al.* 2001; ZOU *et al.*, 2001; ABBASPOUR *et al.*, 2001; BOHNE ; SALZMANN, 2002; RITTER *et al.* 2003). Para a utilização do método inverso necessita-se: de um modelo numérico que represente fielmente o sistema; de procedimentos experimentais que determinem as condições de contorno e inicial; (potencial mátrico ou umidade inicial do solo) de

valores a serem comparados com os valores numéricos; e da implementação de um método numérico para determinação dos parâmetros desconhecidos.

Mediante o exposto, objetivou-se com o presente artigo: i) determinar, com auxílio do aplicativo Hydrus-1D (SIMUNEK *et al.*, 2009), a condutividade hidráulica saturada Ks das funções K(θ) e K(h) do modelo de van Genuchten (1980), a partir da solução de um problema inverso definido por valores coletados em testes com infiltrômetro de duplo anel; ii) avaliar a adequação do problema inverso proposto para determinação da condutividade hidráulica saturada Ks das funções K(θ) e K(h) e obter as funções K(θ) e K(h) a partir da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica do solo saturado obtida pelo problema inverso.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em uma lavoura de café da Universidade Federal de Lavras, em Lavras - MG, a 21°14' latitude sul e 45°00' de longitude oeste. A lavoura foi implantada em abril de 2007, em área com altitude média de 910 m, onde predomina um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa a muito argilosa.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas, nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m, para determinação da umidade volumétrica (θ , em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em nove valores de tensões ($|h| = 1, 2, 4, 10, 30, 50, 100, 500$ e 1500 kPa). Seguindo metodologia de (WRAITH; OR, 1998), os pares de valores correspondentes a cada camada foram lançados em uma planilha do Excel para ajuste, com auxílio da ferramenta Solver, dos parâmetros θ_s (umidade de saturação, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_r (umidade residual, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), α (1/kPa) e n do modelo de representação da curva de retenção de água de van Genuchten (1980). Neste processo de ajuste, o parâmetro m foi considerado igual a $1-1/n$. Na Tabela 1 são apresentados os valores numéricos dos parâmetros da curva de retenção que foram ajustados para as três camadas estudadas.

A técnica de modelagem inversa, com uso do software Hydrus-1D (SIMUNEK *et al.*, 2009), foi aplicada para ajuste do parâmetro Ks (condutividade hidráulica saturada) das funções K(h) e K(θ), Equações (1), (2) e (3), do modelo de van Genuchten (1980), a partir da minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores de infiltração acumulada observados em campo e valores de infiltração acumulada calculados com o Hydrus-1D.

Para a obtenção dos dados de infiltração acumulada foram realizados, testes de infiltração de água no solo, em três locais diferentes sendo cada local uma repetição (R1,

Tabela 1 - Curva de retenção de água no solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten para as três camadas de solo estudadas

Camada (m)	Curva de Retenção
0 - 0,20	$\theta(h) = 0,3005 + (0,5416 - 0,3005) - [1 + (1,653 h)^{1,2848}]^{-0,2217}$
0,20 - 0,60	$\theta(h) = 0,2788 + (0,6119 - 0,2788) - [1 + (1,692 h)^{1,5872}]^{-0,3699}$
0,60 - 1,00	$\theta(h) = 0,3002 + (0,6260 - 0,3002) - [1 + (1,635 h)^{1,5051}]^{-0,3356}$

$$\text{Modelo de van Genuchten: } \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^m$$

$$K(h) = K_s \cdot \frac{\left[1 - (\alpha \cdot |h|)^{n-1} \cdot \left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n \right]^m \right]^2}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n \right]^m} \quad (1)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^{\ell} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right] \quad (2)$$

Com:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

R2 e R3), com a utilização de infiltrômetro de duplo anel composto de um anel interno com diâmetro de 0,30 m e um anel externo com diâmetro de 0,60 m. Os anéis, com 0,30 m de altura, foram cravados até uma profundidade de 0,15 m no solo e utilizou-se uma carga hidráulica de 0,05 m como recomendado por Simões *et al.* (2005). Para evitar terreno compactado estes anéis foram cravados nas linhas de plantio, em espaços existentes na linha devido à eliminação de plantas. Para determinação da condição inicial de umidade do perfil do solo, que é requerida para o cálculo da lâmina infiltrada acumulada com o Hydrus-1D, nos três testes realizados, instalou-se, no centro do anel interno, um tubo de acesso para a sonda de umidade FDR (Profile Probe PR2, Delta-T Devices Ltda). Esta sonda foi previamente calibrada, comparando-se valores de umidade volumétrica determinados com a sonda com valores de umidade oriundos da conversão, pelas curvas de retenção ajustadas a cada camada de solo, de valores de tensão de água no solo determinados com tensiômetros para vacuômetro digital de punção (ou tensiômetros).

Imediatamente antes do início dos testes de infiltração foi determinada a umidade inicial do solo nas profundidades correspondentes aos seis sensores da sonda (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,00 m). Logo em seguida,

a sonda foi erguida 0,05 m, permitindo a determinação da umidade inicial em mais 6 profundidades adicionais (0,05; 0,15; 0,25; 0,35; 0,55 e 0,95 m).

Nos gráficos da Figura 1(a) são apresentados os doze valores de umidade volumétrica determinados através da sonda PR2 imediatamente antes do início das três repetições.

Nas simulações de infiltração realizadas com o Hydrus-1D, a impossibilidade numérica representada pela condição $\theta < \theta_r$, foi contornada adotando-se, nestas profundidades, valores de umidade correspondentes ao valor da umidade residual ajustada para a camada acrescida de 10%. Além disso, como os valores de umidade obtidos com a sonda de umidade são pontuais e o software necessita, para a discretização do perfil, de valores de umidade a cada centímetro de profundidade, ajustou-se, aos doze dados de umidade observados em campo, uma *spline* cúbica (HIESTAND, 2008), para gerar um perfil contínuo de umidade do solo, que é representado pelas linhas contínuas mostradas nos gráficos da Figura 1(a).

Visando contornar problemas de convergência do Hydrus-1D decorrentes de condições iniciais expressas em termos de conteúdo de água, e para garantir maior estabilidade do software, nos três testes de infiltração, as condições iniciais do perfil do solo, que haviam sido determinadas em termos de conteúdo de água, foram transformadas, com uso das curvas de retenção mostradas na Tabela 1, no correspondente valor de tensão matricial, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 1(b).

Como a sonda PR2 utilizada era equipada com um *datalogger* (dispositivo DL6 Delta T), foi possível determinar e armazenar em computador portátil, com o uso do software DeltaLink 2.3.1, os valores de umidade volumétrica do solo nas profundidades dos sensores da sonda. Estes dispositivos permitiram a visualização e acompanhamento em tempo real da movimentação da frente de molhamento durante o teste de infiltração. As

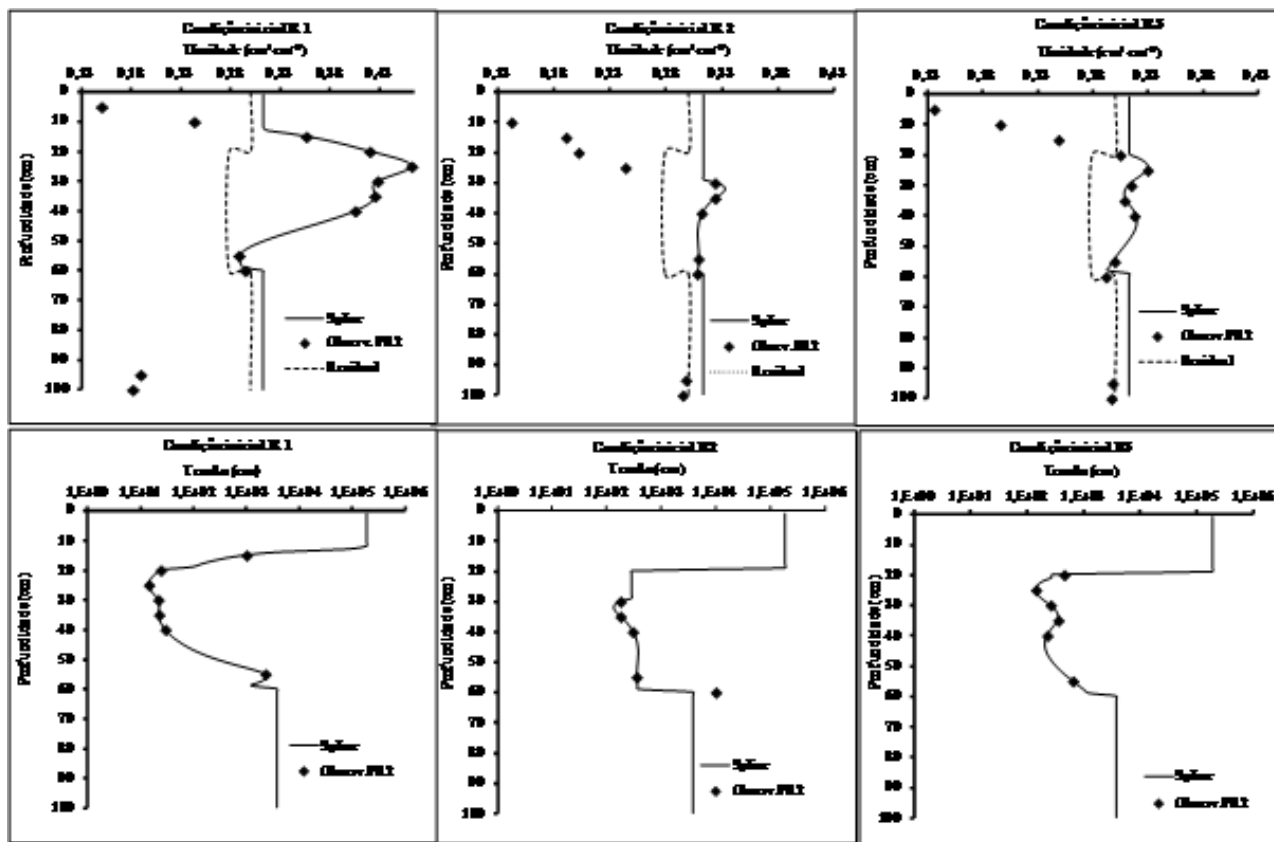


Figura 1 - Valores de umidade obtidos no campo com FDR (Profile Probe PR2), umidade residual para cada camada e spline da umidade em todo perfil (a); valores de umidade convertidos em potencial mátrico (b), e spline do potencial mátrico em todo o perfil do solo utilizados nas simulações.

simulações de infiltração de água no solo efetuadas com o Hydrus-1D são válidas até o momento em que a frente molhada atinja a profundidade do perfil do solo na qual se conhece as condições iniciais de umidade. Logo, a coleta dos dados de infiltração acumulada foi encerrada poucos minutos após se constatar que a frente de molhamento havia atingido a profundidade de 1m.

Para ajuste dos valores de K_s , das camadas de 0-0,20, 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m, do modelo van Genuchten sem histerese, pelo método inverso do Hydrus-1D, a função objetivo do problema inverso foi definida com base em pares de valores acumulados de tempo desde o início da infiltração e da correspondente lâmina infiltrada acumulada. O processo de ajuste visa minimizar a soma dos quadrados dos desvios entre valores de infiltração acumulada observados em campo e valores de infiltração acumulada calculados com o Hydrus-1D. O tempo total considerado em cada teste foi variável e foi determinado em função do valor acumulado do tempo no qual a frente de molhamento atingiu a profundidade de 0,60 m. Uma margem de segurança de 0,40 m no posicionamento da frente de molhamento foi utilizada nas simulações, de

forma a assegurar que nestas simulações numéricas a frente de molhamento nunca atingisse uma profundidade maior que 1,00 m.

Resultados e discussão

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de avanço da frente de molhamento (linhas verticais) e as curvas de infiltração calculadas com o Hydrus-1D, para um tempo total de simulação da infiltração acumulada de 40 min na R1, 18 min para a R2 e de 30 min para a R3. Em decorrência do limite imposto ao avanço da frente de molhamento, na R1 a função objetivo (simbolizada pelos pequenos losângulos na Figura 2) foi limitada a um conjunto de 33 pares de valores, na R2 a um conjunto de 13 pares de valores e na R3 a um conjunto de 23 pares de valores.

Na descrição da função objetivo que foi utilizada pelo Hydrus-1D, além dos pares de valores de tempo acumulado desde o início da infiltração e da correspondente lâmina infiltrada acumulada foi estabelecido um número

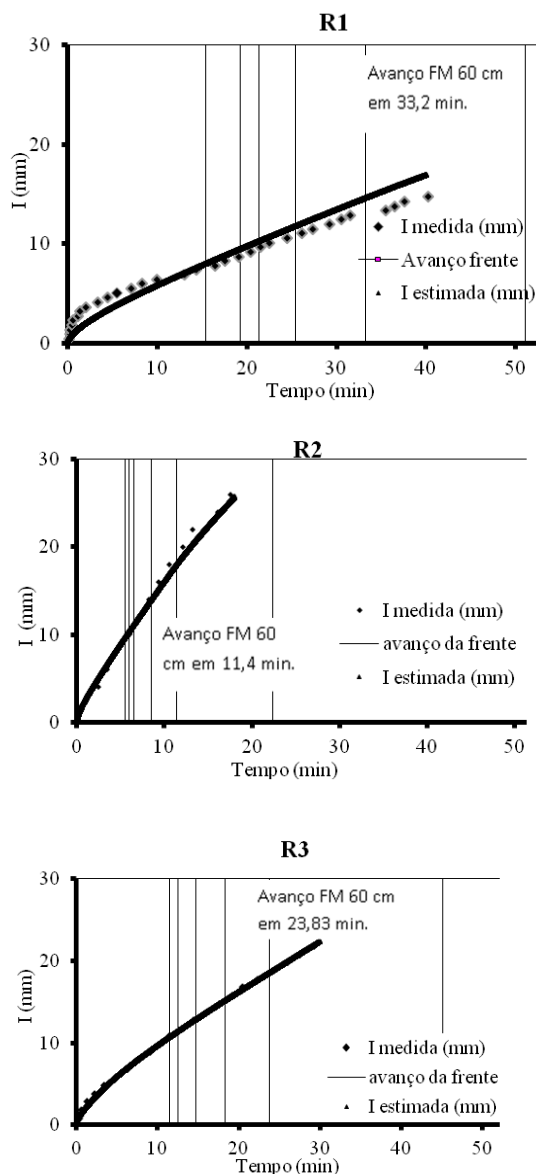


Figura 2 - Curvas de infiltração acumulada (I , mm), medida com infiltrômetro de duplo anel e estimado com o software Hydrus-1D, e avanço da frente de molhamento para os pontos amostrados R1, R2 e R3.

máximo de 60 interações e atribuído a todos os pares de valores da curva de infiltração o mesmo peso 1 por se tratarem de dados do mesmo tipo.

Na Tabela 2 são apresentados, para as camadas de 0-0,20, 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m, os valores de K_s (mm hora⁻¹) estimados pelo Hydrus-1D com base nos valores observados em cada um dos três testes de infiltração realizados. A variação nos valores de K_s estimados reflete a grande variabilidade espacial que este parâmetro apresenta. Segundo Warrick e Nielsen (1980), o CV das propriedades físicas de um solo pode variar de 10 até 100%, dependendo da propriedade do solo considerada.

Os valores de K_s obtidos para as camadas de 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m estão de acordo com dados de condutividade hidráulica saturada obtidos por Carvalho *et al.* (2007) para Latossolo Vermelho distrófico argissólico nas camadas de 0,20-0,40 e 0,60-1,0 m com valores de K_s de 939 e 642 mm hora⁻¹, respectivamente. Os valores de K_s aqui encontrados são ratificados também por Oliveira *et al.* (2005) que obtiveram em um Latossolo Vermelho distrófico na região de Lavras-MG valores de 29,4; 228,6 e 120,0 mm hora⁻¹ para as camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente. Este valores estão de acordo também com resultados obtidos por Vieira e Klein (2007) que avaliaram a condutividade hidráulica do solo saturado em um Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistema de plantio direto e obtiveram valores de K_s , na camada de 0-20 cm, variando de 31 a 397,84 mm hora⁻¹.

Em todas as camadas, as menores estimativas de K_s fornecidas pelo Hydrus-1D foram baseadas nos valores observados durante a R1. Este fato é compatível com os valores apresentados na Figura 2, que mostram para a R1 os menores valores de lâmina acumulada (14,7 mm em 40 min versus 26 mm em 17,5 min, na R2, e 21,8 mm em 30 min na R3) e um avanço mais lento da frente de molhamento (32,2 min para 0,60 m na R1 versus 11,4 min para 0,60 m na R2 e 23,8 min para 0,60 m na R3).

Os maiores valores de condutividade hidráulica saturada para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m foram obtidos com os dados observados na R2. Na Figura 2 é possível constatar que, durante a R2, o tempo de avanço da frente de molhamento ao longo da camada de 0-0,20 m foi de apenas 6 min e que o avanço da frente ao longo da camada de 0,20-0,60 m foi de 5,4 min (a frente de molhamento atingiu a profundidade de 0,60 m aos 11,4 min após o início da infiltração). Já para a camada de 0,60-1,00 m, o tempo de avanço da frente de molhamento foi maior, ficando em 11,4 min, ou seja, praticamente o dobro do tempo de avanço observado na camada anterior. Para condições similares de umidade inicial, o aumento de 50% no tempo de avanço seria justificado por um valor da condutividade hidráulica saturada dessa camada 50% menor que o da camada anterior.

Em comparação com os demais testes, o comportamento da lâmina infiltrada acumulada registrada durante a R2 também reflete maior valor de condutividade hidráulica neste local. Pela Figura 2 constata-se que, ao longo da R2, um valor acumulado de 200 mm da lâmina infiltrada foi atingido em 12 min. Na R1 o limite de 200 mm de lâmina infiltrada não chegou a ser atingido (lâmina infiltrada máxima de 147 mm aos 40 min) e na R3 o limite de 200 mm de lâmina infiltrada só foi atingido aos 27,5 min, ou seja, 15 min a mais que os 12 min observados na R2.

Tabela 2 - Valores de K_s , para as profundidades de 0 - 0,20, 0,20-0,60 e 0,60-1,0 m, estimados pelo Hydrus-1D com base em três testes de infiltração (R1, R2 e R3)

Camada (m)	Teste	K_s (mm hora ⁻¹)
0 - 0,20	R1	424,55
0,20 - 0,60		120,00
0,60 - 1,0		120,00
0 - 0,20	R2	867,12
0,20 - 0,60		780,00
0,60 - 1,0		406,81
0 - 0,20	R3	531,91
0,20 - 0,60		304,42
0,60 - 1,0		508,94

A unicidade da solução do problema inverso proposto pode ser avaliada por meio de gráficos de superfície de resposta da função objetivo calculados para diferentes combinações de pares de valores dos parâmetros a serem otimizados. Na Figura 3 (a) e (b) são apresentadas as superfícies de resposta correspondentes ao valor do logaritmo, de base dez, da soma dos quadrados dos resíduos dos valores de lâmina acumulada correspondentes aos 23 valores de tempo da função objetivo da R3, computados para diferentes combinações de pares de valores da condutividade hidráulica saturada, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m (Figura 3a) e nas camadas de 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m (Figura 3b). Na elaboração do gráfico da Figura 3(a), o valor da condutividade hidráulica saturada na camada de 0,60-1,00 m foi mantido constante e igual a 508,94 mm hora⁻¹, que, conforme indicado na Tabela 2, foi o valor otimizado obtido na R3. O formato da superfície de resposta da Figura 3(a) indica a ocorrência de um mínimo global, correspondente aos pares $K_s = 532,2$ mm hora⁻¹ para a camada de 0-0,20 m e $K_s = 304,2$ mm hora⁻¹ para a camada de 0,20-0,60 m, que permite concluir que o problema inverso proposto foi adequadamente definido para estimativa destes pares de parâmetros (K_s de 0-0,20 m e K_s de 0,20-0,60 m).

Na elaboração do gráfico da Figura 3(b) o valor da condutividade hidráulica saturada na camada de 0,20-0,60 m foi mantido constante e igual a 304,42 mm hora⁻¹ que, conforme indicado na Tabela 2, foi o valor otimizado obtido na R3. O formato da superfície de resposta mostrada na Figura 3(b), que apresenta isolinhas paralelas ao eixo correspondente ao valor de K_s da camada de 0,60-1,00 m, é característico de um problema inverso mal formulado que não apresenta um mínimo definido para a função objetivo. Este comportamento indica que uma estimativa adequada de K_s para a camada de 0,60-1,00 m não pode ser estabelecida. A dificuldade de se estabelecer

uma estimativa adequada do K_s de 0,60-1,00 m deve-se a formulação da função objetivo, que conforme justificado anteriormente só levou em conta um tempo máximo de infiltração que não permitisse o avanço da frente de molhamento muito além dos 0,60 m. Esta limitação fez com que a maioria dos valores de lâmina acumulada fossem mais influenciados pelas características das duas camadas superiores (0-0,20 e 0,20-0,60 m). A unicidade da solução do problema inverso também pode ser avaliada com base na análise da convergência a partir de diferentes estimativas iniciais. Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos de K_s , para as três camadas, partindo-se de três estimativas iniciais diferentes.

Na Tabela 3 é possível constatar que, para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m, independentemente da estimativa inicial adotada, o problema sempre converge para os mesmos valores obtidos de K_s , e para as mesmas estimativas do desvio padrão e do intervalo de confiança de K_s . Este comportamento é característico de um problema inverso bem formulado e confirma as conclusões da análise da superfície de resposta mostrada na Figura 3 (a).

No entanto, para a camada de 0,60-1,00 m, constata-se na Tabela 3 que os valores obtidos de K_s , do desvio padrão e do intervalo de confiança apresentam certa dependência da estimativa inicial adotada. Além disso, constata-se, para a camada de 0,60-1,00 m, um aumento desproporcional da razão entre o desvio padrão da estimativa e seu próprio valor obtido. Este comportamento, típico de um problema inverso mal formulado, confirma as conclusões da análise da superfície de resposta mostrada na Figura 3 (b).

Deve-se, no entanto, ressaltar que estas limitações nas estimativas de K_s na camada de 0,60-1,00 m são decorrentes do tempo de infiltração considerado na função objetivo, que não permitiu um avanço significativo da frente de molhamento na camada de 0,60-1,00 m.

Nas Figuras 4a a 4d são apresentadas, para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m, as curvas de condutividade hidráulica em função do módulo potencial mátrico, determinadas com o uso da Equação 1, e do conteúdo volumétrico de água, determinadas com o uso da Equação 2.

Em cada gráfico que compõe a Figura 4 são apresentadas três curvas, que correspondem aos valores de K_s obtidos pelo problema inverso do Hydrus-1D para os testes realizados (R1, R2 e R3). No cálculo da condutividade das camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m, foram considerados os valores numéricos dos parâmetros da curva de retenção de água no solo (Tabela 1).

Pode se destacar a ampla faixa de potencial mátrico e conteúdo volumétrico de água abrangidos pelo método como principal vantagem da determinação da

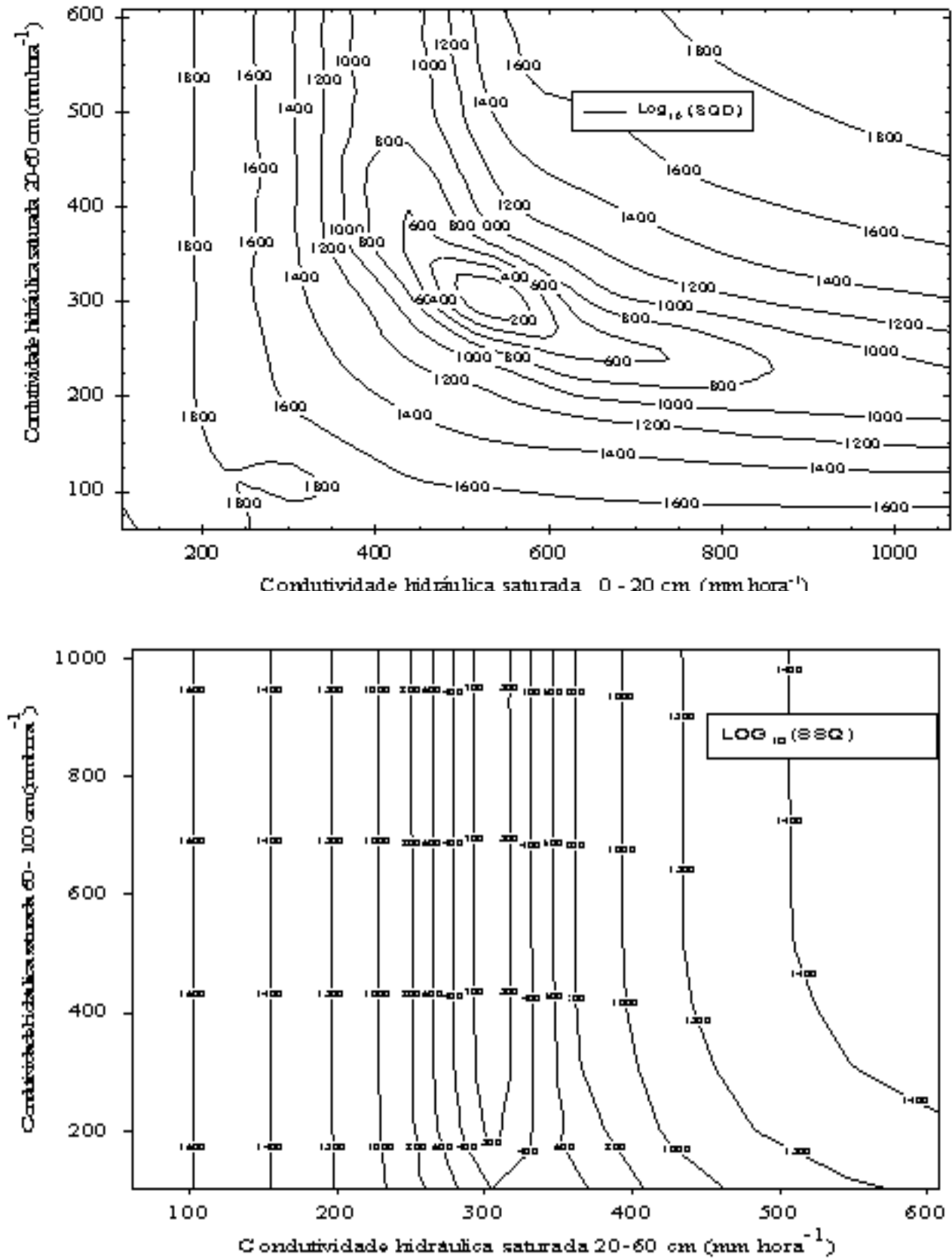


Figura 3- Superfícies de contorno do logaritmo do SSQ da função objetivo da R3 em função de pares de valores otimizados do Ks para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m (a) e de 0,20-0,60 e 0,60-1,00 m (b).

Tabela 3 - Valores de Ks obtidos pelo problema inverso do hydrus-1D em função da estimativa inicial do Ks

Ks estimado (inicial) (mm hora ⁻¹)	Camada (m)	Ks obtido (Final) (mm hora ⁻¹)	Desvio Padrão (mm hora ⁻¹)	I.C (95%) ^{1/}		R ²
				Mínimo	Máximo	
360	0-0,20	531,60	14,40	502,20	561,00	0,9989
330	0,20-0,60	304,80	10,80	282,00	327,60	
300	0,60-1,00	400,80	1.501,80	-2.731,80	3.534,00	
480	0-0,20	532,20	14,40	502,20	562,20	0,9989
450	0,20-0,60	304,20	11,40	280,20	328,20	
420	0,60-1,00	532,20	4.662,60	-9.195,00	10.259,40	
720	0-0,20	531,60	14,40	501,60	561,60	0,9989
600	0,20-0,60	304,80	11,40	280,20	328,80	
570	0,60-1,00	496,20	3.948,00	-7.738,80	8.731,80	

^{1/}I.C. – Intervalo de confiança

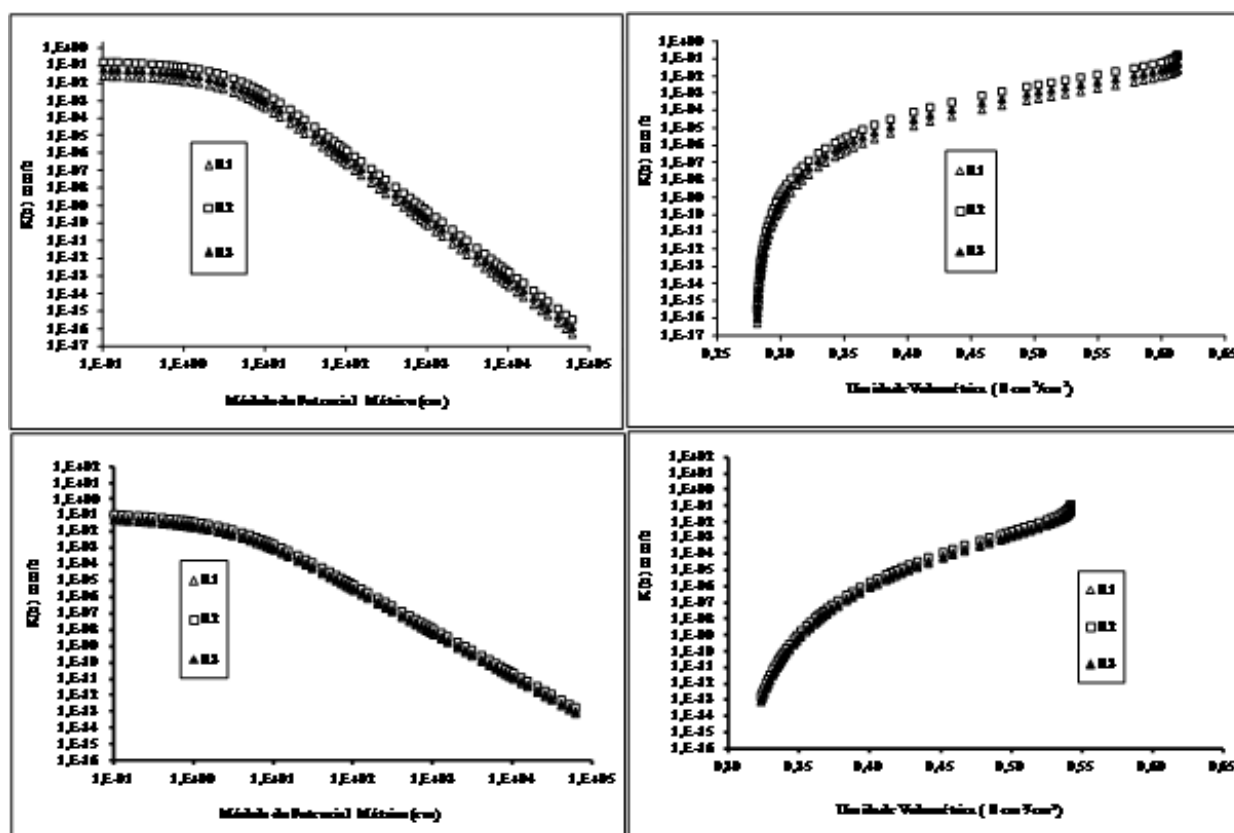


Figura 4 - Condutividade hidráulica (mm hora⁻¹) em função do módulo do potencial mátrico (cm) (a e c) e em função da umidade volumétrica (cm³ cm⁻³) (b e d) determinadas com os valores de Ks obtidos pelo problema inverso do Hydrus-1D para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 m respectivamente.

condutividade hidráulica não saturada pela metodologia utilizada. Nos testes de infiltração realizados, o módulo dos potenciais mátricos variaram entre -14 e -190 410 cm c.a (centímetro de coluna d'água). e os conteúdos

volumétricos de água variam entre 0,31 e 0,54 m³ m⁻³, para a camada de 0-0,20 m, e de 0,29 e 0,61 m³ m⁻³, para a camada de 0,20-0,60 m. Muitos dos métodos propostos para determinação da condutividade hidráulica

restringem suas observações a uma faixa muito limitada de valores de umidade e tensão. Um exemplo deste fato é o trabalho desenvolvido por Oliveira *et al.* (2005), que determinaram a condutividade hidráulica, pelo método do perfil instantâneo, em um Latossolo Vermelho distrófico típico em Lavras-MG, que apresentava, ao longo do perfil, valores de umidade residual de 0,20 a 0,207 m³ m⁻³ e a umidade saturada de 0,52 a 0,54 m³ m⁻³, com observações tomadas em intervalo de conteúdo de água variando de 0,311 a 0,481 m³ m⁻³ que corresponde a menos de 50% da variação possível dos valores de umidade volumétrica. Outro exemplo da determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado no campo em uma estreita faixa de umidade é o trabalho desenvolvido por Klein e Libardi (2002) que utilizaram uma faixa de umidade de 0,45 a 0,30 m³ m⁻³, a qual os próprios autores consideraram relativamente baixa. Logo, o método aqui proposto tem a vantagem de empregar intervalo de valores de umidade mais amplo que os utilizados por Oliveira *et al.* (2005) e Klein e Libardi (2002), já que este utilizou uma faixa de valores de umidade variando entre 0,31 e 0,54 m³ m⁻³, para a camada de 0-0,20 m, e de 0,29 e 0,61 m³ m⁻³, para a camada de 0,20-0,60 m.

As curvas do logaritmo da condutividade hidráulica não saturada versus a umidade volumétrica aqui mostradas nas Figuras 4b e 4d não apresentam comportamento linear, que, segundo Carvalho *et al.* (2007), é comumente observado em curvas do logaritmo da condutividade hidráulica não saturadas versus a umidade volumétrica determinadas pelo método do perfil instantâneo.

As curvas de condutividade hidráulica correspondentes a camada de 0-0,20 m, que são mostradas na Figura 4a e 4c, indicam, para as tensões de 9 e 20 cm, com as estimativas de Ks fixadas em R1, R2 e R3, valores de condutividades hidráulicas de 3,72, 7,8 e 4,68 mm hora⁻¹ e 0,63, 1,28 e 0,79 mm hora⁻¹, respectivamente. Na camada de 0-0,20 m de um Latossolo Vermelho-Escuro distroférico no campus da UFLA, Silva e Godinho (2000) determinaram em dois pontos de amostragem, com infiltrômetro de tensão, valores de condutividade hidráulica não saturada de 9,6 e 39 mm hora⁻¹, para tensão de 9 cm, e de 0,84 e 1,62 mm hora⁻¹, para a tensão de 20 cm. A proximidade entre estes valores e os obtidos no presente trabalho é mais um indicativo da adequação das estimativas de Ks obtidas neste estudo.

Conclusões

O problema inverso proposto permite determinar o parâmetro Ks do modelo van Genuchten para a curva de condutividade hidráulica sem histerese, com base em dados coletados sob um amplo intervalo de valores de umidade volumétrica e módulo do potencial mátrico;

O mesmo apresenta-se adequadamente definido para as estimativas de Ks nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,60 cm, porém não permite estimativa confiável de Ks na camada de 0,60-1,00 m;

Os valores de Ks do modelo van Genuchten para curva de condutividade hidráulica sem histerese, estimados pelo Hydrus-1D por meio do problema inverso proposto confirma o elevado grau de variabilidade espacial relatado na literatura para este parâmetro do solo.

Literatura científica citada

- ABBASPOUR, K. C.; SCHULIN, R.; van GENUCHTEN, M. Th. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. **Advances in Water Resources**, v.24, n.8, p. 827-841, 2001.
- BOHNE, K.; SALZMANN, W. Inverse simulation of nonsteady-state evaporation using non-equilibrium water retention data: a case study. **Geoderma**, v.110, n.1, p. 49-62, 2002.
- CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C.; CRUZ, A. C. R. Caracterização hidráulica de um Latossolo vermelho associada à caracterização pedológica do perfil. **Ciência Rural**, v.37, n. 4, p.1008-1013, 2007.
- FINSTERLE, S.; FAYBISHENKO, B. Inverse modeling of a radial multistep outflow experiment for determining unsaturated hydraulic properties. **Advances in water Resources**, v.22, n.5, p. 431-444, 1999.
- GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- GHIRBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1177-1188, 2011.
- HIESTAND, J. **Numerical Methods with VBA programing**. 1.ed. Boston, Jones and Bartlett Publishers, 2008. 283p.
- HURTADO, A. L. B.; CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. de J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 301-307, 2005.
- KOSUGI, K.; MORE, K.; YASUDA, H. An inverse model approach for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor. **Journal of hydrology**, v. 246, n.1, p. 96 – 108, 2001.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

- MESQUITA, M. da G. B. de F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- MUBARAK, I.; ANGULO-JARMILLO, R.; MAILHOL, J.C.; RUELLE, P.; KHALEDIAN, M.; VAUCLIN, M. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent? **Agricultural Water Management**, v. 97, n.10, p.1517-1526, 2010.
- OLIVEIRA, P. M. de.; SILVA, A. M de.; COELHO, G.; SILVA, R. A de. Análise comparativa da caracterização físico-hídrica de um Latossolo Vermelho distrófico *in situ* e em laboratório. **Irriga**, v. 10, n. 1, p. 1-19, 2005.
- RITTER, A.; HUPET, F.; MUÑOZ-CARPENA, R.; LAMBOT, S.; VANCLOOSTER, M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v.59, n.2, p. 77-96, 2003.
- SILVA, E. L.; GODINHO, F. V. Infiltrômetro de disco para determinação da condutividade hidráulica de solo não-saturado. **Ciência e Agroecologia**, v. 26, n. 3, p. 585-588, 2002.
- SILVA, J. R. L. da; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. dos. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 27-36, 2012.
- SIMÕES, W. L.; FIGUEIREDO, V. B.; SILVA, E. L. da. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p 359-366, 2005.
- ŠIMŮNEK, J. E.; GENUCHTEN, M. T. van; SEJNA, M.van. **The HYDRUS-1D Software Package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.14, HYDRUS Software Series 1**. Riverside: Department of Environmental Sciences- University of California Riverside, 2009. 315 p.
- SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. **Water Resources Research**, v.32, n.9, p.2683-2696, 1996.
- TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 161-168, 2005.
- VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p.1271-1280, 2007.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980. chap. 2, p. 319-344.
- WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources, Life Science and Education**, v. 27, n.4, p. 13-19, 1998.
- ZOU, Z.Y.; TONHG, M. H.; WIERENGA, P. J. Estimation of depth averaged unsaturated soil hydraulic properties from infiltration experiments. **Journal of hydrology**, v. 242, n.11, p. 26-46, 2001.